



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE DE CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en génie civil

Option :Structure

Thème

**Simulation numérique d'un béton fibré soumis
à une haute température**

Proposé et encadré par :

M^{me} O. FEDAOUI - AKMOUSSI
Co-encadré par :
Mr A. Si Salem

Présenté par:

M^{lle} ZAMOUM Lydia
M^{me} SETBEL Safia épouse LEHARA

Promotion 2020/2021

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie Dieu de m'avoir donné la patience, ainsi que la volonté et le courage de réaliser ce travail.

*Je tiens à adresser mes profonds remerciements à **M^{me} AKMOUSSI** de m'avoir confié un sujet de recherche prestigieux et passionnant. Je tiens à lui témoigner toute ma gratitude pour son aide et sa rigueur scientifique.*

*J'exprime également toute ma reconnaissance à **M^r Abdelmadjid SI SALEM** qui a apporté un soutien scientifique constant à mon travail de recherche, je le remercie pour sa disponibilité, sa modestie et ces conseils.*

J'adresse mes sincères remerciements à tous les membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce mémoire de fin d'étude et lui apporter ainsi l'accréditation de la communauté scientifique.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude pour tous ceux qui ont participé de près et de loin à la réalisation de ce mémoire. Particulièrement ma chère famille.

Enfin, je remercie tout mes amis et proches notamment les étudiants M2 structure.



Dédicaces

Je dédie ce travail

A celui qui a veillé sur moi pour qu'il ne me manque rien, celui qui était toujours fière de moi, a l'homme de ma vie mon cher grand-père

(Vava) et ma chère grand-mère (mamas)

A mes chers parents pour leur soutien et encouragement durant mon cursus,

grâce a eux que j'ai pu arriver a ce stade,

que dieu leur procure bonne santé et longue vie ;

A mes frères et sœur (Salem, Cylina, Hamza)

A ma chère binôme SETBEL Safia

A tout mes amis (Ouiza, Malha, Safia, Zahra, Sarah, Siham, Amine, Moh,

Aziz, Karim et Amir...) et a tous les étudiants de M2 structure en particulier

(Safia, Nacer, Said, Nazim, Nabila, Camy...)

A tous ceux qui m'ont encouragé et aidé de près ou de loin

dans la réalisation de ce mémoire.

Lydia





Dédicaces

Je dédie ce travail

A mes très chers parents

A mes chers frères et sœurs ;

*A mon mari et mon fils **Rayan***

*A ma petite nièce **Sarah***

A ma binôme ZAMOUM Lydia

A tout mes amis et proches, particulièrement

Les étudiants de M2 structure

A toute personne ayant contribué à

la finalisation de ce travail.

Safia



RESUME

La connaissance du comportement du béton soumis à de hautes températures constitue un enjeu de grand intérêt pour les structures de génie civil en cas d'incendies car le béton peut présenter une instabilité thermique au-delà d'une certaine température.

Le but principal de ce travail est d'étudier l'effet des fibres de polypropylène et de fibres métalliques sur le comportement du béton soumis à une température élevée. Ce comportement sera étudié en utilisant la méthode des éléments finis appliquée aux cas tridimensionnels (3 D) dans laquelle le logiciel ABAQUS a été utilisé comme outil de modélisation. Afin de montrer l'effet des fibres, le béton fibré a été modélisé en le considérant comme un matériau isotrope homogène.

Dans le but de validation du modèle numérique élaboré, les résultats de simulation seront comparés aux résultats obtenus dans la littérature.

Mots clés : béton, fibres, haute température, Caractéristiques mécaniques, simulation, Abaqus.

ABSTRACT

The knowledge of the behavior of concrete subjected to high temperatures is of great interest for civil engineering structures in case of fire because concrete can exhibit thermal instability above a certain temperature.

The main goal of this work is to study the effect of polypropylene and metal fibers on the behavior of concrete subjected to high temperature. This behavior will be studied using the finite element method applied to three-dimensional cases (3 D) in which the ABAQUS software was used as a modeling tool. In order to show the effect of fibers, the fiber-reinforced concrete was modeled by considering it as a homogeneous isotropic material.

In order to validate the numerical model developed, the simulation results will be compared to the results obtained in the literature.

Key words: concrete, fibers, high temperature, mechanical characteristics, simulation, Abaqus.

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Partie I : Etude bibliographique

Chapitre I : Généralités sur le béton

I.1. Introduction	3
I.2. Les composants du béton	4
I.2.1. Le ciment	5
I.2.2. Les additions minérales	6
I.2.3. L'eau	6
I.2.4. Les adjuvants	8
I.2.5. Les granulats	9
I.3. Les types de béton	11
I.4. Formulation des bétons	12
I.5. Conclusion.....	12

Chapitre II : Le béton fibré

II.1. Introduction	13
II.2. Définition d'un béton de fibres	13
II.3. Type de fibres.....	13
II.3.1. Fibres artificielles	14
II.3.1.1. Fibres de verre.....	14
II.3.1.2. Fibres métalliques	14
II.3.1.3. Fibres de polypropylène.....	15
II.3.2. Fibres naturelles.....	16
II.4. Composition des bétons de fibre et leurs comportements.....	17
II.5. Avantages du béton fibré.....	18
II.5.1. Aspect technique.....	18
II.5.2. Aspect économique.....	18
II.6. Rôle et domaine d'application des fibres	18
II.7. Effets de l'addition des fibres sur le comportement des bétons à l'état frais	21
II.8. Formulation de béton de fibre	22

Sommaire

II.8.1.	Optimisation des bétons de fibres métalliques (méthode B lesage)	23
II.9.	Facteurs influant sur le comportement d'un béton renforcé de fibres.....	23
II.9.1.	Nature des fibres	24
II.9.2.	Distribution des fibres et leur orientation	24
II.9.3.	Forme et longueur de la fibre	25
II.9.4.	Dosage en fibre	25
II.10.	Comportement des BFM à l'état durci	26
II.10.1.	Comportement en compression.....	26
II.10.2.	Comportement en traction par flexion	27
II.10.3.	Module de Young	28
II.11.	Conclusion	29

Chapitre III : Dégradation du béton à haute température

III.1.	Introduction	30
III.2.	Différentes formes d'endommagement thermique	30
III.2.1.	Paramètres et phénomènes favorisant l'instabilité thermique du béton	31
III.2.1.1.	La présence d'eau dans le béton	31
III.2.1.2.	Les propriétés physico-mécaniques du matériau	32
III.2.1.3.	La vitesse de chauffage	32
III.2.1.4.	La nature des granulats	33
III.2.2.	Déformation thermique du béton.....	34
III.3.	Evolution des propriétés mécaniques	35
III.3.1.	Resistance à la compression	35
III.3.2.	Résistance à la traction	37
III.4.	Influence des fibres de polypropylène sur le comportement du béton soumis à une haute température	39
III.4.1.	Instabilité thermique	39
III.4.2.	Perte de masse du béton.....	39
III.4.3.	Resistance en compression	40
III.4.4.	Resistance en traction par flexion.....	41
III.5.	Influence des fibres métalliques sur le comportement du béton soumis à une haute température.....	42
III.5.1.	Perte de masse	42
III.5.2.	Resistance en compression	43
III.5.3.	Résistance en traction par flexion.....	45
III.6.	Comportement des bétons de cocktail de fibres	46

Sommaire

III.7.	Conclusion	47
--------	------------------	----

Partie II : Analyse numérique

Chapitre IV : Généralités sur ABAQUS et simulation

IV.1.	Introduction	48
IV.2.	Présentation du logiciel ABAQUS	48
IV.2.1.	ABAQUS /Standard	50
IV.2.2.	ABAQUS /Explicit	50
IV.2.3.	Le CAE (Complété ABAQUS environnement)	52
IV.3.	Présentation de la variante d'étude	54
IV.4.	Présentation des étapes de la simulation.....	54
IV.5.	Modélisation du comportement de matériaux	64
IV.5.1.	Model non linéaire pour le béton.....	64
IV.5.1.1.	Lois du comportement : compression/traction.....	64
IV.5.1.2.	Identification des paramètres du modèle	70
IV.6.	Conclusion	71

Chapitre V : Résultats et interprétations

V.1.	Introduction	72
V.2.	Etude de convergence de maillage	72
V.3.	Confrontation et validation du modèle.....	73
V.4.	Résultats de l'analyse numérique	74
V.4.1.	Effet de la température sur chaque type de béton.....	75
V.4.1.1.	Courbe force-déplacement de chaque type de béton	75
V.4.1.2.	Evolution des dommages de chaque type de béton.....	79
V.4.2.	Effet de la température sur les différents bétons	83
V.4.2.1.	Courbes force-déplacement des différents bétons	83
V.4.2.2.	Cartographie des dommages pour les différents bétons.....	86
V.4.2.3.	Cartographie des déplacements pour les différents bétons	89
V.5.	Conclusion.....	92
	Conclusion générale.....	93

Références bibliographiques

LISTE DES FIGURES

Figure	Titre de la figure	Page
Figure I.2	Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire	3
Figure I.2	Influence du dosage en eau à un dosage de ciment fixé	6
Figure I.3	Influence du dosage d'eau sur la rhéologie	6
Figure I.4	Utilisation des superplastifiants	8
Figure I.5	de la résistance spécifiée sur divers paramètres	9
Figure I.6	Etendue de la taille des grains des composants granulaires et de la matrice cimentaire	10
Figure II.1	Les différentes formes des fibres métalliques	14
Figure II.2	Fibres de polypropylène	15
Figure II.3	Rôle des fibres dans la matrice de béton	18
Figure II.4	Apport du renfort par des fibres (Essai de traction)	18
Figure II.5	Utilisation des fibres métalliques dans les dallages industriels	20
Figure II.6	Effet de la taille des granulats sur la distribution de fibres	20
Figure II.7	Effet des fibres sur la maniabilité de béton	21
Figure II.8	Recherche de la maniabilité du rapport S/G optimal	22
Figure II.9	Influence de la direction du carottage sur le comportement en traction d'un béton fibré	23
Figure II.10	Évolution du gain de résistance compression du béton renforcé de fibres	25
Figure II.11	Influence de la teneur et longueur de fibres métalliques comportement en compression d'un béton fibré	26
Figure II.12	Résistance à la flexion du béton renforcé de fibres en fonction du temps	27
Figure II.13	Exemple de diagramme contrainte – déformation en compression (E0 module de Young)	27
Figure II.14	Évolution de la résistance en compression et du module de Young expérimental en fonction de la teneur en fibre	28
Figure III.1	Illustrations de dégradations d'ouvrages en béton à la suite d'une sollicitation thermique	30
Figure III.2	Pressions internes dans le béton en fonction de la teneur en eau libre et températures d'apparition des pics de pression	31
Figure III.3	Illustration du caractère instable des granulats de silex comparés aux granulats calcaires	32
Figure III.4	Déformations thermiques de bétons avec différents types de granulats (1: Siliceux, 2: Grès, 3: Calcaire, 4: Basalte, 5: Argiles expansées, 6: Pâte de ciment)	34
Figure III.5	Résistances en compression à chaud de bétons à différentes températures	35
Figure III.6	Résistances résiduelles en traction en fonction de la température de chauffage	37
Figure III.7	Perte de masse en régime transitoire des bétons avec et sans fibres de polypropylène durant l'échauffement à la vitesse de $1^{\circ}\text{C}.\text{mn}^{-1}$	39
Figure III.8	Evolution de la résistance résiduelle et à chaud relative en compression des bétons pour différentes teneurs en fibres de polypropylène exprimées en pourcentage volumique	40

Liste des figures

Figure III.9	Evolution de la résistance résiduelle relative en traction de bétons pour différentes teneurs en fibres de polypropylène exprimées en pourcentage volumique	40
Figure III.10	Evolution de la perte de masse des bétons C2 et CS2 en fonction de la température	42
Figure III.11	Test de compression de bétons de fibres de polypropylène et métalliques après traitement thermique à 300°C	44
Figure III.12	Evolution comparée de la résistance résiduelle relative expérimentale et théorique en traction des bétons de cocktail de fibres	45
Figure IV.1	Quelques formes complexes possibles à programmer sur ABAQUS	48
Figure IV.2	Illustration de la méthode de Newton	49
Figure IV.3	Illustration de l'opérateur de différence centrale	50
Figure IV.2	Schéma de fonctionnement d'ABAQUS	52
Figure IV.3	Présentation de l'interface ABAQUS	53
Figure IV.4	Les étapes de la simulation	54
Figure IV.5	Elément poutre	55
Figure IV.6	Elément plaque	56
Figure IV.7	Création des matériaux	57
Figure IV.8	Résultat de l'assemblage sur Abaqus	57
Figure IV.9	Création du Step	58
Figure IV.10	Création des interactions	59
Figure IV.11	Interaction du corps rigide	60
Figure IV.12	Conditions aux limites de module load	61
Figure IV.13	Définition des forces de module load. (Chargement en flexion a 3 points)	61
Figure IV.14	Conditions aux limites de module load	61
Figure IV.15	Création du maillage	62
Figure IV.16	Création de fichier job	63
Figure IV.17	Visualisation des résultats	63
Figure IV.18	Définition de la contrainte effective d'après Mura kami	65
Figure IV.19	Repense du modèle ; a) à la traction simple. b) à la compression simple	67
Figure IV.20	Récupération de rigidité lors d'un cycle complet	69
Figure V.1	Sensibilité de maillage	72
Figure V.2	Histogramme force max déplacement correspondant	74
Figure V.3	Confrontation des courbes forces-déplacements du modèle numérique et les courbes disponible en littérature	74
Figure V.4	Courbe forces-déplacements du béton témoin à 20°, 200°, 450°	75
Figure V.5	Courbe forces-déplacements du béton renforcé de fibre polypropylène à 20°, 200°, 450°	76
Figure V.6	Courbe forces-déplacements du béton renforcé de fibre métallique à 20°, 200°, 450°	77
Figure V.7	forces-déplacements du béton renforcé de fibre polypropylène et métallique à 20°, 200°, 450°	78
Figure V.8	Evolution des dommages du béton témoin à 20°	79
Figure V.9	Evolution des dommages du béton témoin à 200°	79
Figure V.10	Evolution des dommages du béton témoin à 450°	79

Liste des figures

Figure V.11	Evolution des dommages du béton de fibre de polypropylène à 20°	80
Figure V.12	Evolution des dommages du béton de fibre de polypropylène à 200°	80
Figure V.13	Evolution des dommages du béton de fibre de polypropylène à 450°	80
Figure V.14	Evolution des dommages du béton de fibre métallique à 20°	81
Figure V.15	Evolution des dommages du béton de fibre métallique à 200°	81
Figure V.16	Evolution des dommages du béton de fibre métallique à 450°	81
Figure V.17	Evolution des dommages du béton de fibre de polypropylène et métallique à 20°	82
Figure V.18	Evolution des dommages du béton de fibre de polypropylène et métallique à 200°	82
Figure V.19	Evolution des dommages du béton de fibre de polypropylène et métallique à 450°	82
Figure V.20	Confrontation des courbes forces-déplacements des différents bétons à 20°	83
Figure V.21	Confrontation des courbes forces-déplacements des différents bétons à 200°	84
Figure V.22	Confrontation des courbes forces-déplacements des différents bétons à 450°	85
Figure V.23	Evolution des dommages des différents bétons à 20°	86
Figure V.24	Evolution des dommages des différents bétons à 200°	87
Figure V.25	Evolution des dommages des différents bétons à 450°	88
Figure V.26	Evolution des déplacements des différents bétons à 20°	89
Figure V.27	Evolution des déplacements des différents bétons à 200°	90
Figure V.28	Evolution des déplacements des différents bétons à 450°	91

LISTE DES TABLEUX

Tableau	Titre du tableau	Page
Tableau I.1	types de béton distingué selon la composition	10
Tableau II.1	Domaine d'application de béton fibré	19
Tableau III.1	Hypothèses sur l'évolution de la résistance en compression en fonction de la température	36
Tableau III.2	Résistance en compression des bétons avec et sans fibres métalliques	43
Tableau III.3	Résistances en traction par flexion des bétons avec et sans fibres métalliques	44
Tableau IV.1	Tableau des unités correspondant à ABAQUS	48
Tableau IV.2	Les différentes lois utilisées pour le modèle adopté pour le béton	70
Tableau IV.3	Paramètres utilisés pour définir le comportement du béton fibré	71
Tableau IV.4	Valeur contraintes-déformations plastique et d'endommagement à la compression et à la traction du béton	71

INTRODUCTION GENERALE

Le matériau béton est un matériau endommageable, au comportement non linéaire de type fragile ou quasi-fragile, dont les propriétés en traction sont les plus faibles. Le renforcement par des fibres apparait de différentes manières selon les auteurs : par leur capacité à contrôler les fissures, comme des absorbeurs d'énergie, par leur capacité à transférer les charges, par leur résistance en traction afin de retarder, de limiter ou d'éviter la rupture quasi-fragile. Par leur capacité à modifier le comportement non linéaire en retardant la localisation de l'endommagement, elles augmentent la capacité de déformation du matériau, le niveau de contrainte au pic.

Le béton est le matériau le plus largement utilisé depuis plus d'un siècle, aussi bien dans le génie civil que dans le bâtiment. La prise en compte du comportement du béton soumis à des températures élevées est apparue dernièrement comme un problème majeur. Soumis à des températures élevées le béton peut présenter une instabilité thermique au-delà d'une certaine température et se dégrade régulièrement de l'extérieur vers le cœur pendant toute la durée de l'échauffement.

Une méthode efficace pour réduire le risque d'instabilité thermique est l'ajout des fibres en polypropylène dans la composition du béton. Il est important que ce dernier confère aux ouvrages de bonnes possibilités de restauration après incendie. Pour cela, les performances mécaniques résiduelles doivent être conservées à un niveau aussi proche que possible des performances initiales. L'ajout de fibres d'acier dans le béton soumis à une température élevée peut être une solution pour améliorer ses propriétés mécaniques résiduelles.

Notre travail a pour objectif d'utiliser une simulation numérique avec le logiciel ABAQUS des bétons soumis à une haute température afin d'améliorer la compréhension de la contribution des fibres de polypropylène et métalliques sur le comportement mécanique. Aussi de comprendre l'interaction entre les différentes natures de fibres lorsque le béton est soumis à une température élevée.

Le manuscrit est composé de deux parties principales ;

La première partie est une analyse bibliographique, elle regroupe :

Chapitre I : les généralités sur les bétons ainsi que ses différents constituants.

Chapitre II : le béton fibré et les différents types de fibres existantes

Chapitre III : dégradation du béton à haute température (l'influence des fibres de

Introduction générale

polypropylène, des fibres métalliques et d'un mélange des deux fibres sur les propriétés physiques et caractéristiques mécaniques du béton chauffé).

La deuxième partie est une analyse numérique, elle regroupe :

Chapitre IV : qui présente le modèle numérique non-linéaire en utilisant un modèle commercial d'analyse par élément fini (ABAQUS), Ce chapitre contient une description détaillée des éléments qui ont été utilisés pour modéliser le béton, et support / chargement. Il comprend également une description détaillée des outils numériques qui ont été utilisés pour résoudre les modèles.

Chapitre V : présente les résultats des modèles numériques. Une interprétation de ces résultats est également incluse, ainsi qu'une partie contenant la validation des résultats numériques par rapport aux résultats expérimentaux.

Nous terminons ce travail par une conclusion générale.

I.1. Introduction

Le matériau béton, est devenu irremplaçable dans le domaine de la construction, pour des raisons économiques et techniques. Simple en apparence, il est en réalité très complexe, avec une diversité d'applications et de méthodes de formulations. C'est le matériau le plus utilisé au monde : environ 7 milliards de mètres cubes de béton sont mis en œuvre annuellement.

La résistance à la compression du béton reste, du point de vue de l'ingénieur, la propriété la plus importante du matériau, si l'on exclut les indicateurs de durabilité [1]. La qualité et le potentiel du matériau béton dans la structure dépend bien sûr, des matériaux de base qui entrent dans sa composition mais également des opérations de : malaxage, mise en œuvre, vibration et cure (protection contre la dessiccation).

Dans cette partie, nous allons revoir un peu d'histoire sur le béton, ces différents composants, ainsi que les différentes formulations existantes.

Historique

L'histoire du béton montre que sa technique, bien fixée empiriquement par les Romains, avec la chaux grasse et la pouzzolane, a évolué seulement au 19^{ème} siècle, après l'apparition des chaux hydrauliques et des ciments.

L'ingénieur Bélidor, auteur de l'architecture hydraulique (1737) étudia la composition du béton et introduisit le mot béton dans son sens actuel.

L'invention de la chaux hydraulique par Louis Vicat en 1817, celle du ciment Portland par Aspdin en Ecosse en 1824 et l'installation des premiers fours par Pavin de Lafarge au Teil en France en 1830 préparent l'avènement du béton [2].

A l'origine, le béton était constitué d'un mélange de trois matériaux : le ciment, les granulats et l'eau. Dans la plupart des cas, le ciment était du ciment Portland obtenu par mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, cuit à la température de clinkérisation puis broyé. Par la suite, de petites quantités d'adjuvants chimiques ont été ajoutées au mélange afin d'améliorer certaines des propriétés du béton à l'état frais ou durci. Plus tard, d'autres matériaux de nature inorganique ont été utilisés dans le béton, pour des raisons économiques dans la plupart des cas. Ces substances inorganiques sont moins coûteuses que le ciment portland en raison de leur disponibilité à l'état naturel.

Au 20^{ème} siècle, le béton se développera considérablement avec l'évolution de ses techniques : usage croissant des adjuvants, béton prêt à l'emploi, matériel de mise en œuvre, mise au point du béton précontraint en 1928 par Eugène Freyssinet, ouvrant ainsi la voie à une envolée de l'audace architecturale (ouvrages d'art, bâtiments, etc.).

Dans les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix, les études relatives aux bétons à hautes performances ont montré le rôle néfaste de l'excès d'eau dans les bétons. La réduction de cette quantité d'eau, par l'emploi de défloculants et par correction de l'empilement granulaire via les ultrafines, a conduit aux gains de résistance allant jusqu'à 200 MPa et de durabilité.

De nos jours, l'étendue des exigences possibles a augmenté de façon spectaculaire. Par exemple, l'affaissement au cône d'Abrams varie de 0 pour les bétons de démoulage immédiat à plus de 25 cm pour les bétons autoplaçants. De même, les résistances requises à 28 jours en compression peuvent s'échelonner depuis des valeurs modestes, de l'ordre de 10 MPa pour certains bétons de masse, à des valeurs très élevées, supérieures à 200 MPa et plus pour certains produits spéciaux préfabriqués [3].

I.2. Les composants du béton

Le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, sable, gravier et, le plus souvent, adjuvants (figure 1.1) qui constituent un ensemble homogène. Les composants sont très différents : leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants, de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m³ ; les dimensions de leurs grains s'échelonnent de 0.5 µm (grains les plus fins du ciment) à 25 mm (gravillons). Mais cette liste s'allonge très vite dès que des propriétés particulières sont visées, on utilise alors des fines complémentaires ou additions minérales [4].

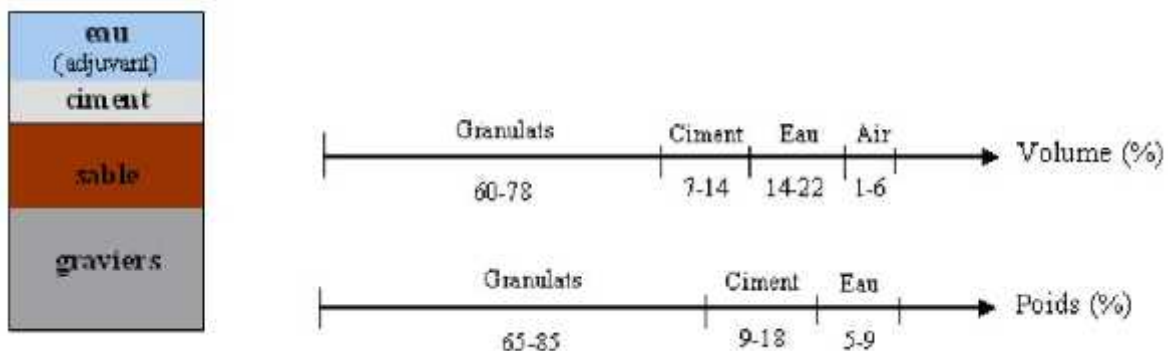


Figure I.1 : Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire [14].

La confection d'un béton approprié à sa destination consiste, à déterminer et à optimiser la composition granulaire et le dosage des divers constituants.

Dans les bétons les plus simples, le squelette granulaire est composé de deux coupures seulement, un sable et un gravier. Le ciment et l'eau de gâchage, dont les proportions relatives en masse sont fixées par le rapport E/C, vont former, avec les adjuvants éventuels, la pâte de ciment qui constituera le liant du béton. Ce rapport E/C joue un rôle primordial durant les étapes de vie du béton, l'eau en excès le rend plus fluide à l'état frais mais diminue les résistances du béton durci. Des additions minérales (cendres volantes, fumées de silice, laitiers, fillers,..) peuvent être rajoutées dans le but de modifier les propriétés du béton. L'utilisation de ces éléments fins est toujours combinée à l'emploi de superplastifiants pouvant réduire ainsi la quantité d'eau nécessaire à atteindre une fluidité suffisante. Le béton est donc un matériau hétérogène dont les constituants présentent des caractéristiques physico chimiques et mécaniques différentes et dans lequel chacun de ces composants joue un rôle bien précis dans le mélange.

I.2.1. Le ciment

Le ciment est l'ingrédient essentiel pour la formation d'un béton. C'est par définition un matériau dont les propriétés de liaison et de cohésion permettent de lier en un ensemble compact des fragments de matériaux. C'est un liant hydraulique à la base de calcaire et d'argile, qui se présente sous forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau. Il forme ainsi une pâte qui fait prise et qui durcit progressivement. Dès que le ciment et l'eau sont mis en contact, plusieurs réactions chimiques ont lieu [6]. La surface des grains de ciment se recouvre d'un film d'hydrates. Ces réactions s'opèrent alors plus lentement pendant une période dite dormante, avant d'accélérer pendant la phase de prise. C'est le constituant de base du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide.

Il existe différents types de ciments sur le marché, qui se distinguent par leurs relations avec les propriétés du béton. De ce fait, le choix du type de ciment et son dosage dépendent à la fois des performances recherchées (résistance mécanique, résistance aux agents agressifs) et de la nature des autres composants. Pour un béton courant, les ciments les plus utilisés sont les CEMII de classe 32,5 – 32,5 R – 42,5 – 42,5 R. Ce sont des ciments bien adaptés aux usages les plus courants du bâtiment, dans les environnements 1 et 2 au sens de la norme P 18-305 [7-8].

I.2.2. Les additions minérales

Différentes additions peuvent être mélangées au ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci [5]. Les principales sont les fillers calcaires, la fumée de silice, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes. Ce sont des additions fines définies comme la fraction granulométrique d'un granulat qui passe au tamis de 0,063 mm (Norme NF EN 933 - 8). En remplissant les micro-vides de l'empilement des agrégats (sable, graviers), ces additions minérales confèrent aux bétons frais de meilleures qualités de maniabilité. Ces ajouts font augmenter la cohésion et entraînent donc une diminution du ressuage et de la ségrégation du béton. Ils entraînent également une réduction de la chaleur d'hydratation et, par conséquent, le risque de fissuration thermique [9]. D'un autre côté, les additions minérales améliorent aussi l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques [10].

I.2.3. L'eau

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton, elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques et mécaniques. L'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais des propriétés rhéologiques permettant son écoulement et son moulage et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation. L'aspect fondamental du dosage en eau reste celui de la recherche d'un optimum sur un objectif contradictoire : une meilleure résistance obtenue en réduisant la quantité d'eau en augmentant la résistance et pour une amélioration de l'ouvrabilité en augmentant la teneur en eau. C'est lors de la recherche de cet optimum que les adjuvants peuvent jouer un rôle.

Le rapport E/C est un critère important des études de béton ; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de ces performances : résistance à la compression, durabilité.

Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher le béton. Certes, l'eau potable distribuée par le réseau du service public est toujours utilisable mais, de plus en plus souvent, nous sommes placés devant la nécessité d'utiliser une eau non potable. La norme XP P 18-303 [11], a permis de préciser à quelles conditions une eau est utilisable.

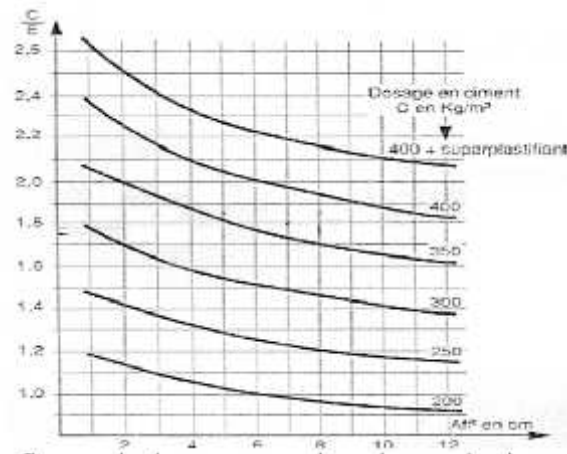


Figure I.2 : Influence du dosage en eau à un dosage de ciment fixé [12].

L'ajout d'eau a bien sûr pour conséquence d'augmenter l'ouvrabilité du béton. A titre d'exemple, la figure 1.2 montre un abaque tiré de la méthode de formulation de Dreux Gorisse, qui permet, pour différents dosages en ciment, d'évaluer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir un affaissement au cône d'Abrams visé.

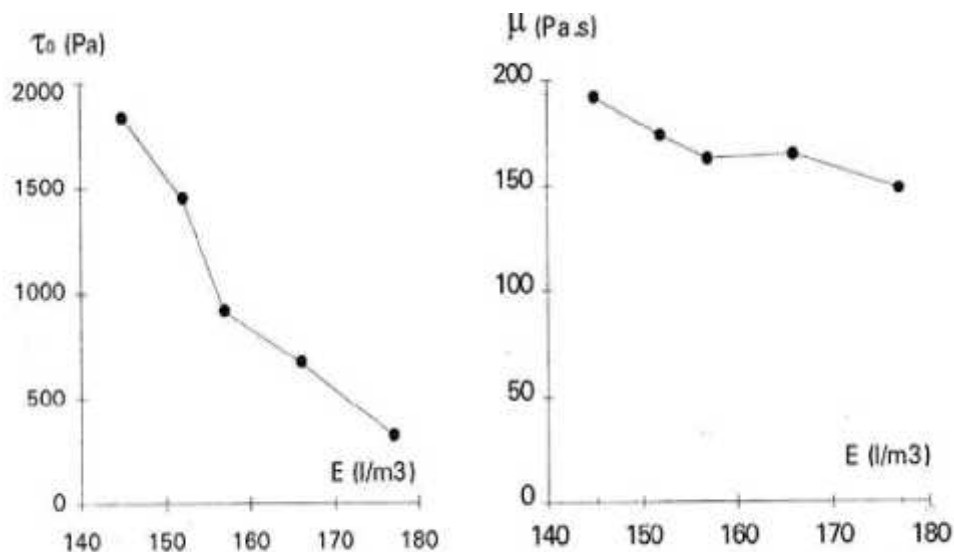


Figure I.3 : Influence du dosage d'eau sur la rhéologie [13].

μ : la viscosité plastique; τ_0 : contrainte de cisaillement; **E** : dosage en eau.

Un ajout d'eau conduit également à une diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique, comme on peut le voir sur la figure 1.3.

I.2.4. Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau, qui sont incorporés aux bétons à des doses qui doivent être inférieures ou égale à 5% du poids du ciment permettant d'améliorer certains de ses propriétés [1]. Ils fournissent au formulateur de béton une gamme étendue, variée et nuancée de possibilités pour faciliter la mise en œuvre des bétons, adapter leur fabrication par temps froid ou chaud, réduire les coûts de mise en œuvre, améliorer les propriétés des bétons durcis, voire même lui conférer des propriétés nouvelles. Il existe plusieurs types d'adjuvant qui sont régis par la norme NFEN 934-2, mais ceux qui conditionnent l'ouvrabilité du béton sont les superplastifiants. Ce sont des polymères organiques solubles dans l'eau dont la synthèse réalisée par une opération complexe de polymérisation produit de longues chaînes de molécules de masses moléculaires élevées. Ces molécules vont s'enrouler autour des grains de ciment et conduisent suivant leur nature à une répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains ou à une répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres [5]. Ces réactions conduisent à une défloculation et à une dispersion des grains de ciment. Ainsi, le principal effet des superplastifiants est une meilleure distribution des grains de ciment et, en conséquence, le mélange d'une plus grande quantité de ciment dans un même volume d'eau.

Les plastifiants et les superplastifiants permettent, comme décrit dans la figure 1.4, soit de réduire le dosage en eau à maniabilité constante, induisant donc un gain de résistance en compression, soit d'augmenter l'affaissement à teneur en eau constante. Les deux types de produits sont différenciés par leur efficacité en terme de réduction d'eau, les superplastifiants étant plus efficaces.

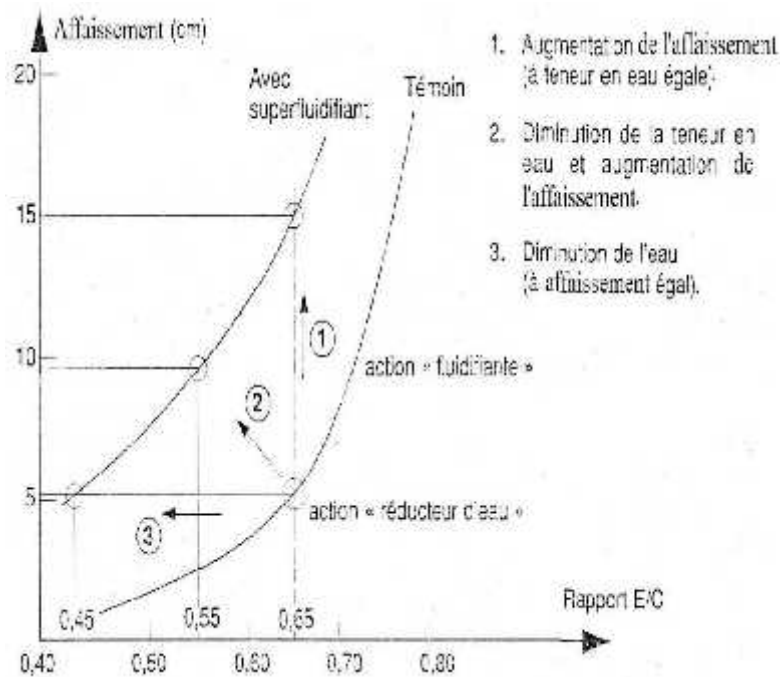


Figure I.4 : Utilisation des superplastifiants [12].

I.2.5. Les granulats

Les granulats sont un constituant essentiel des bétons qui conditionne à la fois leurs caractéristiques et leur coût. Les granulats sont définis par la norme P18-540, comme un ensemble de grains minéraux, destinés à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondations, de bases de roulement des chaussées et des assises et des ballasts de voies ferrées.

On peut distinguer les granulats naturels, issus de roches meubles ou massives extraites in situ et ne subissant aucun traitement autre que mécanique (c'est-à-dire concassage, broyage, criblage, lavage, sélection) et artificiels qui proviennent de la transformation thermique de roches, de minerais, de sous-produits industriels (laitiers, scories, etc.) ou encore de la démolition d'ouvrages de bâtiments divers en béton, souvent appelés granulats recyclés.

Les granulats ne sont pas réellement inertes et leurs propriétés physiques, thermiques et, dans certains cas, chimiques influencent les performances du béton. Par ailleurs, les granulats présentent un certain nombre de propriétés intrinsèques qui ne sont pas liées à la nature du massif rocheux d'origine, telles la forme et la dimension des grains, la texture de surface et l'absorption, or toutes ces propriétés peuvent avoir une influence considérable sur la qualité du béton, autant à l'état frais qu'à l'état durci.

Il ne faut pas perdre de vue qu'un béton tire du granulat une bonne part de sa résistance et plus particulièrement du gros granulat. D'où la nécessité d'employer des granulats de qualité, et de dimension maximale, celle-ci devant rester compatible avec une bonne facilité de mise en œuvre. Les essais sur les granulats sont d'une aide précieuse lors de leur sélection pour la fabrication des bétons [15].

En général, la forme des granulats a un effet appréciable sur la maniabilité du béton. En effet, les granulats roulés avec leurs formes présentent l'avantage d'avoir un plus petit volume de vide inter granulaire, ce qui nécessite une faible quantité de pâte de ciment pour le remplir et réduisent généralement la demande en eau. Ils présentent aussi une bonne résistance intrinsèque mais développent une liaison médiocre avec la pâte de ciment. Par contre, les granulats concassés nécessitent une plus grande quantité d'eau à cause de leurs compacités et de leurs absorptions [16], mais ils sont réputés avoir une excellente adhérence avec la matrice cimentaire, à cause de leurs natures chimiques, leurs porosités et leurs rugosités [13]. La figure 1.6 montre que la quantité d'eau est plus grande avec le granulat concassé, à cause de son absorption et de sa compacité. Mais dès que le mélange devient assez riche, il n'y a plus aucun effet de la forme du granulat sur le rapport optimal gravillon/sable (G/S). Enfin, la consommation en ciment est plus forte avec le granulat roulé, à cause de sa mauvaise adhérence à la pâte de ciment.

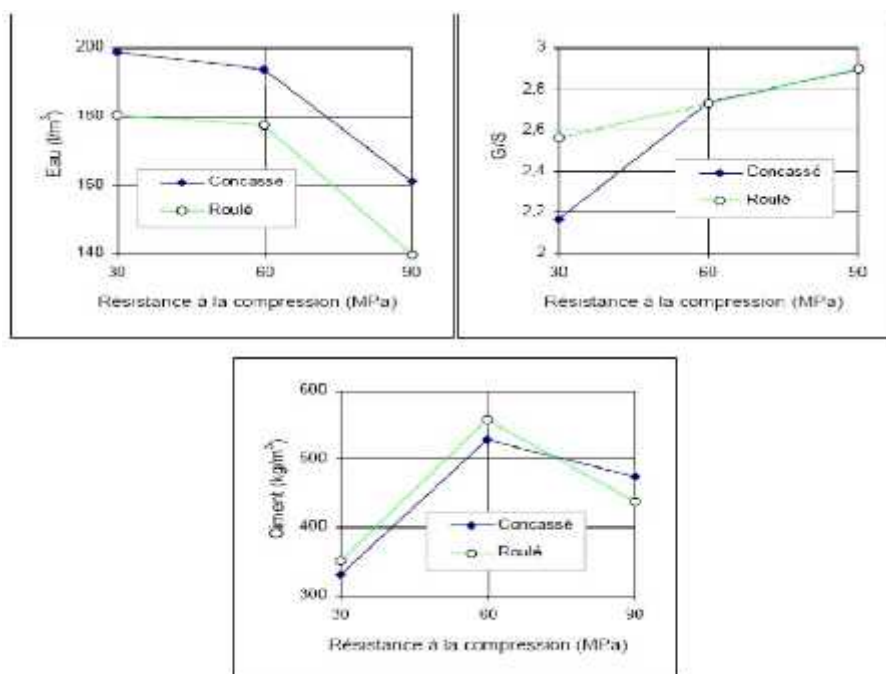


Figure I.5 : Effets de la résistance spécifiée sur divers paramètres [13].

L'étendue de taille des grains des bétons peut être illustrée dans la figure 1.7.

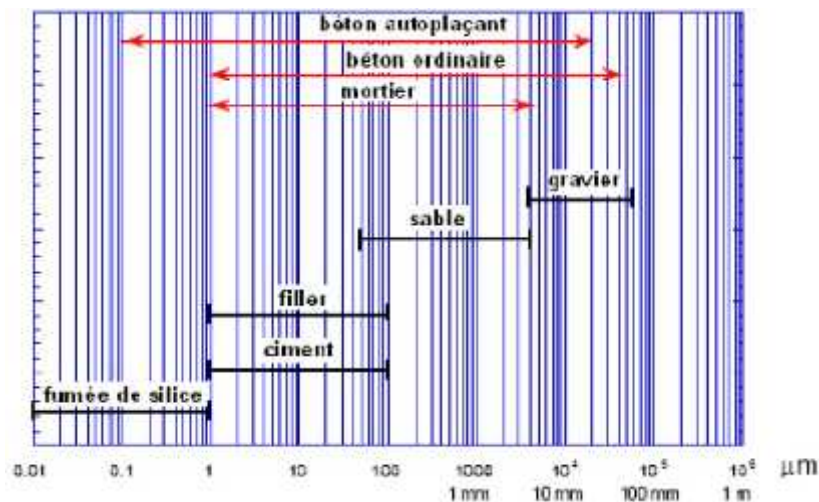


Figure 1.6 : Etendue de la taille des grains des composants granulaires et de la matrice cimentaire [5].

I.3. Les types de béton

On distingue plusieurs types de béton classés selon la composition, les différents types sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau I.1 : types de béton distingué selon la composition [17].

Type de béton	Composition	Rapport (eau/ciment) ou Granulat/sable)	Caractéristiques
Ordinaire (BO)	Eau+ciment+granulats	E/C 0,5 à 0,6	20Mpa f_{c28} 50Mpa
Hautes performances (BHP)	Eau+ciment+granulats+ Adjuvant réducteur d'eau	0.35 E/C 0.40	50Mpa f_{c28} 80Mpa
Très hautes Performances BTHP	Eau+ciment+granulats +superplastifiant+fumée de silice.	0.20 E/C 0.35	80Mpa f_{c28} 150Mpa
Autoplaçant(BAP)	Eau + ciment +granulats +fines (cendre volante, laitier de haut fourneau, fine calcaire) + superplastifiant + (agent de viscosité)	G/S 1	Béton très fluide, homogène et stable, mis en œuvre dans le coffrage par le seul effet de la gravité et sans aucun procédé de serrage. * f_{c28}

I.4. Formulation des bétons

La formulation d'un béton ordinaire (vibré) consiste à définir les proportions de ses différents constituants. La formulation des bétons ordinaires dépend des propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitée. Toutes les méthodes de formulation suivent presque la même procédure qui peut être résumée comme suit :

-) Choix du squelette granulaire (gravillons et sable) et du diamètre maximal des granulats, le squelette doit être validé par un fuseau granulaire de béton correspondant au type de béton espéré. Un fuseau granulaire est obtenu par recueil des courbes granulaires des bétons de qualité, qui ont fait preuves dans des projets antérieurs.
-) Choix de la nature du ciment et du rapport (Eau/Ciment) ;
-) Choix de la quantité de ciment et du volume des granulats ;
-) Choix des adjuvants ;
-) Recherche par le biais d'essais expérimentaux des dosages en adjuvants.
-) La nature des granulats est souvent imposée par les carrières qui fournissent la région où le béton doit être produit.

Il existe plusieurs méthodes de formulation de béton, méthode de Bolomey, méthode d'Abrams, de Faury, de Valette, de Joisel, Dreux Gorisse... [17].

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré que les qualités d'un béton dépendent des caractéristiques de leurs constituants, en particulier, les granulats qui occupent environ 75% du volume total du béton. Ainsi que l'influence de dosage en ciment, d'eau et des adjuvants sur la qualité de béton restent primordiale.

Toutes ces informations doivent être prises en considération dans le cadre de la formulation du béton pour comparer et interpréter les résultats expérimentaux.

II.1. Introduction

Le béton reste un matériau moderne. En effet, il a de nombreuses qualités, parmi lesquelles on peut citer son faible coût, sa facilité de moulage ou de projection pour se prêter à diverses conceptions, son excellente résistance en compression, sa grande rigidité, sa faible conductivité thermique, sa bonne tenue au feu et sa durabilité.

Toutefois, sa faible résistance en traction et sa fragilité font que le béton doit être renforcé. Ainsi, on utilise des armatures et des câbles ou des fils de précontraintes. Ces solutions traditionnelles ont fait leurs preuves et elles resteront utilisées encore très longtemps. Malgré cela, il existe une autre solution qui consiste à noyer dans le béton, des éléments résistant à la traction (des fibres qui sont naturelles ou synthétiques). Cela conduit à un matériau composite.

Si, en général, les fibres sont noyées au hasard dans le béton, il arrive que, par des mises en œuvre adaptées, on puisse donner aux fibres une orientation préférentielle correspondant à la direction des contraintes principales pour améliorer la résistance à la traction ou à la flexion d'une pièce. Les différentes recherches effectuées jusqu'à présent, et les premières applications font espérer que le béton de fibres permettra la fabrication d'éléments plus mince et résistants mieux à la fissuration.

II.2. Définition d'un béton de fibres

Un béton de fibres est un matériau composite constitué d'une matrice – le béton – et d'un renfort – la fibre –. Dans un béton fibré, les fibres n'ont d'autre rôle que de reprendre des efforts au travers des fissures créées dans la matrice. En d'autres termes, les fibres ne sont utiles que s'il y a des fissures potentielles dans le matériau [18].

L'une des caractéristiques mécaniques primordiale de la fibre qui permet la maîtrise de la fissuration est le module de Young, qui caractérise la rigidité de la fibre, en effet plus le module de Young de la fibre est important, le contrôle des fissures est meilleur et la longueur de fissures diminue, à condition que le bon ancrage des fibres dans le béton soit assuré.

II.3. Type de fibres

Il existe plusieurs types de fibres, ils sont classés selon leur origine (naturelles ou artificielles), leur diamètre et leur longueur (macro ou micro fibres), leur forme et leur état de surface (lisse, rugueuse, plate, ondulée, crantée...). Leurs propriétés mécaniques, résistance à

la traction et adhérence au béton, leur procurent un comportement mécanique spécifique aux structures renforcées de fibres.

Le choix des fibres dépend de l'usage recherché (pièces minces ou massives, renforcement de pâte pure, de mortier ou de béton, réparation des structures), de leurs propriétés (résistance et module élevés, bonne adhérence) et de leur prix. Les différents types des fibres sont :

II.3.1. Fibres artificielles

Cette famille de fibre regroupe les fibres d'acier, les fibres de fonte, les fibres de verres, les fibres de carbone, amiante ...etc. Ces fibres sont utilisées dans le domaine industriel et particulièrement dans le domaine de génie civil.

II.3.1.1. Fibres de verre

Les fibres de verre sont obtenues par fabrication à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet de joule. Elles présentent de bonnes caractéristiques mécaniques, elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines.

Les fibres « E » sont sensibles aux alcalis libérés par l'hydratation du ciment. L'emploi de ce type de fibres dans le béton nécessite l'incorporation de polymères ou autres ajouts au mélange, au moment du gâchage qui ont pour fonction d'enrober la fibre et de la protéger de l'attaque alcaline.

Les fibres AR (alcali-résistantes) sont obtenues avec un verre riche en zirconium moins sensible aux alcalis.

Les principales propriétés des fibres de verre sont :

-) Bonne adhérence avec la matrice.
-) Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion.
-) Faible conductibilité thermique.

II.3.1.2. Fibres métalliques

Leur résistance à la traction doit être supérieure à 1000 MPa selon la norme NF EN ISO 16120-2 et [19]. La longueur de la fibre doit être trois fois plus grande que le diamètre du plus gros granulats. La géométrie de la fibre doit favoriser son ancrage dans la matrice béton (ex : un façonnage symétrique en forme de baïonnette appelée "crochet" optimise l'ancrage de la fibre dans la matrice béton).

Ce type de fibre est le plus utilisé dans le domaine de génie civil et qui a fait l'objet de plusieurs recherches. [20]

Les fibres métalliques sont de types et de formes variées et présentent une très bonne compatibilité avec le béton. La figure II.1 présente les différentes géométries de fibres métalliques. Les fibres sont composées d'acier ou carbone, d'acier inoxydable ou d'acier galvanisé contre la corrosion. En général, la longueur des fibres varie de 25 à 60 mm et le diamètre varie de 0,5 à 1,3 mm. La fabrication des fibres métalliques s'effectue selon plusieurs méthodes en relation avec leurs formes géométriques multiples. Ces fibres travaillent en tension dans le béton en étant sollicitées soit par frottement soit par ancrage ou les deux.

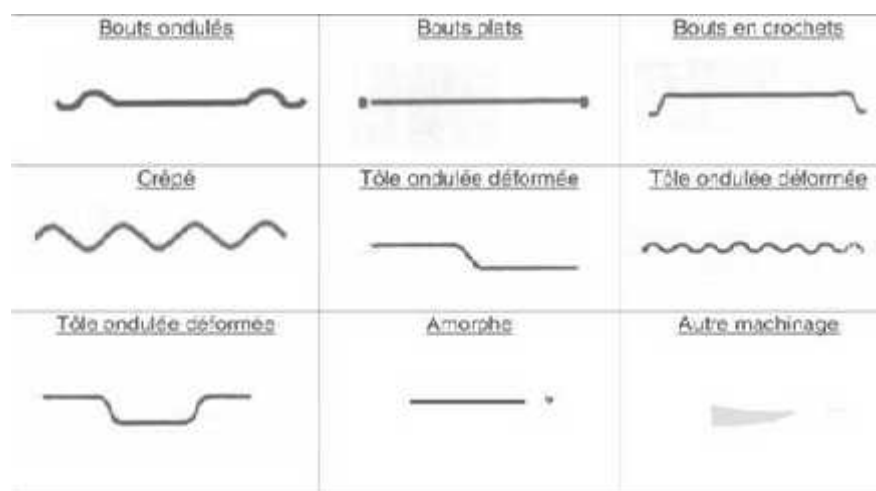


Figure II.1: Les différentes formes des fibres métalliques [32].

II.3.1.3. Fibres de polypropylène

Les fibres de polypropylène sont fabriquées depuis 1954 par l'industrie textile. Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfinés des produits chimiques. Il a connu une extension croissante dans ce domaine où il apporte les avantages suivants : déformabilité élevée et bonne résistance en traction qui peut atteindre 800 MPa. Ces fibres sont utilisées dans les bâtiments pour l'élaboration de revêtement de façades dans plusieurs constructions (Londonderry House Hôtel), ainsi que l'élaboration de panneaux décoratifs de 33cm d'épaisseur aussi dans la réalisation des canalisations et des pieux.

Les fibres de polypropylène sont en général assez longues (30 à 60 mm), légères et ne sont pas attaquées par le ciment. Leur module d'élasticité est plus faible que celui de la pâte durcie.

Il convient de les utiliser de préférence pour les pièces minces devant résister, soit à

l'action corrosive de certaines ambiances dans lesquelles l'acier pourrait se corroder rapidement, soit aux chocs mécaniques.

Si leurs caractéristiques mécaniques ont des valeurs plus faibles que celles des fibres métalliques, il faut cependant mentionner leur insensibilité chimique, leur souplesse, qui rend aisée leur incorporation au béton et leur allongement à la rupture (15 à 20 %), qui favorise la «ductilité» du béton.

Comme la plupart des matières plastiques, les fibres de polypropylène sont peu résistantes au feu : leur température de fusion est d'environ 160 C mais leur fusion n'affecte pas la résistance du béton.



Figure II.2: Fibres de polypropylène.

II.3.2. Fibres naturelles

Les fibres naturelles sont utilisées depuis 3000 ans dans les composites, par exemple dans L'ancienne Égypte, où la paille et l'argile étaient mélangées pour construire des murs. Au cours de la Dernière décennie, les composites renforcés de fibres naturelles ont reçu une attention croissante, tant auprès du monde universitaire que de diverses industries. Il existe une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être utilisées pour le renforcement ou comme charges. Les principales catégories de fibres agricoles sont :

-) Fibres libériennes : extraites de la partie extérieure de la tige (lin, chanvre, jute, ...)
-) Fibres extraites des feuilles : fibres de sisal, de bananier, de palmier...
-) Fibres extraites de poils séminaux des graines : fibres de coton, de kapok...
-) Fibres extraites de l'enveloppe du fruit : fibres de coco...
-) Fibres extraites des tiges ou des troncs : paille de blé, de riz, d'orge ou d'autres cultures les fibres naturelles contiennent principalement de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine [21].

II.4. Composition des bétons de fibre et leurs comportements

Les bétons renforcés de fibres ont fait l'objet depuis maintenant une cinquantaine d'années d'efforts de recherche importants. Le développement depuis une dizaine d'années de matrices cimentaires performantes a relancé l'intérêt pour l'utilisation des composites cimentaires renforcés de fibres.

L'utilisation de fibres augmente la ductilité du béton, c'est-à-dire ses caractéristiques en post fissuration. De plus, l'utilisation de fibres peut apporter une amélioration en flexion, en torsion et en cisaillement ainsi qu'à la résistance aux impacts et à la fatigue [22]. Un béton fibré continue donc à supporter des charges après la formation de fissures.

L'augmentation de la capacité en flexion est obtenue grâce à l'augmentation de la résistance résiduelle par l'utilisation des fibres. Cette propriété est aussi fonction de la nature, de la quantité et de l'efficacité des fibres utilisées. Il est important de se rappeler que la distribution uniforme des fibres dans le mélange est la condition essentielle pour obtenir une amélioration des caractéristiques mécaniques du béton fibré.

Il faut combiner tout apport de fibres dans le béton à des techniques d'insertion des fibres permettant d'éviter la formation «d'oursins».

La recherche d'une composition optimale du béton de fibre est assez difficile, car l'ouvrabilité et l'homogénéité du composite dépend de trois facteurs essentiels à savoir :

La géométrie des fibres définit par l'élançement, le volume de fibres ajoutées dans le béton et la forme d'ancrage des fibres.

Concernant le premier facteur, les fibres doivent être suffisamment longues pour s'opposer à l'ouverture des fissures ainsi elles doivent être munies d'un système d'ancrage aux extrémités dans le cas des fibres droites, néanmoins l'augmentation de la longueur et la présence des ancrages diminuent l'ouvrabilité du mélange [23].

Les granulats du matériau doivent avoir des dimensions permettant leur encadrement par la fibre [24], c'est pour cette raison que la matrice de béton doit être riche en élément fin.

Lors de la mise en œuvre du béton de fibre il est conseillé d'assurer le serrage par mise en vibration du coffrage ou table vibrante pour permettre l'orientation des fibres parallèlement au coffrage par effet de paroi, ce qui permettra l'enrobage de la fibre dans le béton et par conséquent éviter la corrosion des aciers.

La diminution de l'ouvrabilité du béton de fibre est récupérée par l'ajout du plastifiant dans le mélange.

II.5. Avantages du béton fibré

Les avantages de l'utilisation des fibres dans le béton sont présentés selon l'aspect technique et économique.

II.5.1. Aspect technique

L'avantage principal de l'utilisation d'un béton fibré est au niveau du contrôle de la fissuration ainsi que du support de charge, tout dépendamment du type de fibres et du dosage utilisé.

Les principaux avantages techniques sont :

-) Un renforcement tridimensionnel uniformément distribué à travers le béton ;
-) Une augmentation de la ténacité grâce au comportement en post fissuration (Résistance résiduelle) ;
-) Une énergie d'absorption élevée ;
-) Une résistance aux impacts élevée ;
-) Une résistance à la fatigue élevée ;
-) Une augmentation de la résistance au cisaillement.

II.5.2. Aspect économique

Les principaux avantages économiques des bétons fibrés sont :

-) Diminution du coût de mise en place et du temps de construction ;
-) Une optimisation du dimensionnement.

II.6. Rôle et domaine d'application des fibres

Lorsque les charges appliquées au béton s'approchent de la charge de rupture, les fissures se propagent, parfois rapidement. Les fibres noyées dans le béton jouent le rôle de « couture » des fissures.

En effet la longueur maximale d'une microfissure est de l'ordre de la dimension des plus gros granulats [25]. La longueur moyenne de fibres utilisées est supérieure à la dimension du plus gros granulats. Les fibres empêchent la propagation des microfissures qui peuvent s'agrandir par :

-) Allongement élastique ou plastique des fibres.
-) Effritement de la matrice de béton au voisinage de la fibre.

-) Glissement des fibres
-) Rupture des fibres.

L'agrandissement des microfissures dans la direction principale de traction conduit à la localisation des microfissures, alors les fibres qui relient les lèvres des microfissures (Figure II.3) sont tendues et soumises au cisaillement, les fibres absorbent une partie d'énergie qui conduit à la propagation des microfissures.

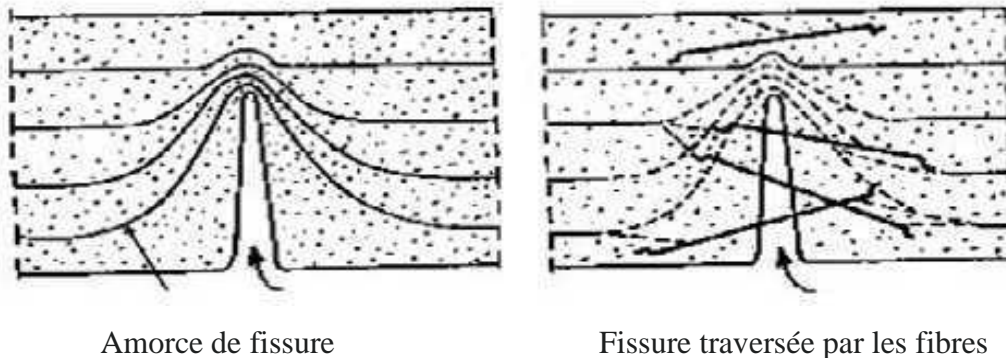


Figure II.3 : Rôle des fibres dans la matrice de béton [32].

L'incorporation des fibres dans le béton permet aussi de passer d'un comportement fragile à un comportement ductile ce qui conduit à l'accroissement de sécurité lors de chargement ultimes (Figure II.4).

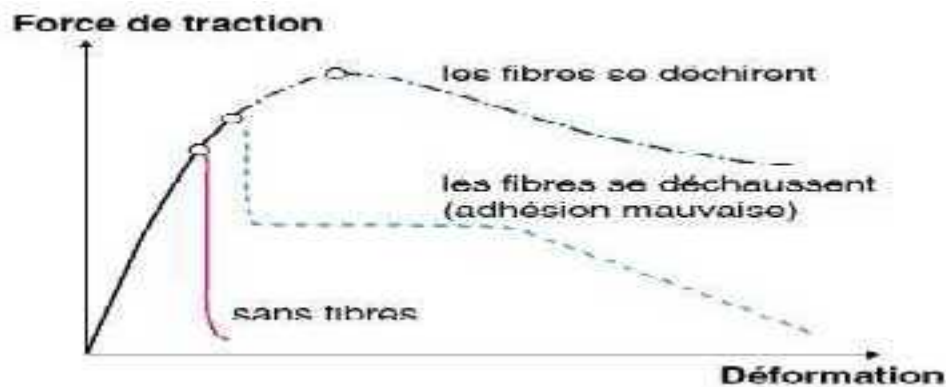


Figure II.4 : Apport du renfort par des fibres (Essai de traction) [26].

La recherche et le développement ont permis d'appliquer un concept de renforcement structural à différents types d'ouvrages en béton. De par leurs propriétés, les fibres trouvent un vaste domaine d'applications où il faut réduire les risques de fissuration, augmenter la résistance aux impacts et ainsi l'amélioration des performances du béton pour optimiser le dimensionnement des ouvrages.

Le béton fibré est utilisable dans tous les domaines du génie civil.

Tableau II.1 : Domaine d'application de béton fibré [27].

Domaine d'application	Intérêt de l'ajout des fibres dans le béton.
Canalisations et coques minces faiblement sollicitées	-Amélioration de la tenue des pièces aux jeunes âges -Modification des variations dimensionnelles, lutte contre la fissuration
Dallages, chaussées en béton, dallages manufacturés, et éléments structuraux soumis à la flexion	- Diminution de 40% de l'ouverture de fissures - Augmentation de la rigidité après fissuration - Augmentation de la résistance au cisaillement - Augmentation de la résistance à l'usure
Éléments structuraux soumis à la compression (poteaux, pieux, fondations...)	- Amélioration de la charge ultime -Pas de rupture fragile
Structures soumises à des sollicitations dynamiques (piste d'aéroport)	- Énergie absorbée plus importante - Augmentation de la résistance aux chocs - Loi de comportement du matériau fortement améliorée
Réparation des revêtements routiers, tabliers de ponts	-Amélioration de la résistance aux chocs -Amélioration de la déformabilité et de la durabilité
Parties exposées aux fortes variations de température et Même aux très hautes températures	- Remplacement avec succès de revêtement réfractaire -Diminution du coût de réparation des éléments réfractaires
Stabilisation des parois rocheuses, les talus, tunnels, et galeries souterrains	- Suppressions du travail de fixation du grillage ordinairement employé -Diminution du coût de réparation et/ou de stabilisation des parois rocheuses et des talus
Fabrication de pieux, revêtements ignifuges isolants, panneaux de Revêtement de façade	- Augmentation de la résistance aux chocs - Augmentation de la résistance à l'usure - Augmentation de la durabilité de revêtement



Figure II.5 : Utilisation des fibres métalliques dans les dallages industriels [32].

II.7. Effets de l'addition des fibres sur le comportement des bétons à l'état frais

La maniabilité des bétons est affectée de manière significative par l'addition de fibres : La porosité du squelette granulaire est d'autant plus grande que le volume de fibres est important [28]. Pour que les fibres soient efficaces à l'état durci, il est recommandé de choisir des fibres plus longues que la taille du plus gros granulat [29] (Figure II.6), suivant des proportions supérieures de 2 à 4 fois. Si le béton est destiné à être pompé, il préconise de réduire le volume de granulats bruts de 10% par rapport au béton ordinaire pour faciliter l'opération.

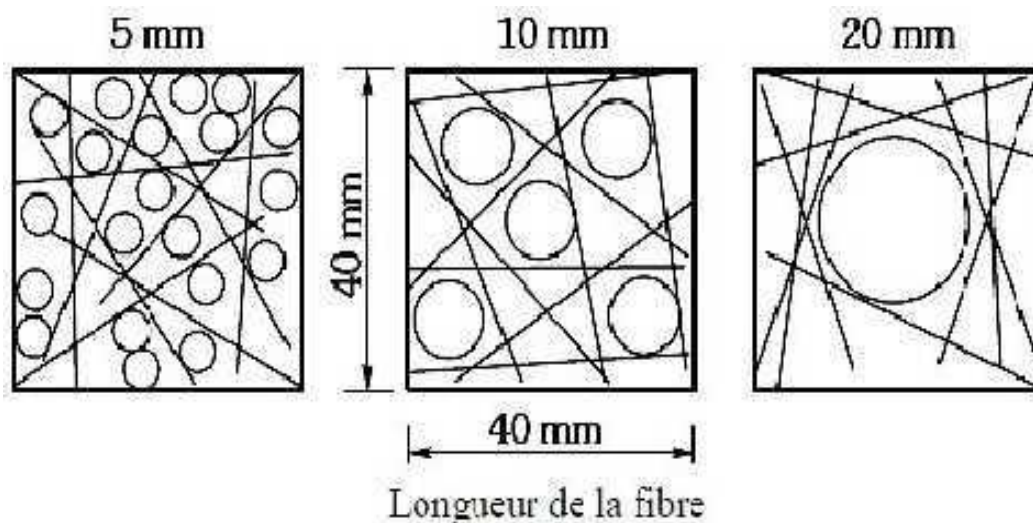


Figure II.6 : Effet de la taille des granulats sur la distribution de fibres [29].

L'introduction de fibres entraînant une diminution de l'affaissement estimé entre 50 et 75mm [30]. Une teneur en fibre forte conduit à une diminution rapide de la maniabilité de béton, cette diminution est du fait que l'ajout des fibres est traduit par une augmentation de la surface spécifique dans le mélange, ce qui entraîne une absorption d'eau conduisant au séchage du mélange qui signifie une perte dans l'ouvrabilité de béton (Figure II.7). L'ajout d'un super plastifiant est donc fortement conseillé afin de remédier à cette perte d'ouvrabilité [30].

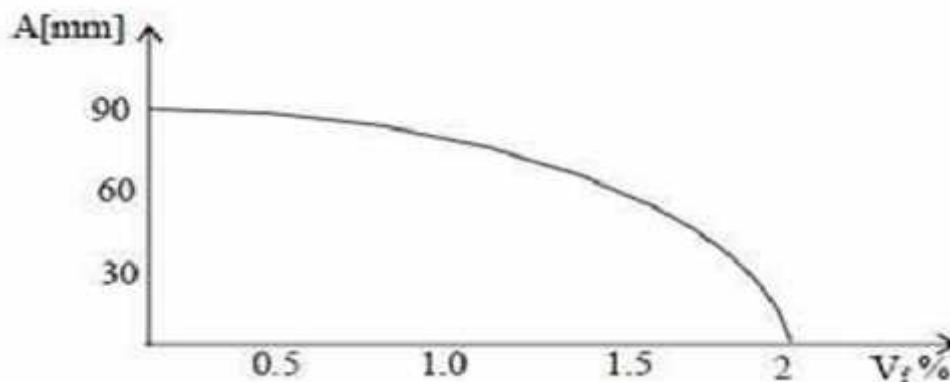


Figure II.7 : Effet des fibres sur la maniabilité de béton [31].

II.8. Formulation de béton de fibre

Le problème de la formulation de béton est compliqué de fait de nouveau constituant tel qu'adjuvant, et les fibres sont venues s'ajouter au constituant de béton ordinaire.

Dans l'objectif d'une composition optimale de béton renforcé en fibre métallique, le laboratoire central des ponts et chaussée LCPC propose une méthode expérimentale qui a comme point de départ la méthode Baron -Lesage [33] de formulation des bétons courants.

Cette méthode est basée sur les deux postulats suivants :

-) Pour un rapport (massique) eau sur ciment (E/C) et une quantité de pâte (E+C) donnés, le béton le plus compact a une maniabilité optimale,
-) L'optimum de compacité (déterminé par la constitution du squelette granulaire : sable + gravillons) n'est pas modifié lorsqu'on fait varier les quantités E/C et E+C.

La composition du béton doit être mise en fonction des caractéristiques de la fibre et des emplois. Afin de compenser la diminution de maniabilité due à l'incorporation des fibres il est recommandé l'emploi des superplastifiants.

II.8.1. Optimisation des bétons de fibres métalliques (méthode B lesage)

Dans la pratique, les étapes à suivre pour composer un béton fibré sont les suivantes :

- ✓ Fixer au départ le rapport eau sur ciment (E/C) ainsi que le pourcentage de fibres à ajouter.
- ✓ Faire varier le rapport S/G (sable sur granulats) et déterminer pour chaque rapport la maniabilité du béton de fibre. Tracer la courbe reliant la maniabilité et le rapport S/G ensuite déterminer le rapport S/G pour lequel la maniabilité est maximale.

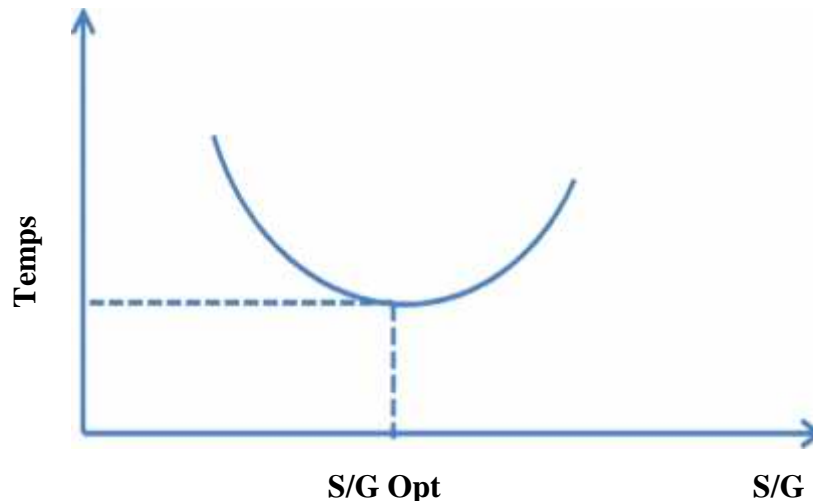


Figure II.8 : Recherche de la maniabilité du rapport S/G optimal [32].

Il est possible d'augmenter ou diminuer la quantité d'eau ou ciment en gardant le rapport eau sur ciment (E/C) le même afin d'avoir la maniabilité requise.

II.9. Facteurs influant sur le comportement d'un béton renforcé de fibres

Le comportement de béton renforcé en fibre est influencé par plusieurs paramètres qui affectent son ouvrabilité et son comportement mécanique, et pour cette raison on peut conclure qu'il est très difficile de généraliser l'apport exact des fibres par rapport à un béton.

Les principaux paramètres qui ont un effet sur le comportement de béton sont les suivants :

-) Nature des fibres (métallique, synthétique...).
-) Distribution des fibres et leur orientation.
-) Forme de la fibre (ondulée, droite, plate...).
-) Longueur de la fibre L_f et élancement L_f/D_f (D_f diamètre).
-) Dosage de fibre dans la matrice de béton.

II.9.1. Nature des fibres

L'amélioration des propriétés de béton fibrés est fonction de type de fibre incorporé dans le béton. Les travaux menés par certains chercheurs ont montré que les fibres métalliques améliorent les propriétés des bétons à l'état frais et durci mieux que les fibres de verres [34].

II.9.2. Distribution des fibres et leur orientation

La principale cause qui affecte l'orientation préférentielle des fibres est la mise en place du béton lors de coulage, en effet lors de coulage de béton les fibres s'orientent suivant l'axe de l'écoulement puis parallèlement aux parois au fur et à mesure que le béton remplit le coffrage. Aussi la vibration peut causer une orientation préférentielle des fibres suivant l'axe de vibration.

Les travaux menés par Casanova [35] ont montré une parfaite corrélation entre l'orientation préférentielle des fibres et le comportement mécanique en traction suivant les trois directions. Quand les fibres sont orientées perpendiculairement au plan de la fissure (carottes horizontales), les éprouvettes présentent un bon comportement à la traction, avec une meilleure résistance résiduelle.

Dans ce cas, les fibres assurent un transfert optimal des contraintes à travers la fissure. A l'inverse, lorsque les fibres sont orientées préférentiellement parallèlement au plan de la fissure (carottes verticales), ce comportement est semblable à celui d'un béton sans aucun renfort de fibres. Dans le cas intermédiaire (carottes diagonales), le comportement post pic est amélioré, mais de façon limitée en raison de l'orientation des fibres intermédiaire Figure II.5.

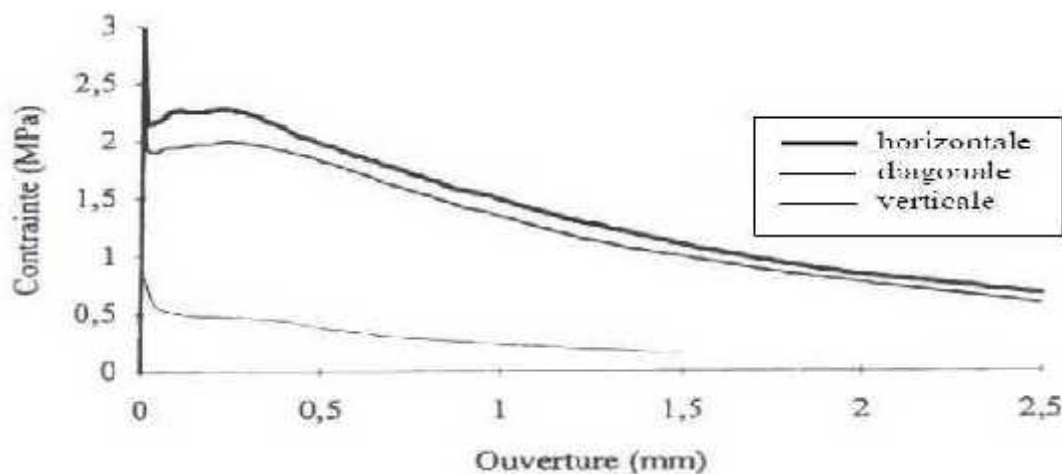


Figure II.9 : Influence de la direction du carottage sur le comportement en traction d'un béton fibré [35, 36].

Ainsi, plusieurs auteurs ont montré que les fibres orientées perpendiculairement à l'axe de la sollicitation reprennent efficacement la fissuration, alors qu'une orientation préférentielle parallèle à l'axe entraîne une baisse de l'effort maximum [37, 38].

II.9.3. Forme et longueur de la fibre

L'élanement ou le rapport longueur/diamètre joue un rôle prépondérant dans la maniabilité d'un béton renforcé de fibres (notamment métalliques) [49, 40, Hughes et al.1976 (dans 41)]. Pour un dosage en fibre donné, plus l'élanement est important, plus la maniabilité du béton diminue. Rossi explique ceci par deux constatations empiriques [41] :

➤ Pour une longueur de fibre et un volume donnés, plus le diamètre de la fibre sera faible, plus la surface spécifique sera grande. Ceci conduit à des frottements plus importants entre la fibre et la matrice, mais aussi à un nombre de fibres élevé qui augmente la probabilité de contact entre celles-ci. Ceci conduit à une diminution de la maniabilité quand le rapport longueur/diamètre augmente ;

➤ Pour un rapport longueur/diamètre fixe et un dosage en fibres donné, si le diamètre diminue, la longueur va elle aussi diminuer. Selon le raisonnement précédent, ceci conduit à une diminution de la maniabilité ce qui est en décalage avec la réalité car dans ce cas, le poids unitaire de la fibre intervient. Plus elles seront grandes, plus elles auront tendance à passer à travers le fluide visqueux constitué par la pâte de ciment pour entrer en contact avec les granulats c'est-à-dire à des frottements solides et donc à une diminution de maniabilité.

Concernant la forme géométrique, les fibres à crochets ondulées développent un ancrage et dissipent une énergie de fissuration par plastification de la fibre et par frottement à l'interface avec la matrice. Aussi elles développent un ancrage supplémentaire en plus de l'adhérence avec la matrice les rendant plus efficaces par rapport aux fibres droites.

II.9.4. Dosage en fibre

Le taux de fibre incorporé a une influence directe sur les propriétés de béton à l'état frais et durci. En effet les travaux menés par Abdul Ghaffar [42] ont montré que :

- ✓ L'ouvrabilité diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres métallique.
- ✓ La résistance à la compression et à la flexion augmente avec l'augmentation du pourcentage des fibres pour arriver à un maximum correspondant à un dosage respectivement de 3,0% et 4,0%, des fractions volumiques de fibres.

✓ En général, l'amélioration satisfaisante dans différents dosages est observée avec l'inclusion de fibre en acier dans le béton ordinaire. Cependant, le gain maximal de la résistance du béton se trouve à dépendre de la quantité de teneur en fibres.

✓ La ductilité du béton se trouve à augmenter avec l'inclusion de fibres à teneur élevée en fibres.

II.10. Comportement des BFM à l'état durci

II.10.1. Comportement en compression

La résistance à la compression simple d'un ouvrage est la donnée de base pour le calcul de la structure en béton armé. La plupart des résultats de la littérature concernant les bétons de fibres montrent une légère augmentation de l'effort maximum de compression avec la teneur en fibres mais au détriment de la maniabilité [40, 43].

La plupart du temps, les fibres sont sollicitées après la formation des fissures dans le béton. Leur rôle est alors de « couder » les fissures et de limiter leur ouverture. C'est pourquoi on note généralement plusieurs fissures de petites dimensions sur les éléments de BFM contrairement à quelques fissures de grande dimension dans les éléments de béton normaux. Ces fibres agissent donc à différentes échelles afin de limiter la fissuration du matériau causé par les charges ou le retrait [20].

Setti F. 1, Ezziane K. 1, Setti B. [44] ont constaté que l'apport des fibres métallique procure un gain de 29% de la résistance en compression avec un dosage de 1.5 % de fibre voir Figure II.10. Cette amélioration peut être attribuée à l'adhérence mécanique des fibres qui permet d'augmenter la capacité à retarder la formation des fissures et arrêter leur propagation. La longueur des fibres utilisées est de 50 mm et 0.75 mm d'épaisseur.

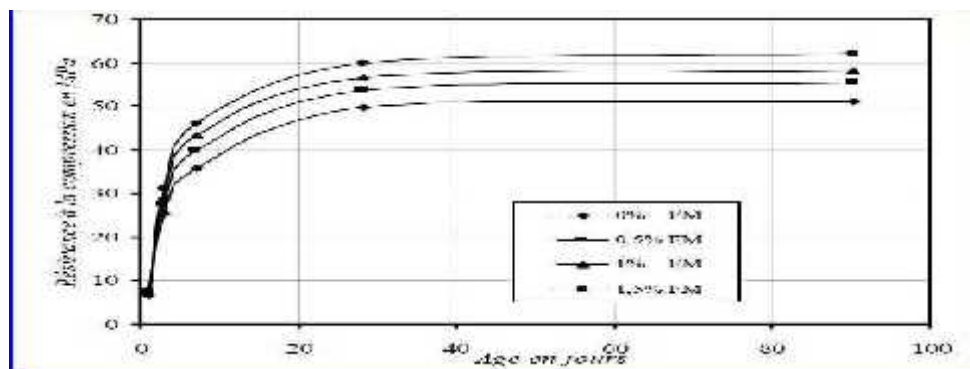


Figure II.10 : Évolution du gain de résistance en compression du béton renforcé de fibres [44].

Bensaid [45] a constaté dans ces travaux que le béton dosé à 1% de fibres métalliques présente un comportement mécanique très amélioré par rapport au matériau avec 0,5 % de fibre surtout au niveau du pic. Les deux bétons (avec 1% et 0.5 % de fibre) présentent une résistance nettement plus grande que le béton témoin voir Figure II.11

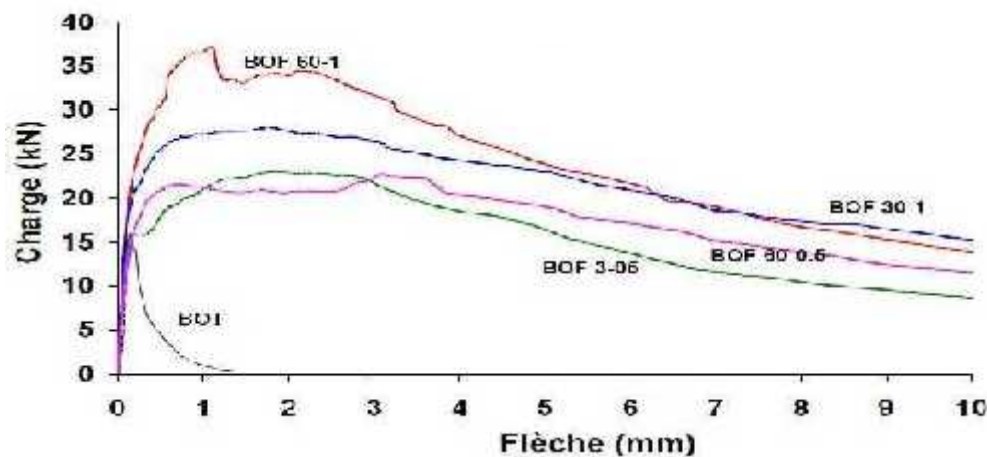


Figure II.11 : Influence de la teneur et longueur de fibres métalliques sur le comportement en compression d'un béton fibré [45].

BOT : béton ordinaire témoin, BOF60-1 : Béton avec fibre de longueur 60 mm et 1%, BOF 60-1 : Béton avec fibre de longueur 60 mm et 1% de dosage, BOF 30-1 : Béton avec fibre de longueur 30 mm et 1% de dosage, BOF 30-0.5 : Béton avec fibre de longueur 30 mm et 0.5% de dosage.

II.10.2. Comportement en traction par flexion

Le renforcement par des fibres métalliques est utilisé pour améliorer la ductilité et fournir un contrôle du mécanisme de fissuration. L'amélioration de la résistance de première fissuration est ordinairement un gain secondaire.

Contrairement au faible effet des fibres sur la résistance en compression de béton, les fibres ont un effet plus significatif à trait au comportement en flexion (traction), ainsi dans plusieurs applications, les bétons renforcés de fibres sont utilisés dans des endroits où ils sont soumis à de tels efforts.

Les fibres métalliques utilisées essentiellement en dallages industriels, dallages de parking, les pistes, les pieux, les déversoirs de barrage, les silos [46], présentent une bonne résistance à la traction et à la flexion, une augmentation de la ductilité et une réduction du nombre de joints de retrait.

Setti F. 1, Ezziane K. 1, Setti B. [44] ont constaté que la résistance à la flexion du béton augmente en fonction du temps, et que l'ajout de fibres d'acier engendre une nette

augmentation telle qu'on obtient une résistance qui double de valeur en présence de 1.5% de fibres. Voir Figure II.12.

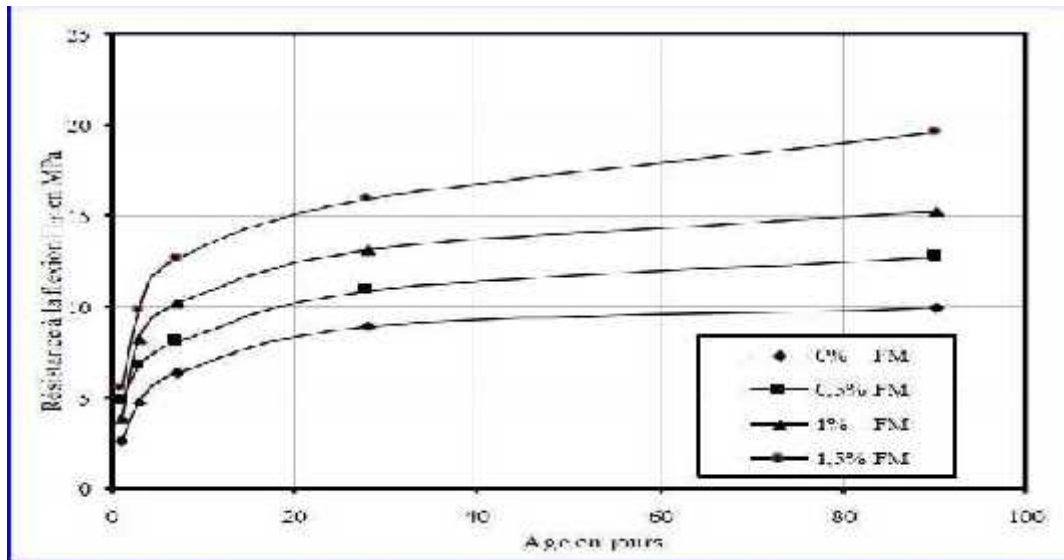


Figure II.12 : Résistance à la flexion du béton renforcé de fibres en fonction du temps [44].

Les résultats montrés ci-dessus sont obtenus avec maniabilité variable.

II.10.3. Module de Young

Le module de Young est une caractéristique qui conditionne la rigidité du matériau. Il est défini comme étant la pente de la partie droite de diagramme contrainte déformation. Voir Figure ci-dessous.

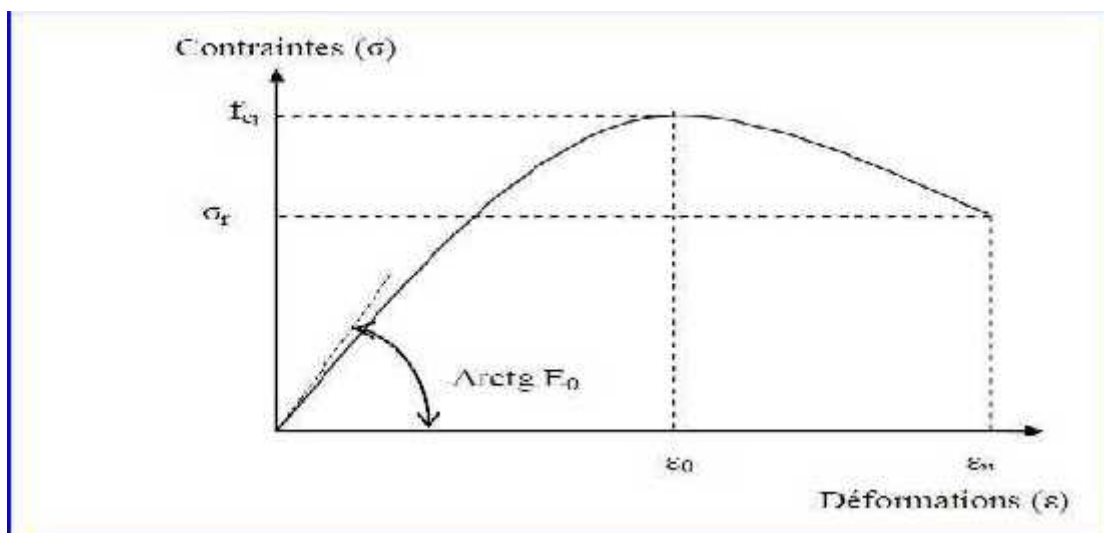


Figure II.13 : Exemple de diagramme contrainte – déformation en compression (E_0 module de Young) [32].

ELLOUZE [47] dans ces travaux a constaté que le module de Young augmente avec l'ajout des fibres métalliques par rapport au béton sans fibres, cette augmentation peut s'expliquer à l'aide de la loi des mélanges [48].

Selon les travaux Djebali [49], l'ajout des fibres (type spiral et de 30 à 40 mm de longueur) en faible pourcentage apporte une légère augmentation de la rigidité (3% à 4%) en compression, néanmoins avec l'augmentation du volume des fibres le module tend à baisser, cette diminution peut être expliquée par la baisse de compacité du matériau. La teneur optimale en fibre pour un module max est 4% voir Figure II.14.

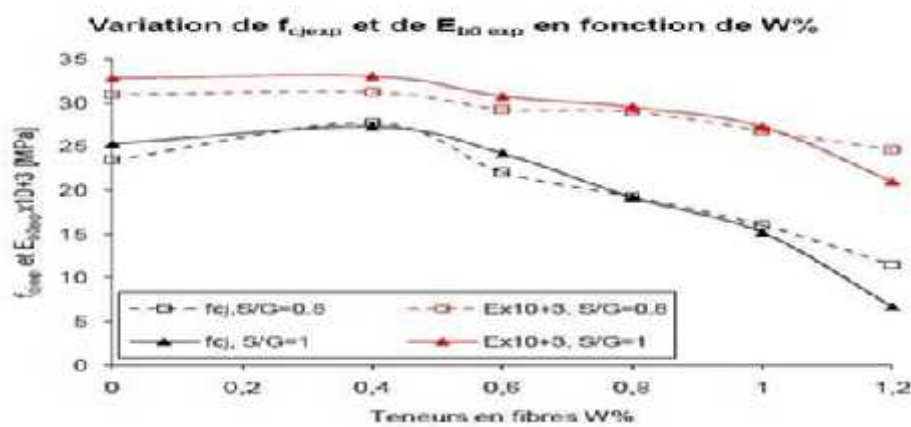


Figure II.14 : Évolution de la résistance en compression et du module de Young expérimental en fonction de la teneur en fibre [49].

II.11. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons résumé, l'état de connaissance sur l'historique et le comportement mécanique des bétons de fibres, les types, les avantages des bétons fibrés et influence de la présence des fibres dans le béton renforcés par des fibres.

Quelques recherches sur le béton de fibre et leur comportement à l'état frais et durci (maniabilité, résistance à la compression, résistance à la flexion et module de Young).

V.1. Introduction

A travers ce chapitre nous allons présenter et interpréter les résultats numériques relatifs aux béton témoin et béton de fibres (polypropylène et métalliques), obtenus lors de la simulation d'une poutre en flexion trois points (prismes), Ainsi que l'étude de l'influence de ces fibres sur le comportement mécanique de ces bétons porté à des températures élevées .

Quatre variantes d'étude porté à des températures élevées (20°, 200°, 450°). sont prises en considération à savoir :

- BT : béton sans fibres,
- BFPP : béton avec des fibres de polypropylène
- BFM : béton avec des fibres métalliques
- BFMPP : les bétons avec une association de fibres de polypropylène et métalliques

Le modèle élément fini proposé est validé à travers des confrontations avec les résultats expérimentaux réalisés par **Bouaziz [76]**.

A cet effet, tous les résultats obtenus, en termes d'évolution des contraintes, déformations en fonction du chargement mécanique et thermique sont discutés et présentés sous forme de graphiques force-déplacement et de cartographies dommages, déplacement, ceci nous a permis de mettre en valeur l'apport de la conception proposée.

V.2. Etude de convergence de maillage

Une étude de sensibilité du maillage pour la poutre en béton fibré est réalisée, l'objectif est de définir la dimension optimale des éléments finis choisis qui permet de mieux converger vers la solution exacte.

A cet effet une étude comparative est réalisée, lors de la simulation, cette dernière est effectuée avec des dimensions variées à savoir : **30 mm, 25 mm, 20 mm, 15mm, 10mm, 8mm, 6mm et 5mm.**

La figure ci-dessous montre les résultats obtenus de la poutre en flexion en fonction de la dimension de la maille en (mm).

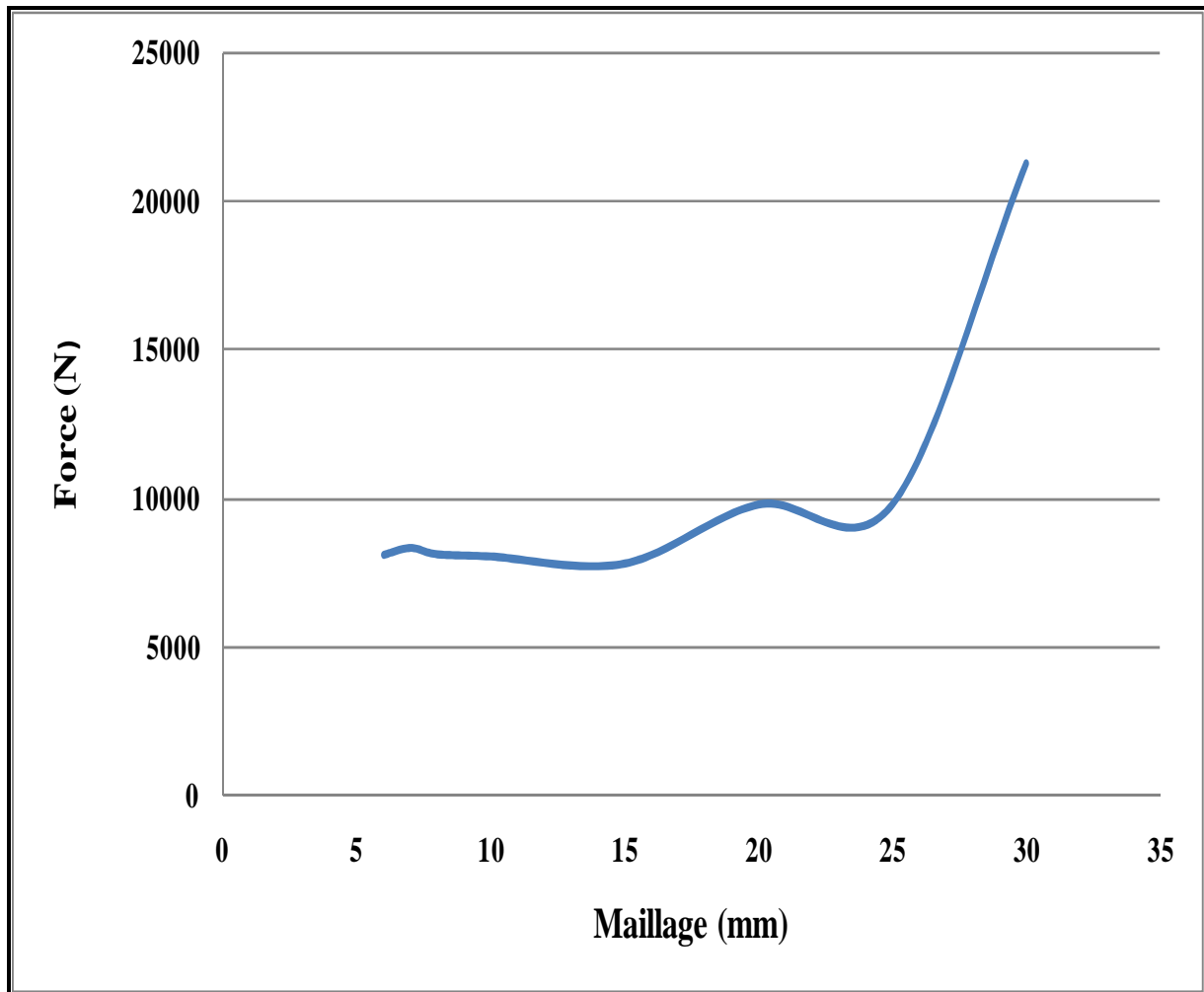


Figure V.1 : Sensibilité de maillage.

Après observation on constate que la courbe commence à se stabiliser (force constante) à une valeur approximative de 6 mm. Par conséquent, les éléments poutre sont maillés par des éléments fins de 6 mm dans les trois directions de l'espace, ce qui assure un maillage très raffiné.

V.3. Confrontation et validation du modèle

Afin de vérifier la fiabilité de la procédure numérique, une confrontation des résultats obtenus avec ceux des essais expérimentaux est réalisée **Bouaziz [76]**. Les figures (V.2) et (V.3), montre la confrontation des courbes forces-déplacements de la poutre en flexion. Les courbes obtenues ci-dessous sont extraites des résultats du modèle expérimental ainsi que des résultats de notre modèle numérique proposé.

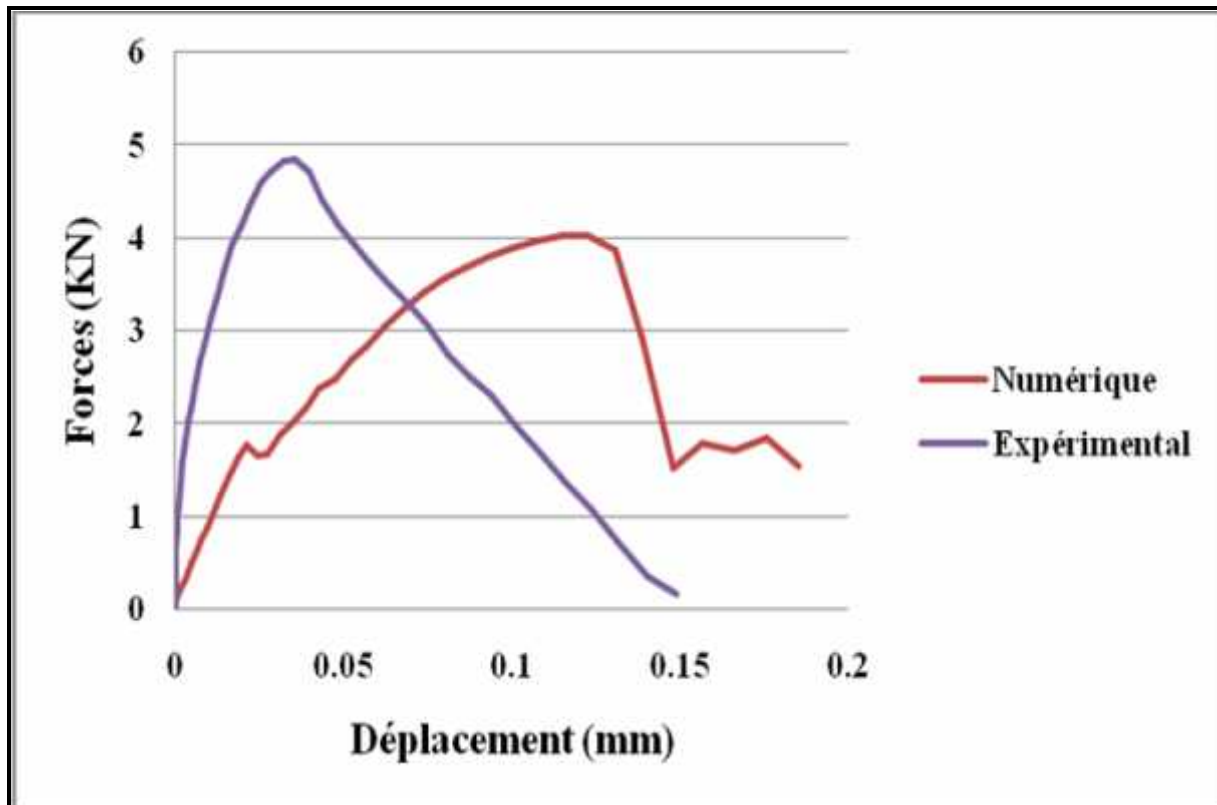


Figure V. 3 : Confrontation des courbes force – déplacement du modèle numérique et expérimentale. [76].

D'après, les résultats obtenus de la confrontation des courbes force-déplacement, on constate une bonne concordance entre les résultats numériques et expérimentaux en termes du comportement global de la poutre sous chargement de flexion.

La force maximale du modèle numérique est de **4.037 KN** pour un déplacement de **0.122 mm**, tandis que la force obtenue expérimentalement a une résistance maximale de l'ordre de : **4.84 KN** pour un déplacement de **0.035 mm**.

En effet, la conception proposée présente un seuil de résistance excellent vis-à-vis du modèle tiré des résultats expérimentaux.

V.4. Résultats de l'analyse numérique

Dans cette partie, on a présenté et interprété les graphiques force-déplacement obtenus lors de la simulation numérique et les cartographies de l'évolution des dommages sous l'effet des différentes températures (20°C, 200°C et 450°C).

V.4.1. Effet de la température sur chaque type de béton

V.4.1.1. Courbe force-déplacement de chaque type de béton

- Béton témoin à 20°C, 200°C et 450°C

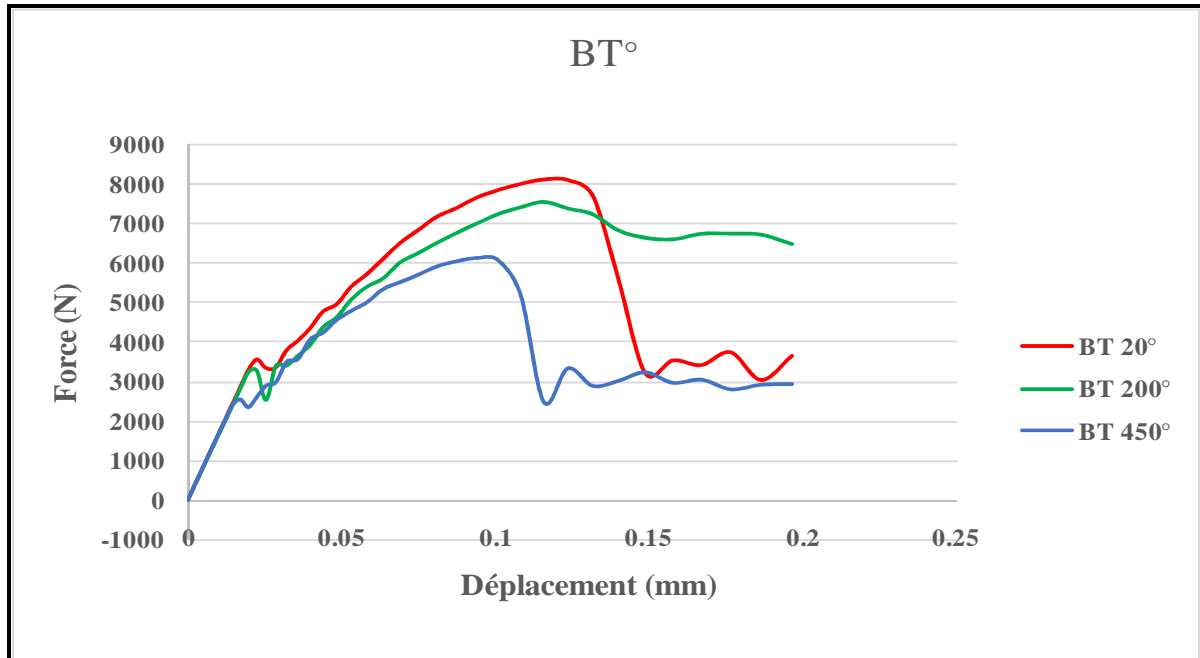


Figure V. 4 : Courbe force – déplacement du béton témoin.

La courbe force-déplacement du béton sans fibres (béton témoin) est caractérisée dans le cas 20°C par deux phases distinctes : une première phase ascendante pratiquement linéaire, qui évolue jusqu'à atteindre une force ultime de **8102.89 N**, pour un déplacement de **0.155 mm**.

Une seconde phase se caractérisant par une chute brutale de la résistance qui correspond à l'apparition des premières fissures (rupture fragile), **F = 3228.55 N** pour un déplacement de **0.149mm**.

Une même allure de courbe est observée dans le cas du béton soumis à 450°C :

Une première phase ascendante pratiquement linéaire, qui évolue jusqu'à atteindre une force ultime de **6127.64 N**, pour un déplacement de **0.094mm**. Une phase de chute brutale **F=2477.229 N** pour un déplacement de **0.155mm**.

Pour le béton traité à 200°C, la première phase se caractérise par un profil pas tout à fait linéaire atteignant une valeur de résistance ultime de **7579.47 N** correspondant à un déplacement de **0.155 mm**. Une deuxième phase adoucissante cette fois est notée après le point de résistance ultime.

➤ Béton renforcé de fibres de polypropylène à 20°C, 200°C et 450°

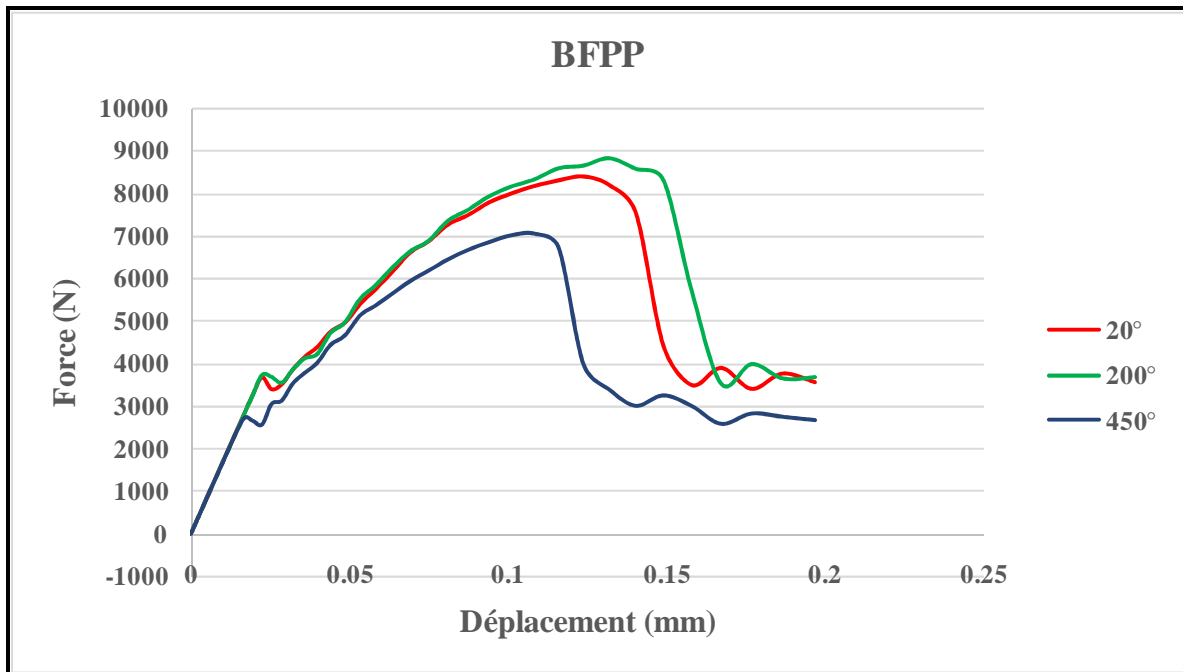


Figure V. 5 : Courbe force – déplacement du béton renforcé de fibres de polypropylène.

La courbe force-déplacement du béton de fibres de polypropylène a la même allure à différentes températures.

- 1- A 20°C, Une partie courbée pratiquement linéaire avant fissuration du béton de fibres (BFPP), d'une force ultime de **8372,19 N** correspondant à un déplacement de **0.123 mm**. Une phase de chute brutale $F = 3481.77 \text{ N}$ correspondant à un déplacement de **0.157 mm**.
- 2- A 200°C, Une partie courbée pratiquement linéaire avant fissuration du béton de fibres (BFPP), d'une force ultime de **8818.36 N** correspondant a un déplacement de **0.132 mm**. Une phase de chute brutale $F = 3521.45 \text{ N}$ correspondant à un déplacement de **0.167 mm**.
- 3- A 450°C, Une partie courbée pratiquement linéaire avant fissuration du béton de fibres (BFPP), d'une force ultime de **7071.08 N** correspondant à un déplacement de **0.0.108 mm**. Une phase de chute brutale $F = 3014.57 \text{ N}$ correspondant à un déplacement de **0.140 mm**

➤ Béton renforcé de fibres métalliques à 20°C, 200°C et 450°C

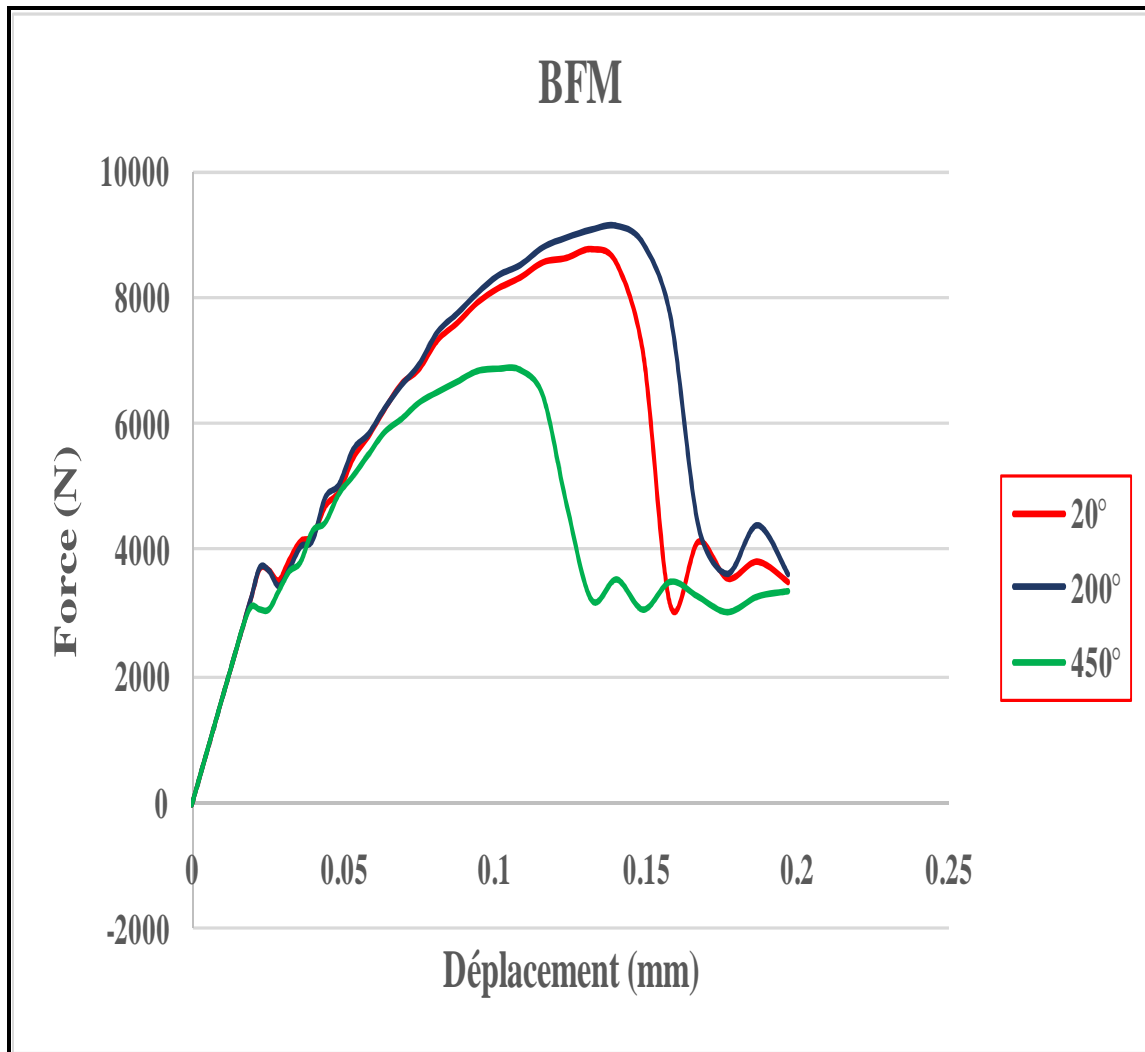


Figure V. 6 : Courbe force – déplacement du béton renforcé de fibres métalliques.

L'allure de la courbe force – déformation du béton de fibres métalliques à 20°C , 200°C et 450°C ne diffère pas significativement de celle du béton des fibres de polypropylène.

- Béton renforcé de fibres de polypropylène et métalliques à 20°C, 200°C et 450°C

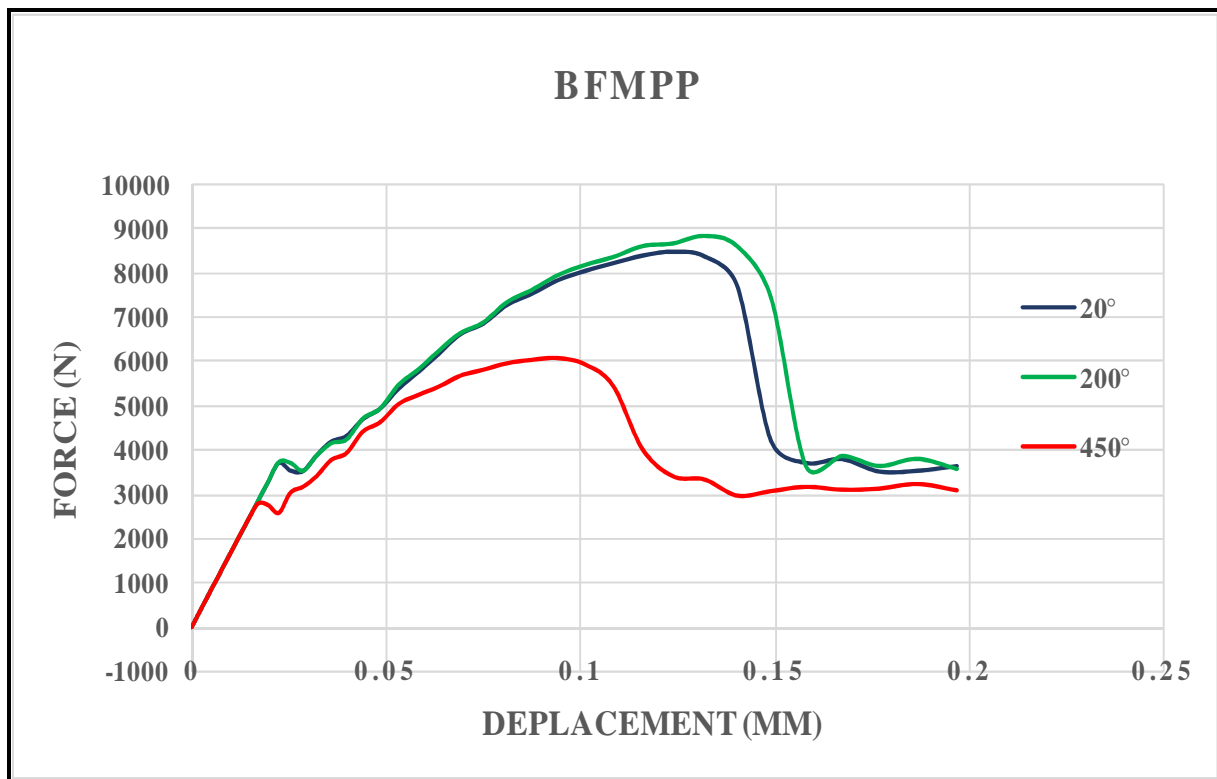


Figure V. 7 : Courbe force – déplacement du béton renforcé de fibres de polypropylène et fibres métalliques.

On constate que pour le béton cocktail (BFMPP) (association de fibres métalliques – polypropylène), la résistance à l’effort appliqué du béton soumis à 200°C est du même ordre que celle du béton à 20°C, cela s’explique par l’apport en terme de résistance des fibres dans le béton, permettant de ralentir la propagation des fissures, offrant ainsi une certaine amélioration du comportement du béton en traction. A 450°C, la résistance à la traction par flexion diminue par rapport aux bétons soumis à la température de 20°C et 200°C ceci est confirmé par les résultats expérimentaux.

V.4.1.2. Evolution des dommages de chaque type de béton

➤ Béton témoin

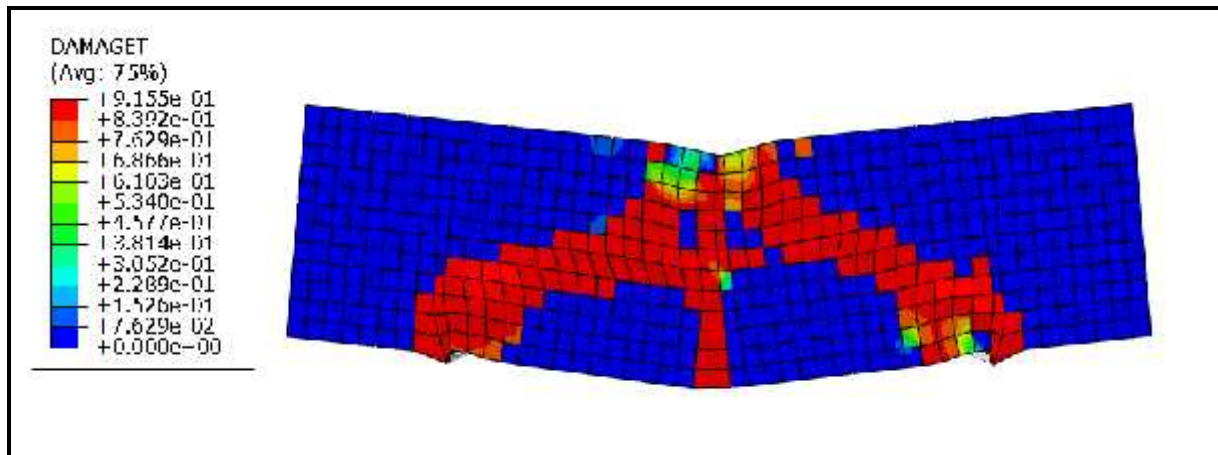


Figure V. 8 : Evolution des dommages du béton témoin à 20°C.

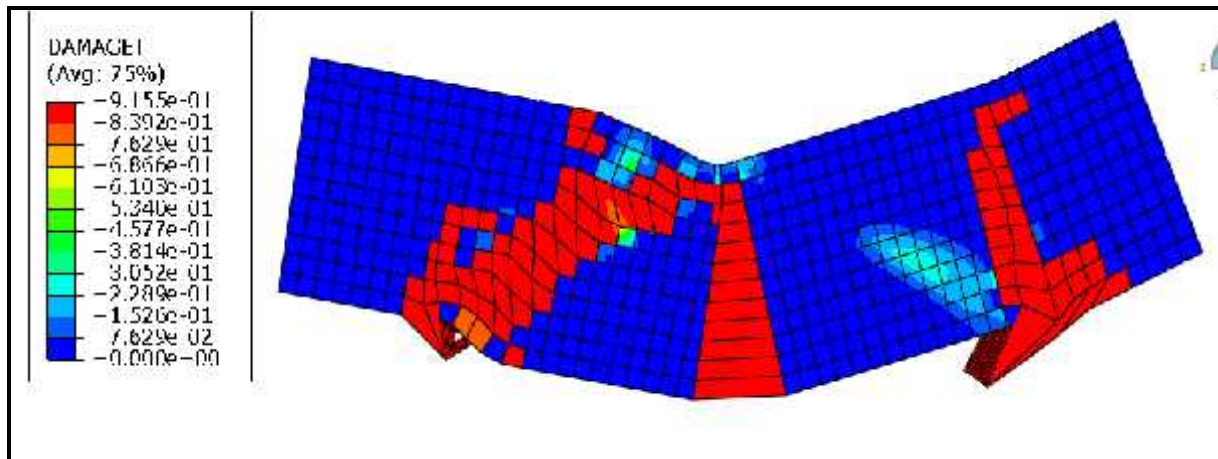


Figure V. 9 : Evolution des dommages du béton témoin à 200°C.

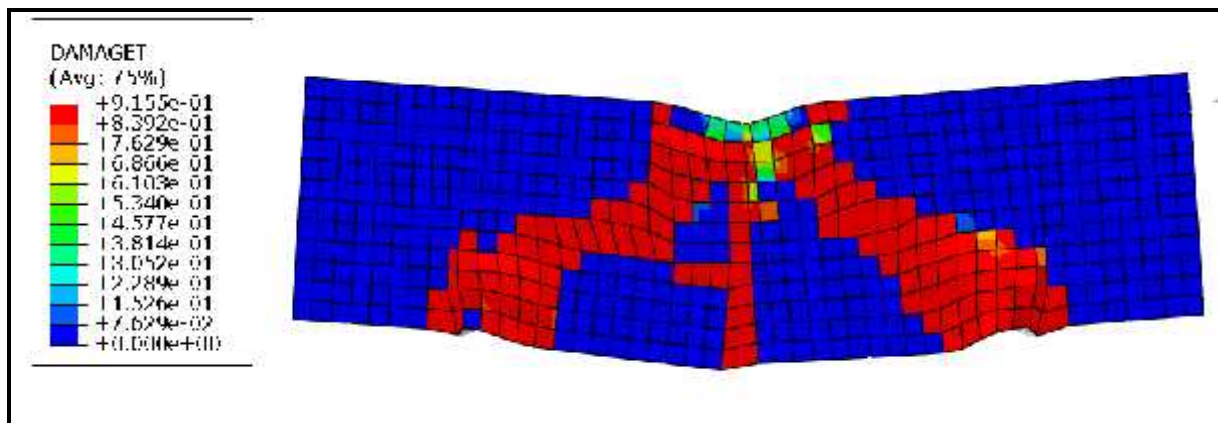


Figure V. 10 : Evolution des dommages du béton témoin à 450°C.

➤ Béton de fibres de polypropylène

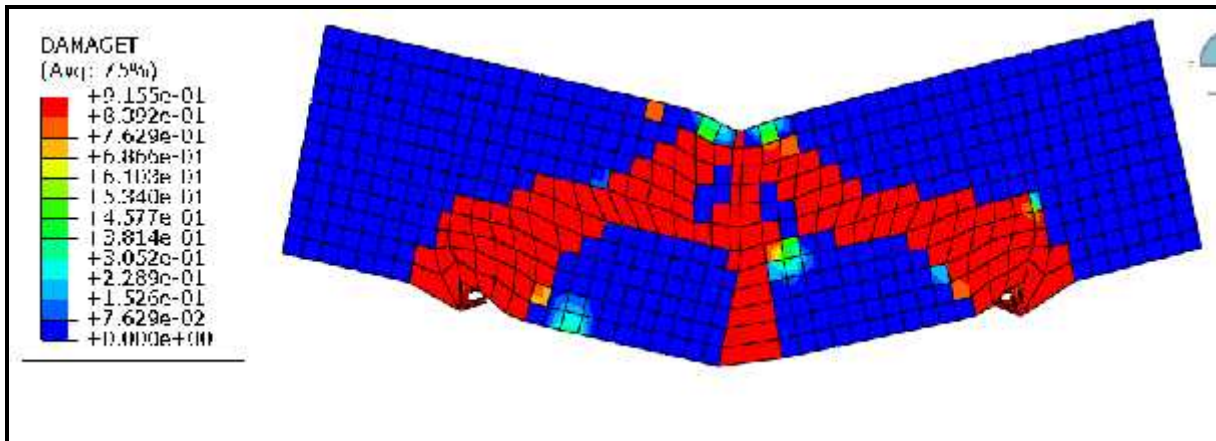


Figure V. 11 : Evolution des dommages du béton de fibres de polypropylène à 20°C.

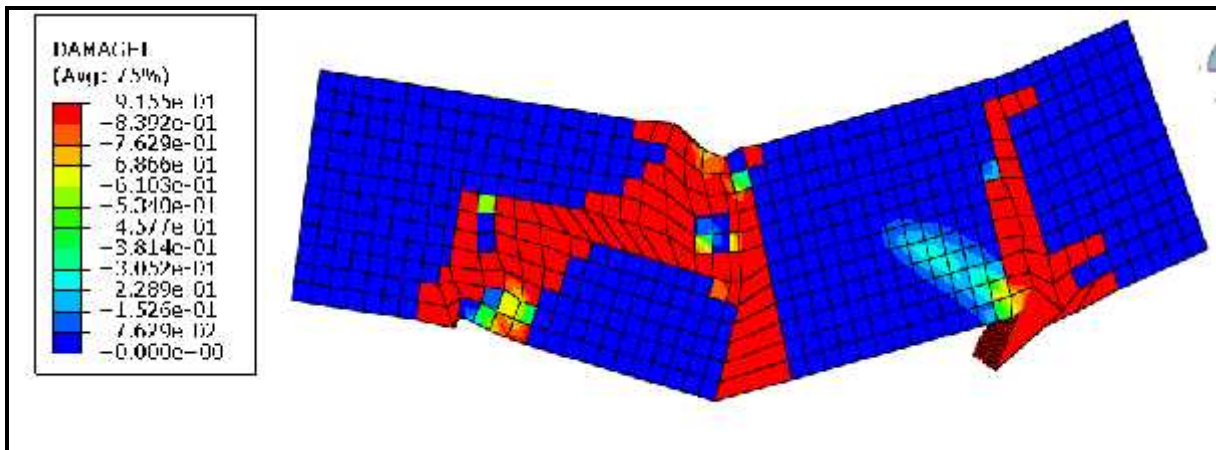


Figure V. 12 : Evolution des dommages du béton de fibres de polypropylène à 200°C.

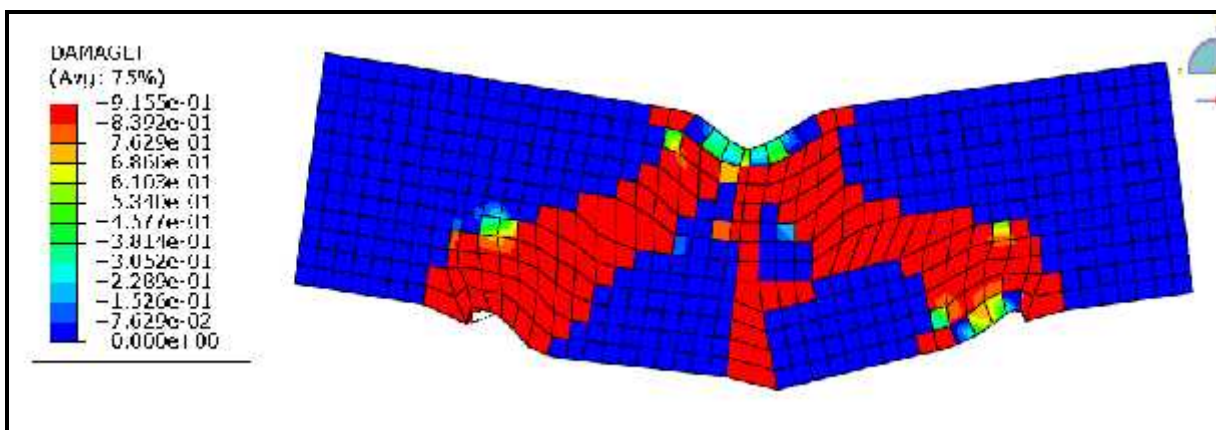


Figure V. 13 : Evolution des dommages du béton de fibres de polypropylène à 450°C.

➤ Béton de fibres métalliques

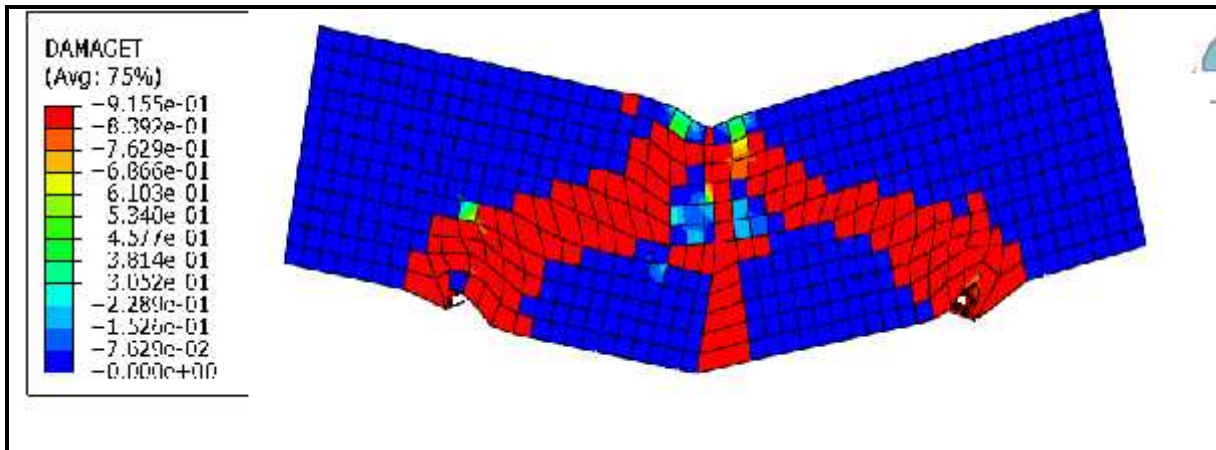


Figure V. 14 : Evolution des dommages du béton de fibres métalliques à 20°C.

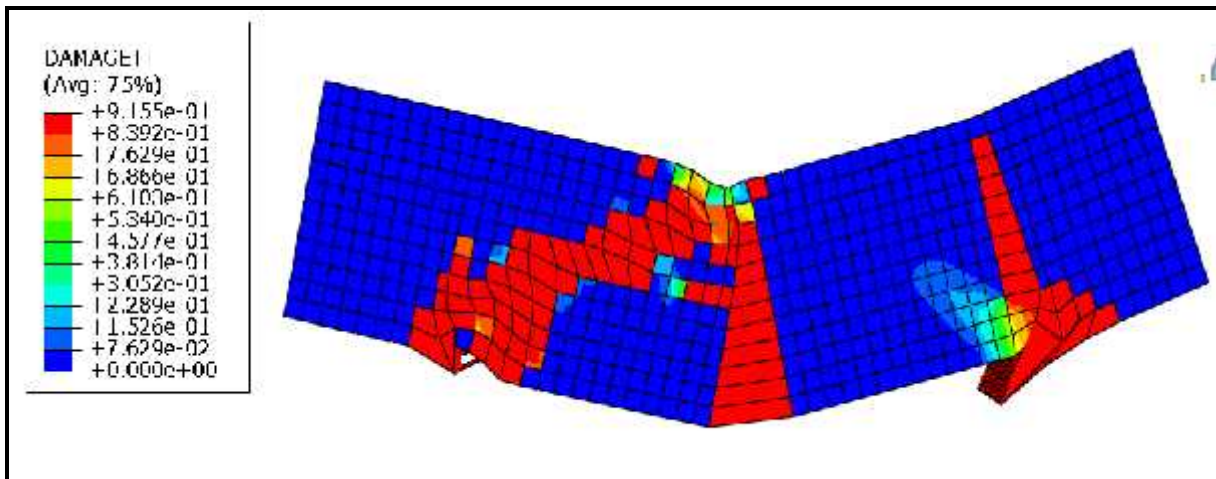


Figure V. 15 : Evolution des dommages du béton de fibres métalliques à 200°C.

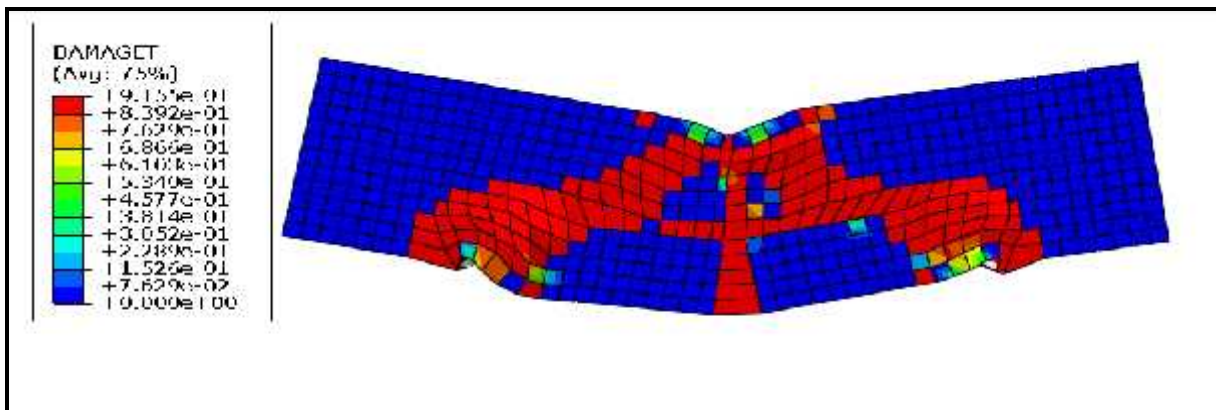


Figure V. 16 : Evolution des dommages du béton de fibres métalliques à 450°C.

➤ Béton de fibres cocktail (polypropylène et métalliques)

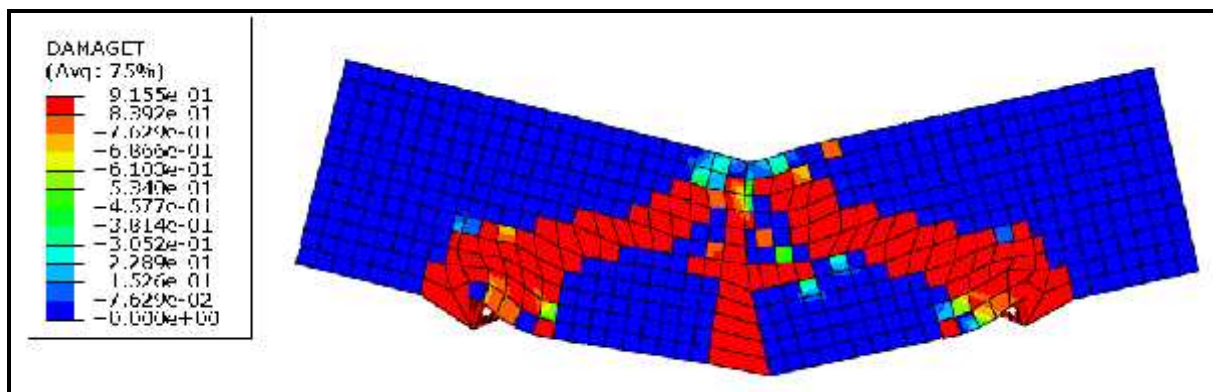


Figure V. 17 : Evolution des dommages du béton de fibres cocktail à 20°C.

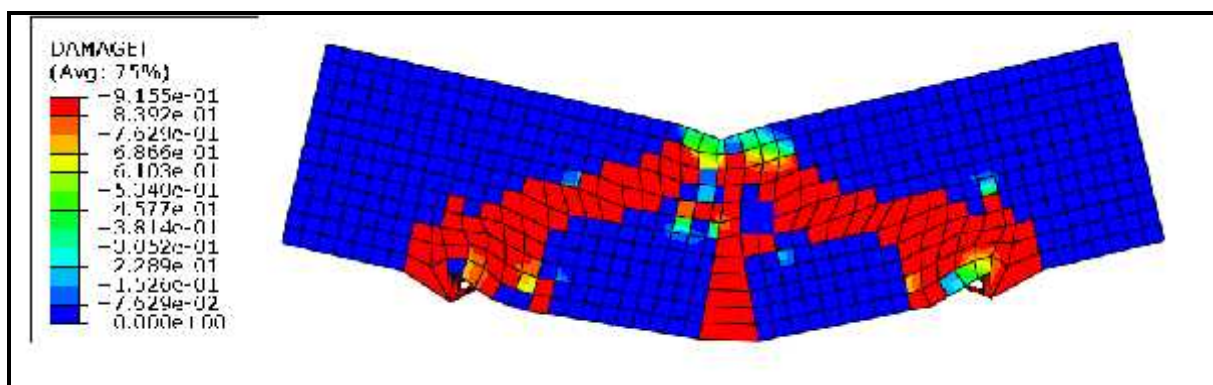


Figure V. 18 : Evolution des dommages du béton de fibres cocktail à 200°C.

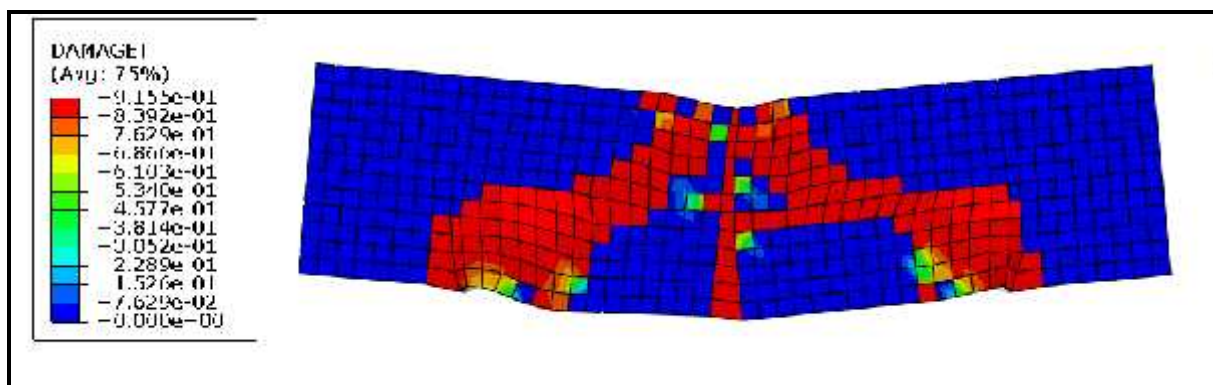


Figure V. 19 : Evolution des dommages du béton de fibres cocktail à 450°C.

Le béton témoin connaît un endommagement plus important qui se propage sur la zone tendue comparé aux éprouvettes renforcées de fibres. Nous constatons que les éprouvettes en béton renforcées par des fibres de polypropylène et métalliques sont accompagnées par une diminution des dommages, ceci explique l'augmentation du rapport de résistance des poutres. Les variables de l'endommagement en traction prennent des valeurs allant de 0 (les éprouvettes sont dans un état non fissuré) jusqu'à 9,155 (la rupture finale de l'élément). Selon la courbe de la variation des dommages en fonction de la force.

V.4.2. Effet de la température sur les différents bétons

V.4.2.1. Courbes force-déplacement des différents bétons

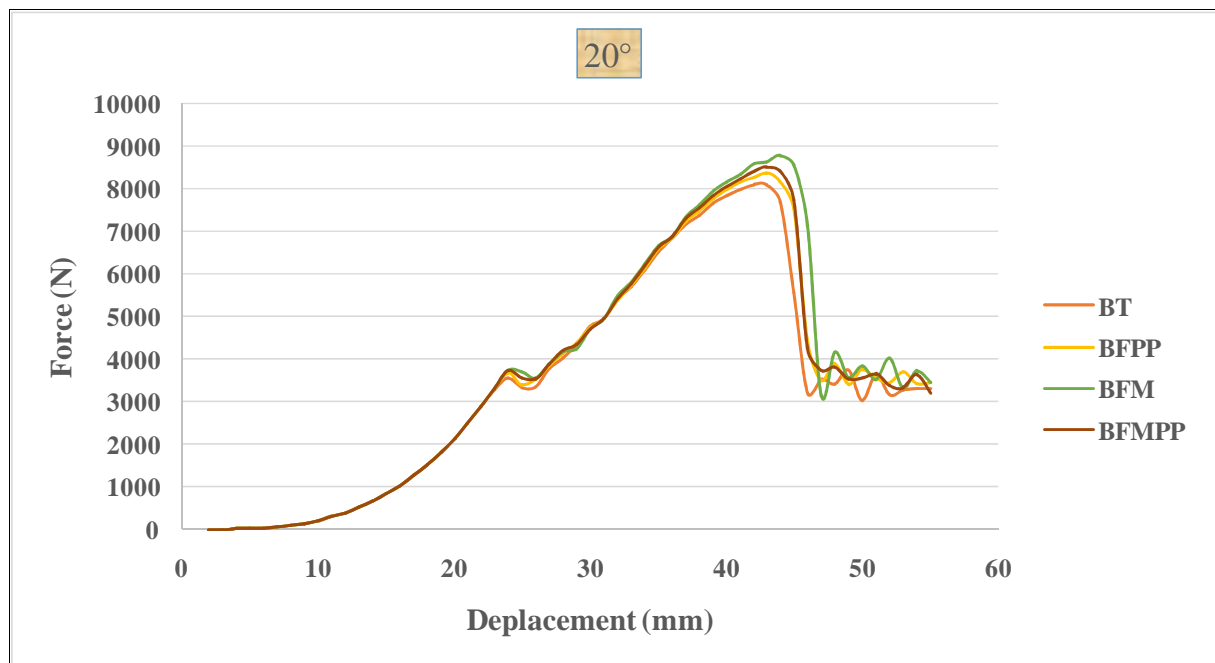


Figure V. 20 : Confrontation des courbes force – déplacement des différents bétons à 20°C.

On constate que pour le béton de fibres (BFPP, BFM, BFMPP) la capacité de résistance à l'efforts appliquée est largement supérieure à celle du béton témoin (sans fibres), cela s'explique par la présence des fibres dans le béton qui permettent de ralentir la propagation des fissures en retenant les deux blocs de béton fissuré, offrant ainsi une amélioration du comportement du béton en traction à la température 20°C.

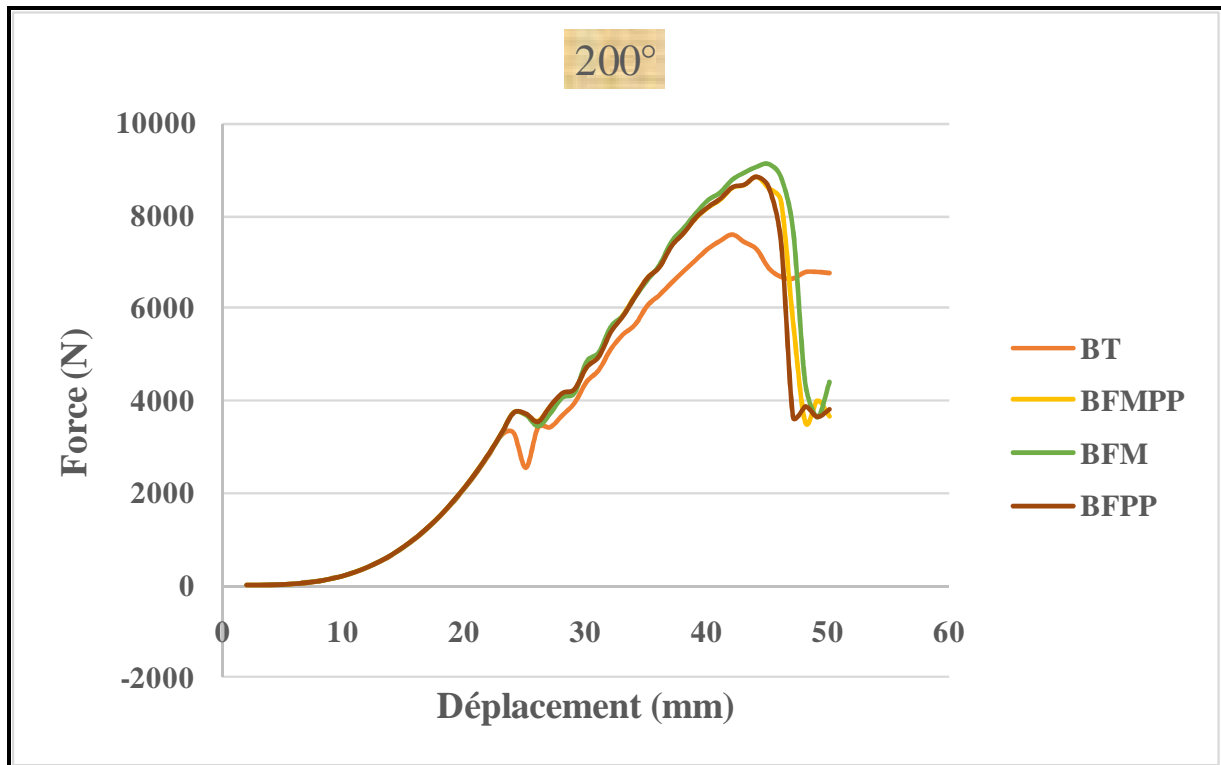


Figure V. 21 : Confrontation des courbes force – déplacement des différents bétons à 200°C.

Le même comportement est observé dans la figure V.20, si on analyse le comportement des bétons de fibres par rapport au béton témoin. On remarque une augmentation de la résistance pour BFPP, BFM et BFMPP par rapport au béton témoin. La courbe de béton de fibres métalliques (BFM) présente la résistance maximale, c'est la meilleure résistance de tous les bétons.

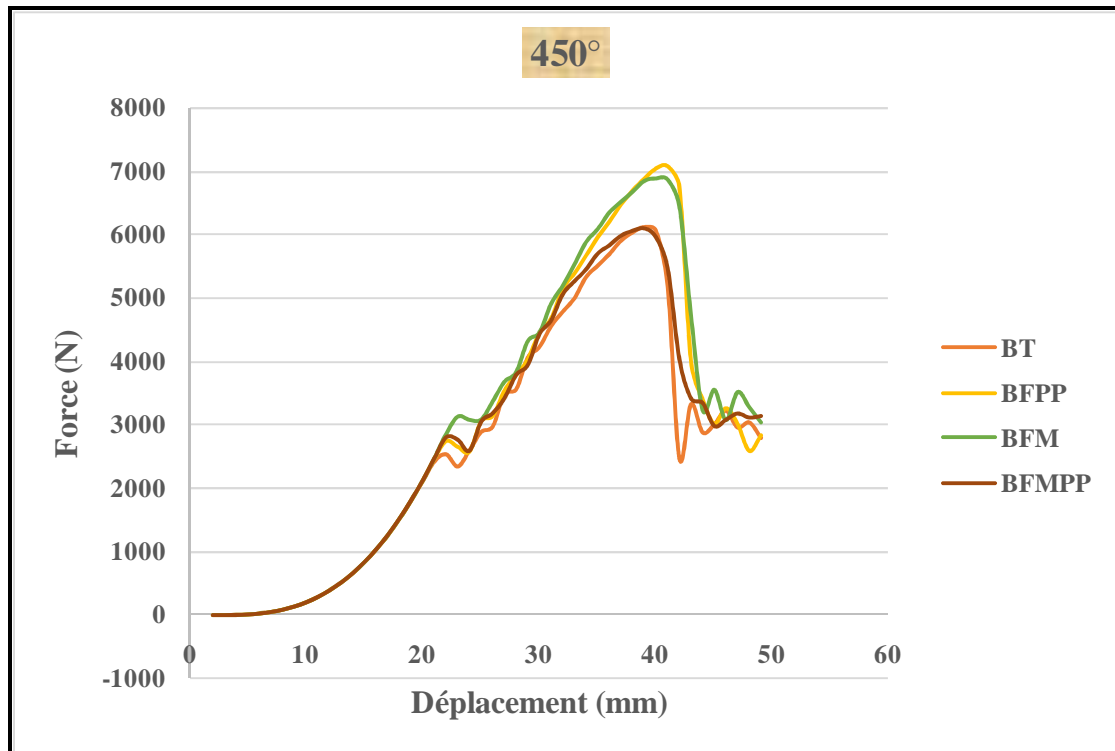


Figure V. 22 : Confrontation des courbes force – déplacement des différents bétons à 450°C.

Le béton (BFMPP) a une résistances à la traction par flexion égale à celle du béton témoin. La résistance du béton à fibres de polypropylène (BFPP) est supérieure à celles des autres bétons et il présente un comportement post pic meilleur. La dégradation des courbes des bétons de fibres sont supérieures par rapport à celle du béton témoin.

V.4.2.2. Cartographie des dommages pour les différents bétons

➤ Différents bétons à 20°C

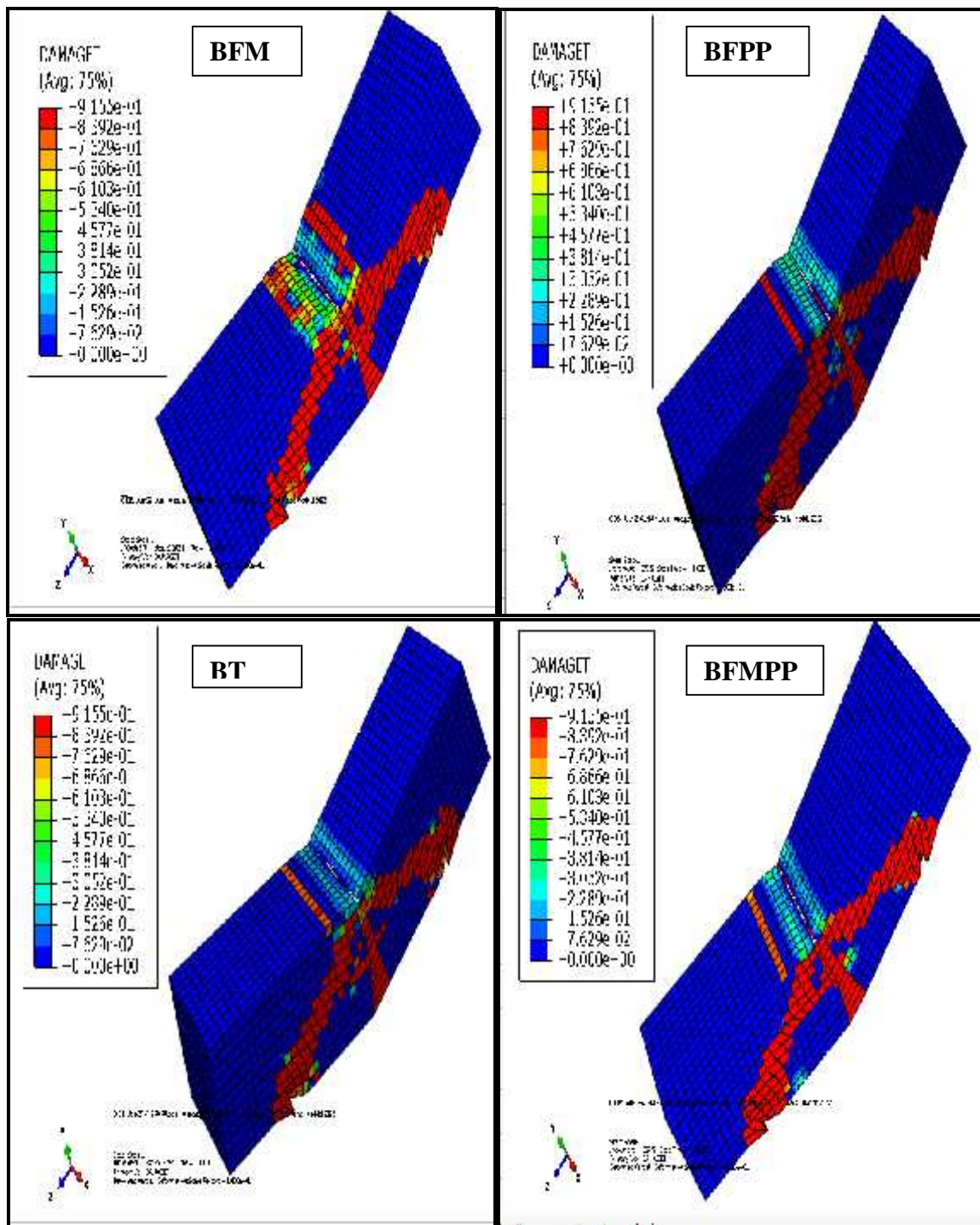


Figure V. 23 : Evolution des dommages des différents bétons à 20°C.

➤ Différents bétons à 200°C

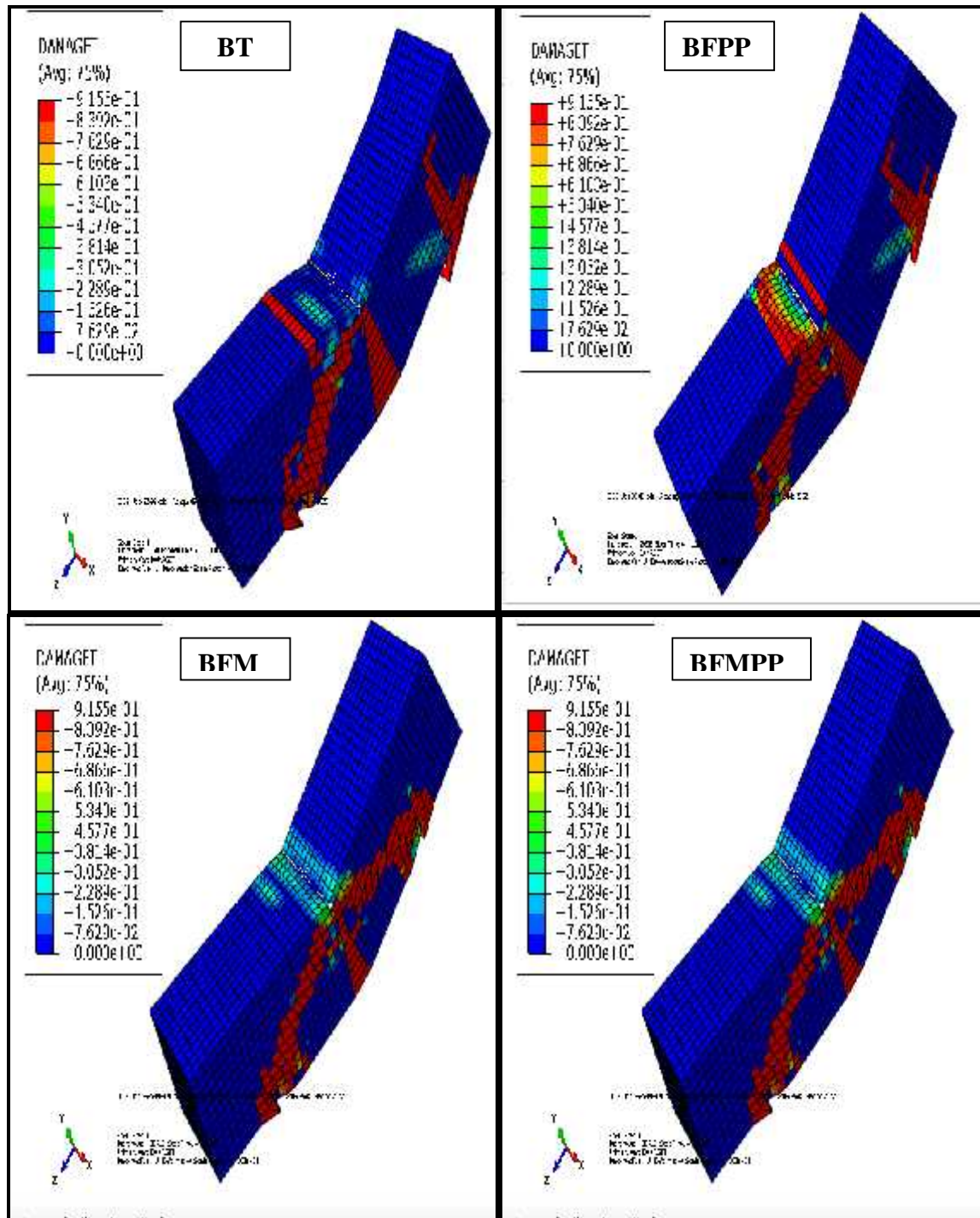


Figure V. 24 : Evolution des dommages des différents bétons à 200°C.

➤ Différents bétons à 450°C

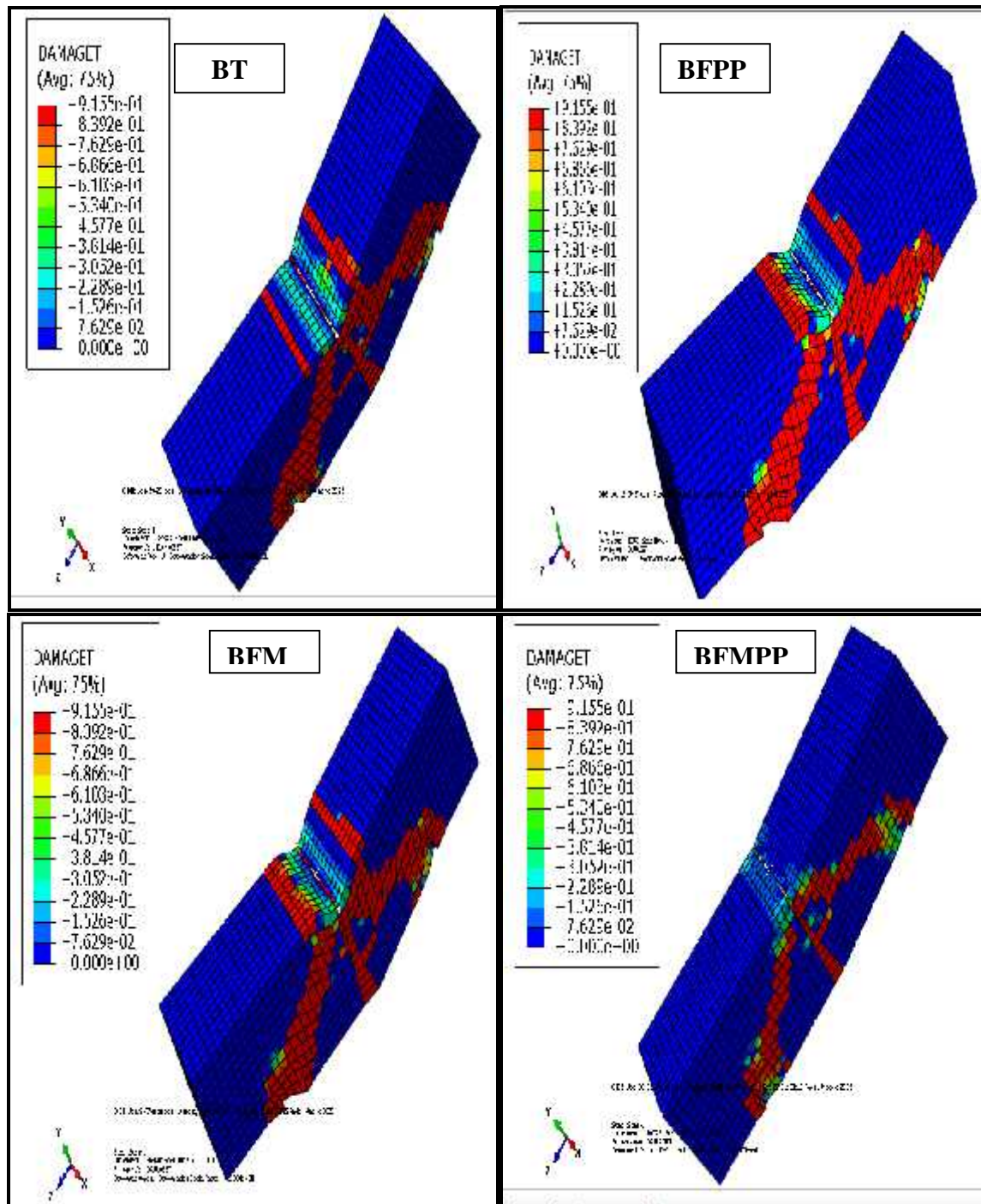


Figure V. 25 : Evolution des dommages des différents bétons à 450°C.

L'analyse des figures (23, 24, 25) montrent que les dommages pour le modèle renforcé sont retardés par rapport au modèle de référence (béton témoin).

V.4.2.3. Cartographie des déplacements pour les différents bétons

➤ Différents bétons à 20°C

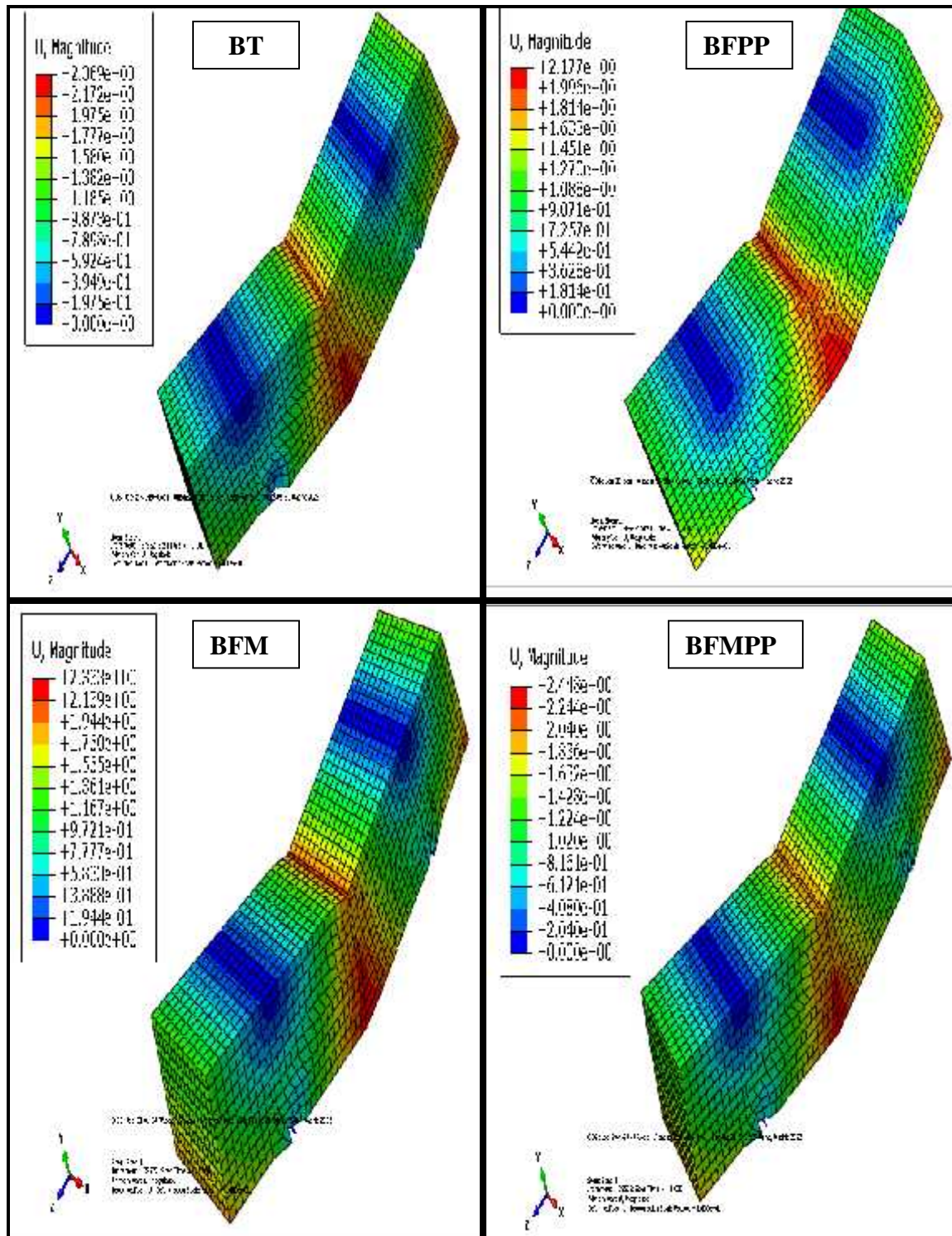


Figure V. 26 : Evolution des déplacements des différents bétons à 20°C.

➤ Différents bétons à 200°C

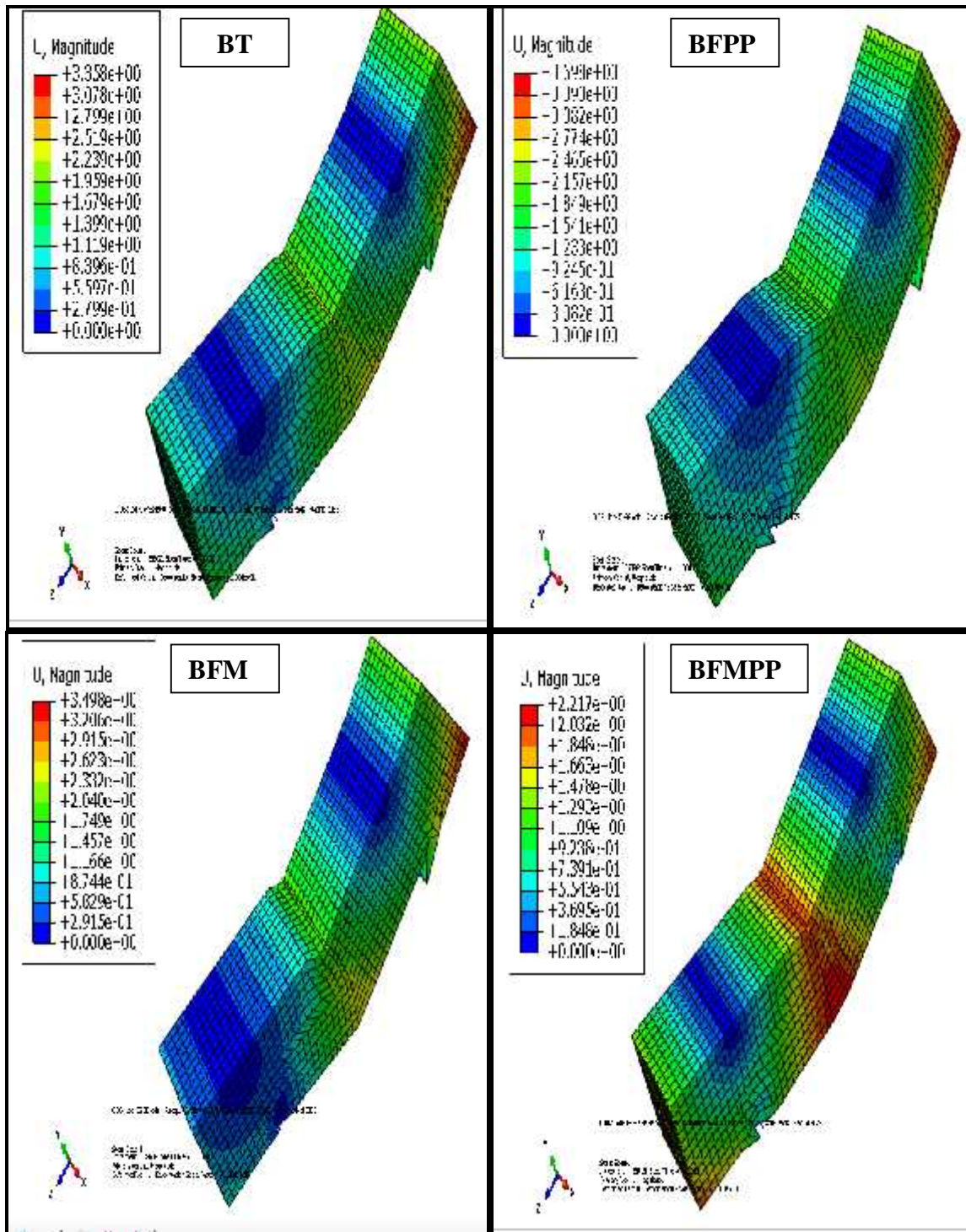


Figure V. 27 : Evolution des déplacements des différents bétons à 200°C.

➤ Différents bétons à 450°C

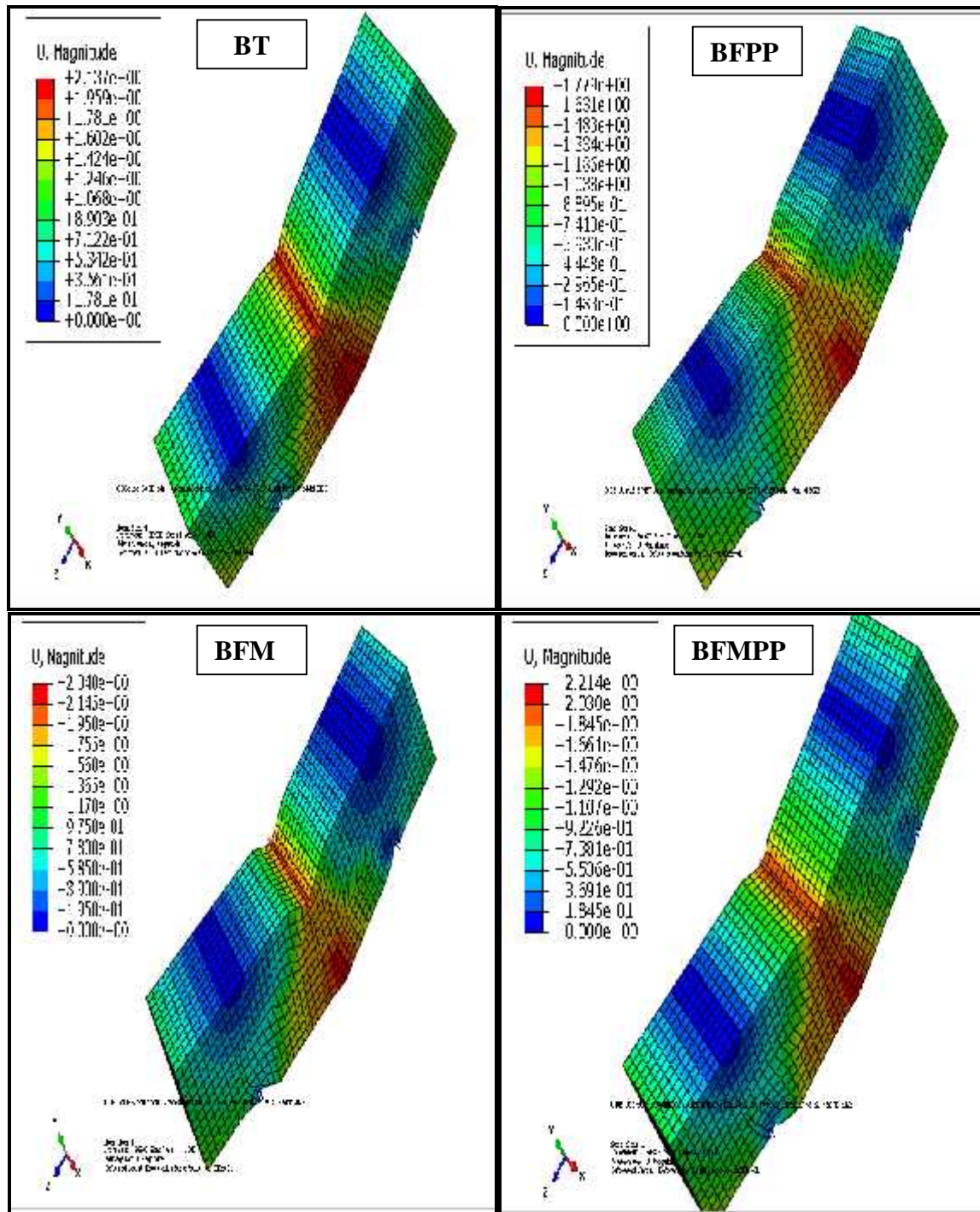


Figure V. 28 : Evolution des déplacements des différents bétons à 450°C.

L'analyse des figures (V.25), (V.26), (V.27) montre qu'il est évident que le modèle renforcé soit plus résistant, cependant, une amélioration en terme de déplacement est remarquée.

V.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats obtenus à l'issue des simulations numériques menées sur le comportement mécanique relatifs aux béton témoin et béton de fibres (polypropylène et métalliques) aux températures de 20°C , 200°C et 450°C.

III.1. Introduction

Cette partie est consacrée à une recherche sur les travaux antérieurs déjà réalisés sur le comportement du béton porté à une température élevée. Cette analyse portera d'une part, sur les mécanismes de l'instabilité thermique du béton avec les paramètres pouvant influencer cette dernière ; d'autre part, sur les différentes transformations physiques et chimiques, les performances mécaniques, les phénomènes de transfert de chaleur et de masse du béton lorsqu'il est soumis à des sollicitations.

Lors du chauffage, les différents constituants du béton subissent diverses transformations ayant un impact sur les propriétés du béton. Les phénomènes observés sont le retrait de dessiccation, la dilatation thermique, le fluage et des transformations minéralogiques. Dans cette partie, nous présenterons en premier lieu les différentes formes d'endommagement thermique avec les mécanismes et paramètres pouvant être à l'origine de ce phénomène. Ensuite, on présentera l'étude sur les modifications de la matrice cimentaire et des granulats ainsi que l'évolution des propriétés mécaniques du béton à température élevée.

III.2. Différentes formes d'endommagement thermique

Les incendies d'ouvrages en béton ont mis en avant l'impact des températures élevées sur l'endommagement du béton. Les effets de la température élevée sur les propriétés du béton ont été rapportés dès les années 1940. Les différents exemples d'incendie d'ouvrages (Tour Windsor, Madrid, 2005) et de tunnels (Tunnel Sous la Manche, 1996-2008; Tunnel Mont Blanc, 1999; Tunnel Gothard, 2001; Howard Street Tunnel, 2001; Tunnel Fréjus, 2005 ; les incendies de la Kabylie, 2021) montrent d'importantes dégradations caractérisées par un détachement de matière, une perte de résistance mécanique voire la mise hors service de l'ouvrage. La figure III.1 illustre quelques dégradations d'ouvrages en béton à la suite d'incendie.



Figure III.1 : Illustrations de dégradations d'ouvrages en béton à la suite d'une sollicitation thermique [50-51].

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

Plusieurs paramètres et phénomènes peuvent influencer l'éclatement du béton porté à haute température.

III.2.1.1. La présence d'eau dans le béton

L'eau dans le béton joue un rôle important dans l'instabilité thermique. Elle est à l'origine de la formation de pressions internes qui sont considérées comme une des sources du phénomène d'éclatement.

Les travaux menés par Hager [52] sur la détermination de la pression de vapeur dans un BHP séché à 105°C ($w = 0\%$), partiellement séché à 80°C ($w = 0.38\%$) et non séché ($w = 3.1\%$) montrent une variation de la pression de vapeur en fonction de la teneur en eau libre (w) dans le matériau. Le béton séché présente une faible pression de vapeur de 0.26 MPa tandis-que pour le béton non séché une forte pression est obtenue de 4MPa.

Les auteurs suivants **Harmathy** [53], **Hertz** [54], **Noumowé** [55] considèrent qu'une teneur en eau massique inférieure à 3 – 4 % limiterait le risque d'éclatement.

Toutefois des instabilités thermiques ont été observées sur des éprouvettes de bétons avec une teneur en eau libre bien inférieure à 3% [56], il a été observé que l'éclatement n'apparait pas si le matériau est sec, même en présence d'un fort gradient thermique (Harmathy et al. repris par Hertz [54]).

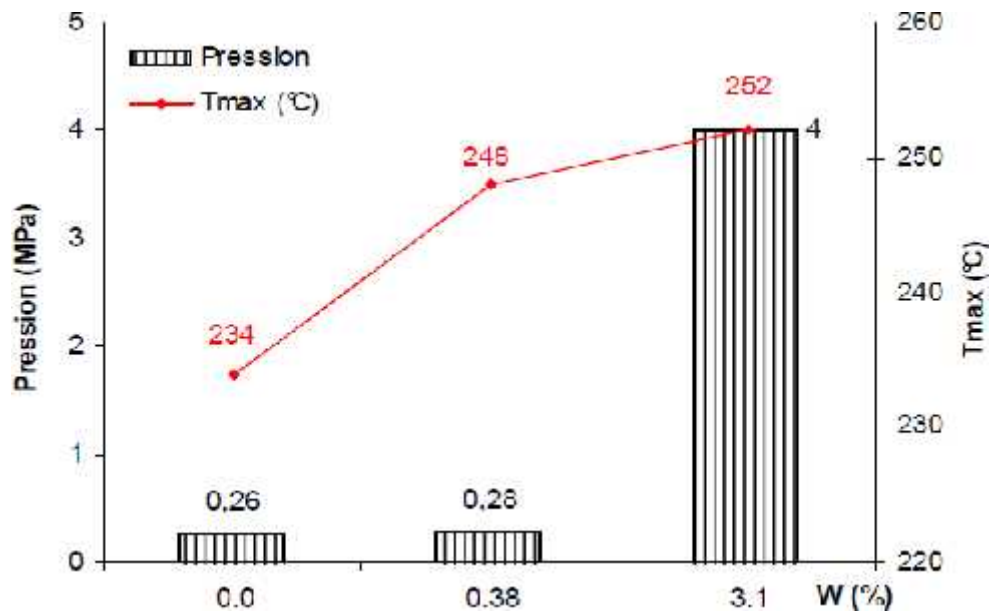


Figure III.2 : Pressions internes dans le béton en fonction de la teneur en eau libre et températures d'apparition des pics de pression [52].

III.2.1.2. Les propriétés physico-mécaniques du matériau

Le béton caractérisé par un faible rapport eau/liant est plus sensible à l'instabilité thermique que le béton dont le rapport est élevé. La structure dense, la faible porosité et la faible perméabilité caractérisant les bétons à hautes performances, rendent difficile le transfert des fluides ce qui pourrait entraîner une augmentation de pressions internes lors de la montée en température.

III.2.1.3. La vitesse de chauffage

C'est un facteur qui influe beaucoup sur la stabilité thermique du béton. Plus la vitesse de chauffage est importante, plus le risque d'éclatement est élevé. Les essais de caractérisation effectués par [57] sur des éprouvettes de béton soumises à des cycles de chauffage-refroidissement à la vitesse de $1^{\circ}\text{C}\cdot\text{mn}^{-1}$ conduisent à des éclatements d'éprouvettes tandis que celles soumises à la vitesse de chauffage de $0,1^{\circ}\text{C}\cdot\text{mn}^{-1}$ n'éclatent pas. La faible vitesse de montée en température limite la formation de la zone saturée et

réduit le gradient de température. L'échauffement rapide de la surface du béton engendre de forts gradients thermiques (contraintes thermiques). Le gradient thermique engendre des contraintes de compression et de traction pouvant entraîner l'écaillage du béton.

III.2.1.4. La nature des granulats

Selon leur nature chimique et minéralogique, le comportement des granulats diffère lorsqu'ils sont soumis à une montée en température. Le coefficient de dilatation des granulats siliceux est plus élevé que celui des granulats calcaires ce qui permet aux granulats calcaires d'avoir une meilleure stabilité thermique ([58], [59]). Les essais de chauffage jusqu'à 200°C de granulats silico-calcaires réalisés par Mindégua [59] montrent un clivage violent des granulats de silex pour une gamme de température de 110°C à 165°C. La figure III.3 illustre l'instabilité thermique des granulats de silex comparée aux granulats calcaires à la suite d'un cycle thermique à 200°C.

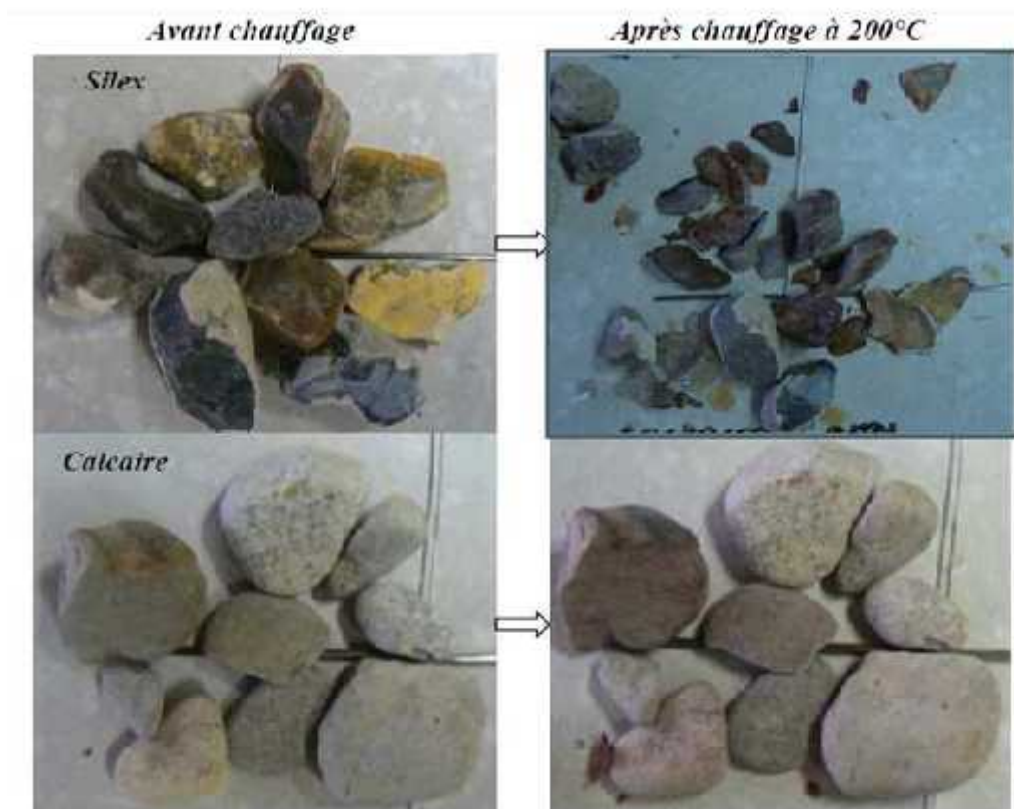


Figure III.3 : Illustration du caractère instable des granulats de silex comparés aux granulats calcaires [59].

III.2.2. Déformation thermique du béton

Avant l'étude de la déformation thermique du béton, nous distinguons dans un premier temps la déformation thermique de la pâte de ciment durcie de celle des granulats. Les travaux de recherche sur la déformation thermique de la pâte de ciment montrent que celle-ci se décompose en deux phases : la phase d'expansion et la phase de retrait. Les travaux expérimentaux des auteurs comme Hager [52] ont montré que la pâte de ciment se dilate dans la plage de température allant jusqu'à 150°C. La vitesse de chauffage influence le changement de signe de la déformation thermique, 1956]. Le coefficient de dilatation thermique est très influencé par l'humidité relative de la pâte de ciment.

Les granulats ont un comportement différent de celui de la pâte de ciment. L'expansion thermique des granulats dépend de la nature minéralogique des roches notamment de leur teneur en silice. Le coefficient de dilatation thermique des granulats est fonction aussi de leur teneur en eau et de la cristallinité des minéraux [60]. Les granulats calcaires ont des déformations thermiques plus faibles que les granulats de nature siliceuse.

Le coefficient thermique moyen des roches calcaires est de l'ordre de $5.5 - 11.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ et celui des roches à forte teneur en silice est $9 - 10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ pour des températures comprises entre 20°C et 100°C.

Le béton étant constitué majoritairement de granulats, sa déformation thermique dépend surtout de la nature des granulats. La figure III.4 illustre les travaux de Piasta [61] sur une étude comparée de déformation thermique de la pâte de ciment à celle du béton contenant des granulats d'origines diverses. La déformation du béton est fortement liée à la nature des granulats qui constituent son squelette. La dilatation du béton est caractérisée par une expansion volumique non linéairement dépendante de la température. Pour une température supérieure à 150°C, la pâte de ciment s'oppose à cette dilatation et se rétracte. Au-delà de 600°C, une faible ou un arrêt de dilatation et un léger retrait s'observent dans le comportement du béton, toujours selon la nature minéralogique des granulats.

L'évolution opposée des granulats et de la pâte de ciment génère à l'interface pâte-granulats des incompatibilités de déformations qui engendrent des contraintes de traction au sein de la pâte de ciment et des contraintes de compression au niveau des granulats.

Le comportement opposé granulats - pâte de ciment pourrait donc engendrer des microfissurations dans le matériau.

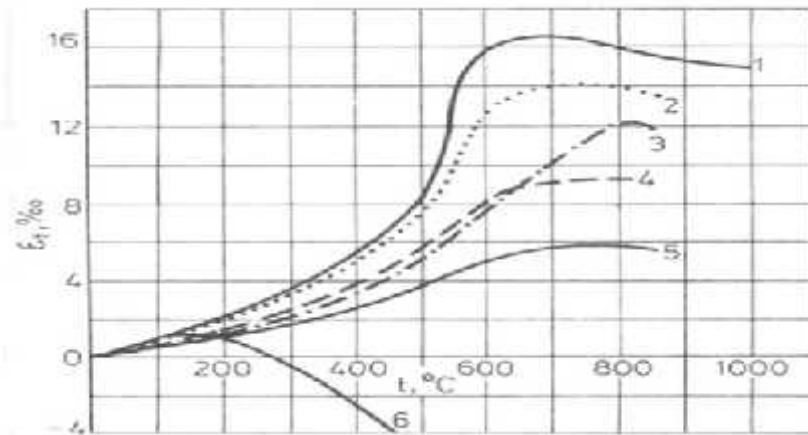


Figure III.4 : Déformations thermiques de bétons avec différents types de granulats (1: Siliceux, 2: Grès, 3: Calcaire, 4: Basalte, 5: Argiles expansées, 6: Pâte de ciment), [61].

III.3. Evolution des propriétés mécaniques

Lors de la montée en température, le béton subit des transformations physicochimiques. La modification de la microstructure du béton influence donc ses propriétés mécaniques. Dans cette partie, nous avons présenté les études faites sur l'évolution des propriétés mécaniques à chaud ou après refroidissement (propriétés résiduelles) en fonction de la température. Les caractéristiques mécaniques considérées sont la résistance en compression, la résistance en traction et le module d'élasticité.

III.3.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression est une des propriétés les plus importantes pour caractériser un béton. Elle baisse globalement avec l'élévation de la température.

Hager [52] a réalisé des essais de compression à chaud sur des bétons de différentes formulations (rapports E/C de 0,3, 0,4 et 0,5). L'analyse de la courbe d'évolution (Figure III.5) de la résistance à chaud en fonction de la température lui permet de regrouper cette évolution en trois phases. La première phase, allant de la température ambiante à 100°C, est caractérisée par une diminution de la compression relative de 20 à 30%. La seconde phase, entre 100°C et 250°C, est marquée par une augmentation de résistance par rapport à la température 100°C.

Les BHP ne présentent cette augmentation qu'à 400°C. Cette augmentation dite retardée comme l'ont aussi remarquée Castillo [74], Pimenta [75], Kanéma [66], peut s'expliquer par la faible perméabilité de ces bétons compacts. Le départ de l'eau est donc ralenti. La dernière

phase, au-delà de la température 400°C pour le BHP et 250°C pour les autres bétons, souligne une diminution de résistance de façon monotone.

Les premières fissures liées à la déformation différentielle entre les granulats et la pâte sont observées.

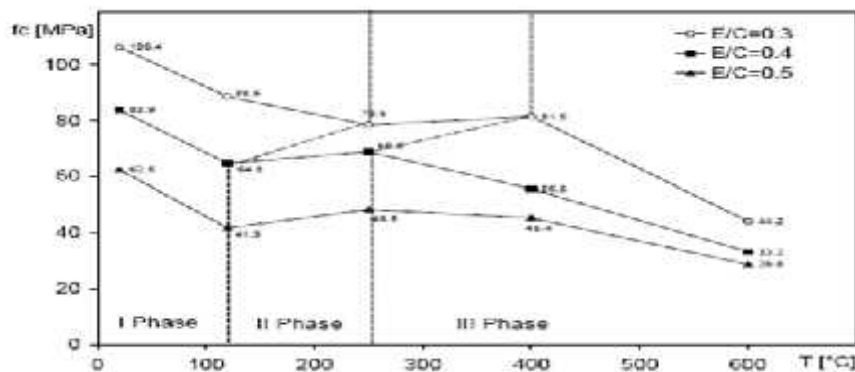


Figure III.5 : Résistances en compression à chaud de bétons à différentes températures [52].

Les essais de compression résiduelle montrent aussi un comportement similaire du béton. D'autres auteurs comme Diederichs [62], Phan [63], 2004], regroupent l'évolution de la résistance en compression en fonction de la température en deux domaines. Le premier domaine, de la température ambiante à 250°C – 400°C. Il est caractérisé par une légère baisse, un maintien ou une augmentation de résistance. Le second domaine, de la limite intermédiaire à la température 600°C, marque la baisse continue de la résistance en compression. Les essais, tant à chaud ou après refroidissement, montrent une baisse de la résistance en compression entre les températures 100°C et 200°C. La rupture à la compression étant liée au dépassement des contraintes de cisaillement, l'affaiblissement des liaisons entre les hydrates peut provoquer l'apparition de micro-défauts facilitant le glissement. Entre les températures 250°C et 350°C (voire 400°C), un gain de résistance en compression s'observe. Le départ de l'eau du matériau peut entraîner une ré-augmentation des forces de liaison entre les hydrates avec un accroissement des énergies de surface [65]. Ces différents phénomènes peuvent entraîner une augmentation de la résistance en compression. Au-delà de la température 350°C (400°C), la résistance baisse de façon monotone.

Nous regroupons dans le tableau III.1 les différentes hypothèses émises sur les phénomènes observés lors de l'étude de la résistance en compression du béton en fonction de la température.

Tableau III.1 : Hypothèses sur l'évolution de la résistance en compression en fonction de la température [65].

Température	Effet sur la résistance En compression	Hypothèses concernant l'explication du phénomène
20°C - 200°C	Diminution	<ul style="list-style-type: none"> - dilatation thermique de l'eau, - réduction des forces de liaison entre les couches de C-S-H, - réduction de l'énergie de surface entre surfaces, - développement éventuel de groupes silanols (Si-OH-HO-Si), - pressions de vapeur d'eau créant des contraintes internes non négligeables exercées sur le squelette.
200°C - 350°C (400°C)	Augmentation	<ul style="list-style-type: none"> - départ de l'eau, - hydratation supplémentaire de la matrice cimentaire, - accroissement des forces de liaison entre les gels C-S-H, - accroissement de l'énergie de surface
> 350°C (400°C)	Diminution	<ul style="list-style-type: none"> - déshydratation du gel C-S-H, - deshydroxylation de la portlandite, - décomposition du carbonate de calcium, - clivage des granulats, - endommagement par fissuration causée par la dilation différentielle thermique entre les granulats et la pâte.

III.3.2. Résistance à la traction

Dans la littérature, il existe peu de résultats relatifs à l'évolution de la résistance à la traction en fonction de la température. La détermination de cette propriété est primordiale du fait que le dépassement de la résistance à la traction du béton est liée à son instabilité thermique .

La plupart des observations sur la résistance en traction porte sur des essais après refroidissement. Kanéma [66] a réalisé des essais de traction par fendage sur cinq formulations de bétons B325 - B350 – B400 – B450 – B500. Les paramètres ayant fait l'objet de cette étude sont l'influence du rapport E/C, la vitesse de chauffage, la durée du palier de température ainsi que l'âge du béton. Les éprouvettes cylindriques de section 11x22 cm ont été soumises à différents cycles de chauffage-refroidissement. La figure III.6 illustre

l'évolution de la résistance résiduelle en traction en fonction du cycle de chauffage-refroidissement pour une vitesse de montée en température de $1^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$ avec un palier de température d'une durée d'une heure. L'intensité de la résistance résiduelle en traction baisse pour toutes les compositions de bétons et elle dépend du rapport E/C. Les bétons à faible rapport E/C (B450 – B500) présentent une baisse plus significative de leur résistance que les bétons à E/C élevé (B325 – B350) dès la température 150°C . Les travaux de Min Li [67] montrent également la baisse plus rapide de la résistance résiduelle en traction par fendage des pâtes à hautes performances que celle des pâtes ordinaires dans la plage de température comprise entre 200°C et 400°C .

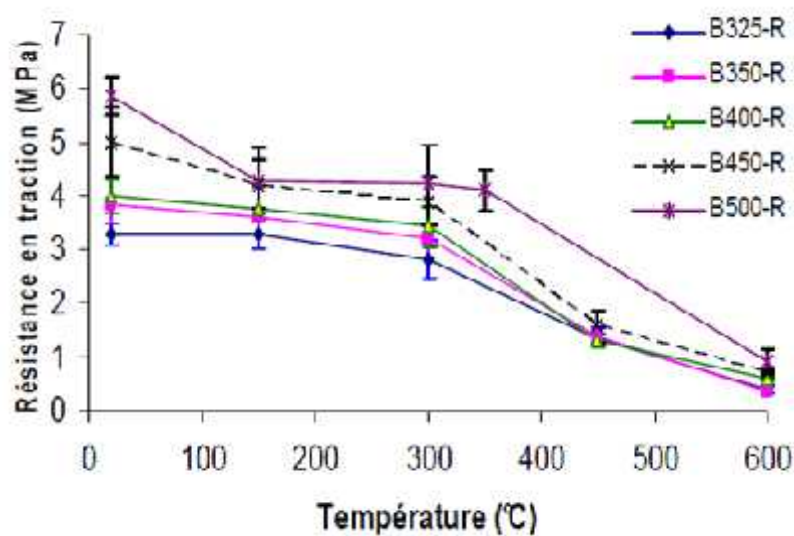


Figure III.6 : Résistances résiduelles en traction en fonction de la température de chauffage [66].

L'étude de l'influence de la vitesse de chauffage sur l'évolution de la résistance résiduelle en traction des bétons B325 et B500 pour une même durée de palier, montre une résistance plus faible des bétons B325 ($E/C = 0.62$) à la suite du traitement thermique à la vitesse de $0.1^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$ par rapport à la vitesse de $1^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$. Quant aux bétons B500 ($E/C = 0.29$), le changement de vitesse influe peu sur les résultats de la résistance en traction [66]. Cela semble être lié à la quantité d'eau présente dans le béton. Cette diminution de résistance résiduelle en traction est aussi montrée par Harada [68].

III.4. Influence des fibres de polypropylène sur le comportement du béton soumis à une haute température

L'ajout des fibres de polypropylène dans le béton améliore sa stabilité thermique. Elles fondent et s'évaporent, générant un canal qui facilite le transport de flux hydriques. L'étude des bétons contenant des fibres montre, en présence du polypropylène, une baisse de pic de pression de vapeur avec la montée en température. Cette diminution est liée au volume de fibres.

L'analyse des propriétés mécaniques des bétons de fibres de polypropylène en fonction de la température conduit à des avis divergents. Certains auteurs **Hammer [69]**, **Komonen et al [70]**, constatent une amélioration des propriétés mécaniques en présence des fibres de polypropylène. Ce gain de résistance est attribué à l'évacuation rapide de l'eau du matériau et la réduction des pressions induites lors de la montée en température.

III.4.1. Instabilité thermique

Les fibres de polypropylène sont utilisées pour lutter contre la fissuration du béton à l'état frais. Elles permettent de renforcer le béton avant durcissement et d'éviter ainsi la fissuration de retrait au très jeune âge. Leur domaine d'application s'est élargi à la prévention du phénomène d'éclatement des BHP à une température élevée.

Hammer [69], **Komonen et al. [70]**, et d'autres auteurs ont montré que l'utilisation des fibres de polypropylène dans le béton réduit considérablement l'éclatement. La première utilisation des fibres de polypropylène date des années 1995 (Japan Centre, Frankfur, Allemagne) [Brei, 1996]. Cette technique de prévention est d'ailleurs recommandée par l'Eurocode 2 [71]. La quantité minimale de fibres de polypropylène permettant d'éviter le risque d'éclatement est de l'ordre de 0.20 % du volume de béton.

III.4.2. Perte de masse du béton

Lors de la montée en température, le béton perd de la masse, en rapport au départ de l'eau sous forme libre ou liée. La figure III.7 illustre l'évolution de la perte de masse de différentes compositions de bétons avec et sans fibres de polypropylène au cours du chauffage [52]. L'évolution de la perte de masse est la même pour tous les bétons.

La courbe d'évolution de la perte de masse d'un béton se résume en trois domaines dont les limites varient suivant les auteurs :

- J De la température ambiante à 120°C : une faible variation de masse s'observe. Ce premier domaine marque le départ de l'eau libre des capillaires [72].
- J De 120°C à 300°C : l'augmentation de la perte de masse est beaucoup plus rapide. Ce domaine est caractérisé par le départ de l'eau liée dans les hydrates et principalement du gel de C-S-H. C'est dans ce domaine que le taux de séchage passe par un maximum correspondant à la fin de la migration de l'eau évaporable [52].
- J au-delà de 300°C : la vitesse de perte de masse diminue. La diminution de la masse continue à cause de la dés-hydroxylation de la portlandite et de la décarbonatation du carbonate de calcium [64],[52].

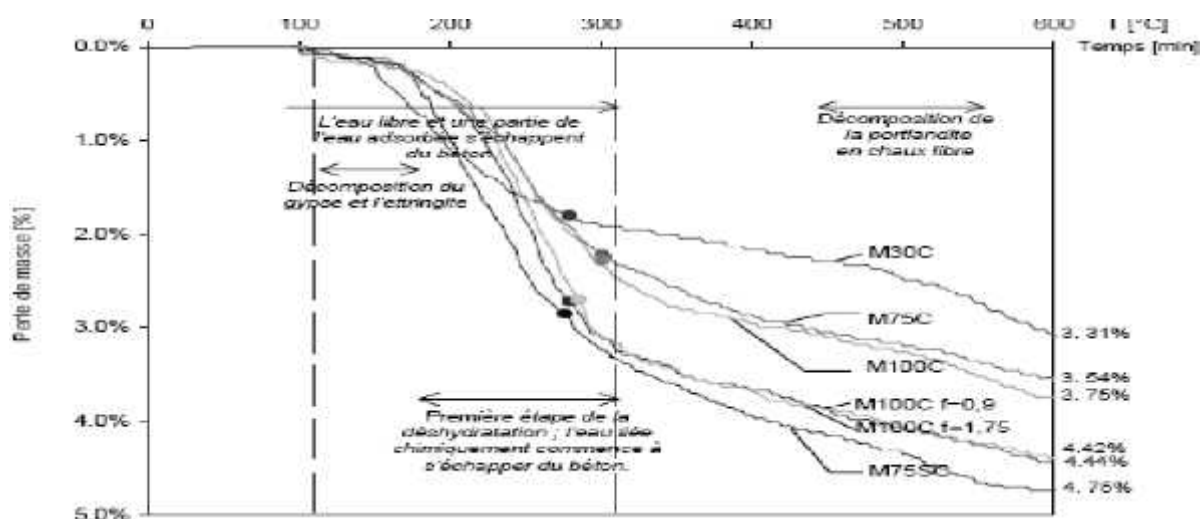


Figure III.7 : Perte de masse en régime transitoire des bétons avec et sans fibres de polypropylène durant l'échauffement à la vitesse de $1^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$, [52].

III.4.3. Resistance en compression

A la température ambiante, les résistances en compression varient peu pour des dosages inférieurs à 3 kg/m^3 de fibres [72]. Les résultats obtenus par Hager [52] montrent au contraire une baisse de résistance de 17% et 25% pour des bétons contenant respectivement 1.75 kg/m^3 et 0.9 kg/m^3 de fibres de polypropylène malgré l'augmentation de 10% de la pâte de ciment dans la composition des bétons fibrés. L'évolution de la résistance en compression en fonction de la température des bétons de fibres de polypropylène varie suivant les auteurs. La figure III.9 rassemble les résultats obtenus par différents auteurs.

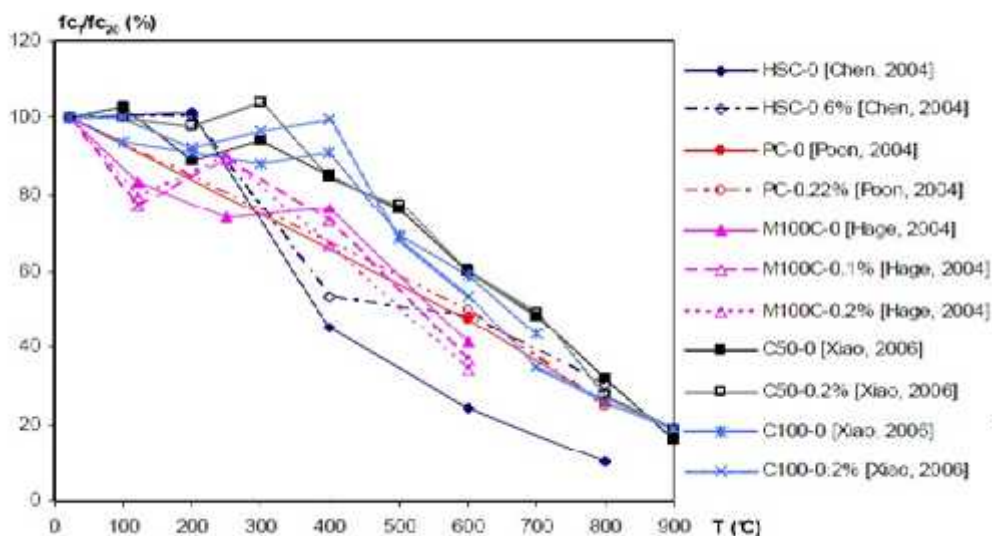


Figure III.8 : Evolution de la résistance résiduelle et à chaud relative en compression des bétons pour différentes teneurs en fibres de polypropylène exprimées en pourcentage volumique [52].

III.4.4. Resistance en traction par flexion

La résistance résiduelle en traction des bétons fibrés de polypropylène diminue en fonction de la température comme pour les bétons non fibrés. La figure III.10 illustre l'évolution de la résistance résiduelle relative à la traction obtenue par différents auteurs.

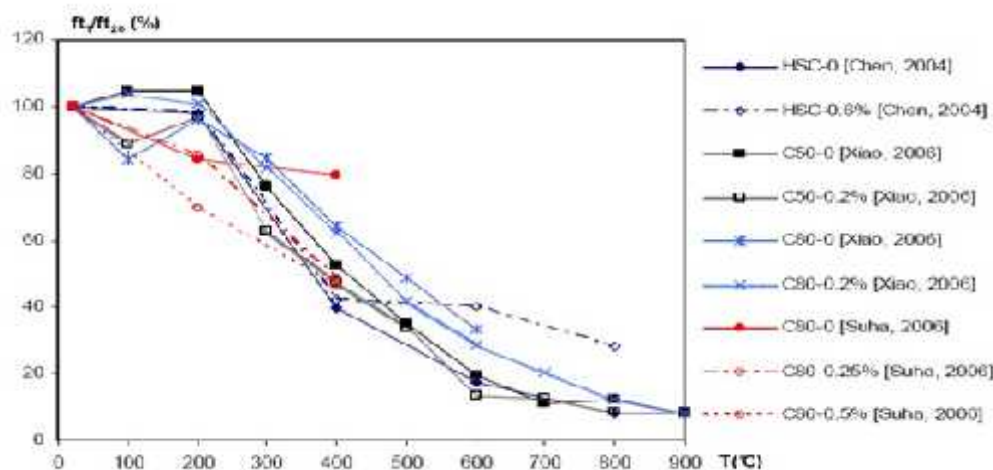


Figure III.9 : Evolution de la résistance résiduelle relative en traction de bétons pour différentes teneurs en fibres de polypropylène exprimées en pourcentage volumique [52].

III.5. Influence des fibres métalliques sur le comportement du béton soumis à une haute température

L'étude de l'influence des fibres métalliques sur le comportement du béton porté à une haute température montre pour certains auteurs une instabilité thermique à une température peu élevée (inférieure à 200°C) ou une instabilité retardée (à partir de 800°C). Plusieurs paramètres peuvent être à l'origine des différences observées : le mode de cure des éprouvettes (éprouvettes sèches ou saturées), la vitesse de chauffage, la teneur en fibres qui semble être un facteur prépondérant. Plus la teneur en fibres métalliques est élevée, plus il y aura un risque de répartition hétérogène des fibres voire la floculation des fibres. La forte quantité de fibres peut aussi générer un gradient thermique supplémentaire qui engendrerait le phénomène d'instabilité thermique. Les résultats des travaux de [73] montrent que l'ajout de 0.25% et 0.5% de fibres métalliques ne permet pas d'améliorer de façon significative les propriétés mécaniques résiduelles du béton chauffé jusqu'à 400°C. L'influence positive des fibres métalliques est observée. Cette amélioration peut être retardée et disparaître à partir d'un seuil de température. Les résultats notamment sur l'amplitude du gain apporté par les fibres métalliques varient suivant les auteurs. Une convergence des résultats de l'influence des fibres métalliques sur le comportement résiduel du béton n'apparaît pas encore à travers la littérature.

III.5.1. Perte de masse

D'après la figure III 10, la présence de fibres métalliques dans le béton ne modifie pas l'allure de la courbe de la perte de masse du matériau. Comme pour les bétons sans fibres et les bétons de fibres de polypropylène, on distingue sur la courbe trois domaines différents : une faible perte de masse entre 20°C et 150°C et entre 300°C et 600°C, une perte de masse importante entre 150°C et 300°C. [52].

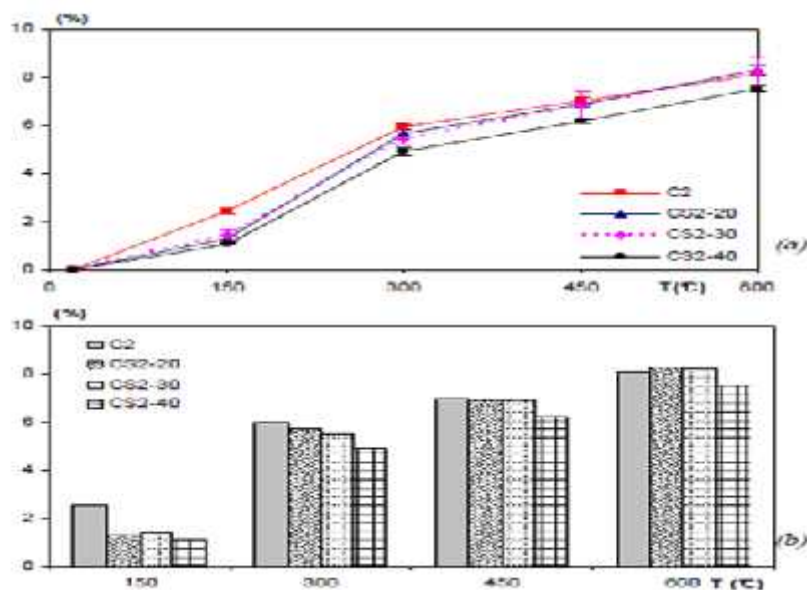


Figure III.10 : Evolution de la perte de masse des bétons C2 et CS2 en fonction de la température [52].

Avec l'ajout de fibres métalliques, la perte de masse diminue par rapport à celle du béton sans fibres. On observe une diminution plus importante après le chauffage à 150°C ; la perte de masse des bétons C2 et CS2-20 est respectivement 2.5% et 1.3%. Cette variation peut être due à la précision de la température de chauffage du four (au palier de 150°C).

Au-delà de la température 150°C, on remarque toujours une diminution de perte de masse des bétons de fibres métalliques mais moins importante. Après le chauffage à 600°C, les pertes de masse des bétons C2, CS2-20, C3 et CS3-20 sont respectivement 8.1%, 8.3%, 7.2% et 6.9%. Cette variation de perte de masse semble être liée à la quantité de fibres. La composition des bétons de fibres métalliques est obtenue par substitution volumique d'une partie des granulats. Les granulats sont humides au moment de la fabrication du béton. Le remplacement d'une partie des granulats par les fibres métalliques a donc diminué la quantité d'eau libre ou adsorbée.

III.5.2. Resistance en compression

Le tableau III.2 résume les valeurs des résistances résiduelles et relatives en compression des différents bétons de fibres métalliques CS2 et CS3. Chaque valeur est la moyenne réalisée sur trois éprouvettes. Les figures 5.6 et 5.7 montrent l'évolution de la résistance en compression en fonction de la température de chauffage des bétons CS2 et CS3.

La résistance en compression des bétons de fibres métalliques baisse avec l'augmentation de la température de la même manière que pour les bétons sans fibres et avec les fibres de polypropylène : peu de perte, voire un gain de résistance avant 300°C, puis une chute rapide de résistance.

Les bétons de fibres métalliques présentent de meilleures résistances résiduelles en compression à la température ambiante que le béton sans fibres. Cette amélioration de la résistance en compression des bétons de fibres métalliques est observée pour tous les cycles de chauffage-refroidissement. Les résistances des bétons C2 et C3 restent toujours inférieures à celles des bétons CS2 et CS3 (tableau III.3) Après chauffage à 450°C, contrairement aux bétons sans fibres ou avec les fibres de polypropylène, les bétons de fibres métalliques conservent plus de 50% de leur résistance initiale. La résistance résiduelle augmente avec le dosage en fibres.

Tableau III.2 : Résistance en compression des bétons avec et sans fibres métalliques [52].

Bétons	Unités	Températures (°C)				
		20	150	300	450	600
C2	MPa	46.0	36.9	40.1	20.3	5.3
	MPa	57.9	51.2	56.0	36.3	9.0
CS2-20	Ecart type	2.0	1.8	3.9	2.8	0.5
	(%)	100	89	97	63	16
CS2-30	MPa	57.7	46.8	54.8	37.5	10.2
	Ecart type	3.3	1.5	0.9	0.4	0.1
CS2-40	MPa	55.9	44.8	52.1	37.7	13.9
	Ecart type	0.4	1.8	1.4	0.8	0.3
CS2-40	MPa	55.9	44.8	52.1	37.7	13.9
	(%)	100	80	93	67	25
C3	MPa	70.2	62.6	50.6	26.0	9.3
	MPa	69.7	69.9	71.3	43.5	13.4
CS3-20	Ecart type	4.9	3.4	3.1	2.7	0.3
	(%)	100	100	102	62	19
CS3-30	MPa	74.7	67.8	73.8	36.8	15.1
	Ecart type	1.6	0.8	0.5	2.4	1.1
CS3-30	MPa	74.7	67.8	73.8	36.8	15.1
	(%)	100	91	99	49	20
CS3-40	MPa	77.9	69.4	79.1	46.5	14.6
	Ecart type	2.0	1.7	1.9	2.6	0.3
CS3-40	MPa	77.9	69.4	79.1	46.5	14.6
	(%)	100	89	102	60	19



Figure III.11 : Test de compression de bétons de fibres de polypropylène et métalliques après traitement thermique à 300°C [52].

III.5.3. Résistance en traction par flexion

Le tableau III.3 rassemble les valeurs moyennes des résistances résiduelles et relatives en traction par flexion mesurées sur des éprouvettes prismatiques de section 10 x 10 x 40 cm.

Tableau III.3 : Résistances en traction par flexion des bétons avec et sans fibres métalliques [52].

Bétons	Unités	Températures (°C)				
		20	150	300	450	600
C2	MPa	5.2	3.1	3.1	1.4	0.4
	MPa	5.1	4.3	4.6	2.6	1.4
CS2-20	Ecart type	0.7	0.2	0.7	0.3	0.2
	(%)	100	84	91	52	28
CS2-30	MPa	6.4	4.4	4.8	4.0	1.7
	Ecart type	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1
CS2-40	MPa	5.8	3.5	3.3	3.3	2.4
	Ecart type	0.8	0.9	1.7	0.1	0.4
C3	MPa	7.3	5.4	4.6	2.8	0.7
	MPa	7.2	5.6	6.2	3.8	2.5
CS3-20	Ecart type	0.1	0.4	0.5	0.5	0.4
	(%)	100	77	86	52	35
CS3-30	MPa	6.7	6.9	3.4	3.1	2.4
	Ecart type	0.1	0.4	0.2	0.0	0.4
CS3-40	MPa	7.2	7.9	5.9	5.2	2.7
	Ecart type	0.1	0.9	0.9	0.7	0.3
CS3-40	(%)	100	109	83	73	38

III.6. Comportement des bétons de cocktail de fibres

L'étude de la résistance résiduelle en traction des bétons de cocktail de fibres de polypropylène et métalliques montre une amélioration de cette propriété par rapport au béton sans fibres et au béton de fibres de polypropylène. Par rapport aux bétons de fibres métalliques, la résistance résiduelle en traction est plus faible, soit une baisse de l'ordre de 10% après le chauffage à 600°C. Cette baisse de résistance résiduelle en traction des bétons de cocktail de fibres par rapport aux bétons de fibres métalliques a aussi été observée dans les études de [73].

La proportion de fibres métalliques semble jouer un rôle important sur le comportement des bétons de cocktail de fibres. Comme en compression, les résistances résiduelles relatives en traction des bétons de cocktail de fibres sont comparées à celles obtenues théoriquement en faisant une moyenne arithmétique des résistances de bétons de fibres de polypropylène et des bétons de fibres métalliques [52].

Comme en compression, la résistance résiduelle relative en traction des bétons de cocktail de fibres n'est pas une moyenne arithmétique de résistance de bétons de fibres de polypropylène et de bétons de fibres métalliques comme l'illustre la figure III.13 La baisse de résistance résiduelle des bétons en présence de fibres de polypropylène est plus prononcée que celle du béton contenant le cocktail de fibres de polypropylène et de fibres métalliques.

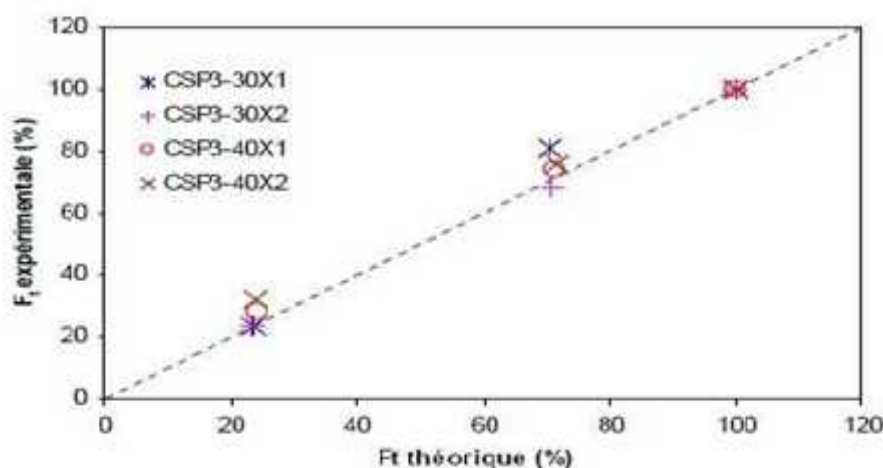


Figure III.12 : Evolution comparée de la résistance résiduelle relative expérimentale et théorique en traction des bétons de cocktail de fibres [52].

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les travaux de recherche déjà réalisés sur l'influence des fibres de polypropylène, des fibres métalliques et d'un cocktail des deux fibres sur les propriétés physiques et caractéristiques mécaniques des bétons soumis à des températures élevées.

IV.1. Introduction

La simulation et l'analyse numérique par éléments finis est un moyen très performant pour l'étude de phénomènes mécaniques complexes, qui est une technique d'approximation de la réalité. Cette dernière est devenue aujourd'hui quasi nécessaires dans le domaine de la recherche, les résultats donnés par la simulation numérique doivent être toujours confrontés aux résultats donnés par les essais expérimentaux. La méthode des éléments finis a un impact direct sur la qualité et le temps, elle est apparue dans le désir de minimiser le coût d'une étude expérimentale, elle est plus économique que les tests au laboratoire avec un nombre d'essais optimisés.

Dans ce chapitre, nous allons présenter d'une part le logiciel ABAQUS et son fonctionnement, et d'autre part on présentera les différentes étapes menées pour la modélisation d'une poutre en béton de fibre (béton considéré comme homogène). Le modèle géométrique et le choix des modèles éléments finis pour le maillage sont générés dans un espace tridimensionnel (3D), tout en tenant compte du comportement expérimental des matériaux constitutifs. L'interaction entre les différents éléments ainsi que les étapes d'assemblage et de chargement de la poutre sont présentées.

IV.2. Présentation du logiciel ABAQUS

ABAQUS est un code de calcul par éléments finis (MEF) créé en 1978 par Hibbit, Karlsson et Sorensen (HKS). Il est utilisé pour simuler la réponse physique des pièces ou des structures soumises à des chargements mécaniques, thermiques, du contact, de l'impact ou d'autres conditions.

Ce logiciel est une solution de simulation évolutive et composé de solution d'analyse unifié, il peut simuler n'importe quelle géométrie telles que : poutres, plaques, coques et éléments spéciaux (ressorts, masses...) en deux dimensions ou en trois dimensions.

ABAQUS ne gère pas les unités ; c'est à l'utilisateur d'utiliser un système d'unités cohérent, nous devons les choisir en données d'entrées afin qu'elles soient homogène.

Choix des unités pour notre simulation :

-) Distance : mm
-) Temps : s
-) Force : N
-) Contrainte/pression : MPa

) Température : °C

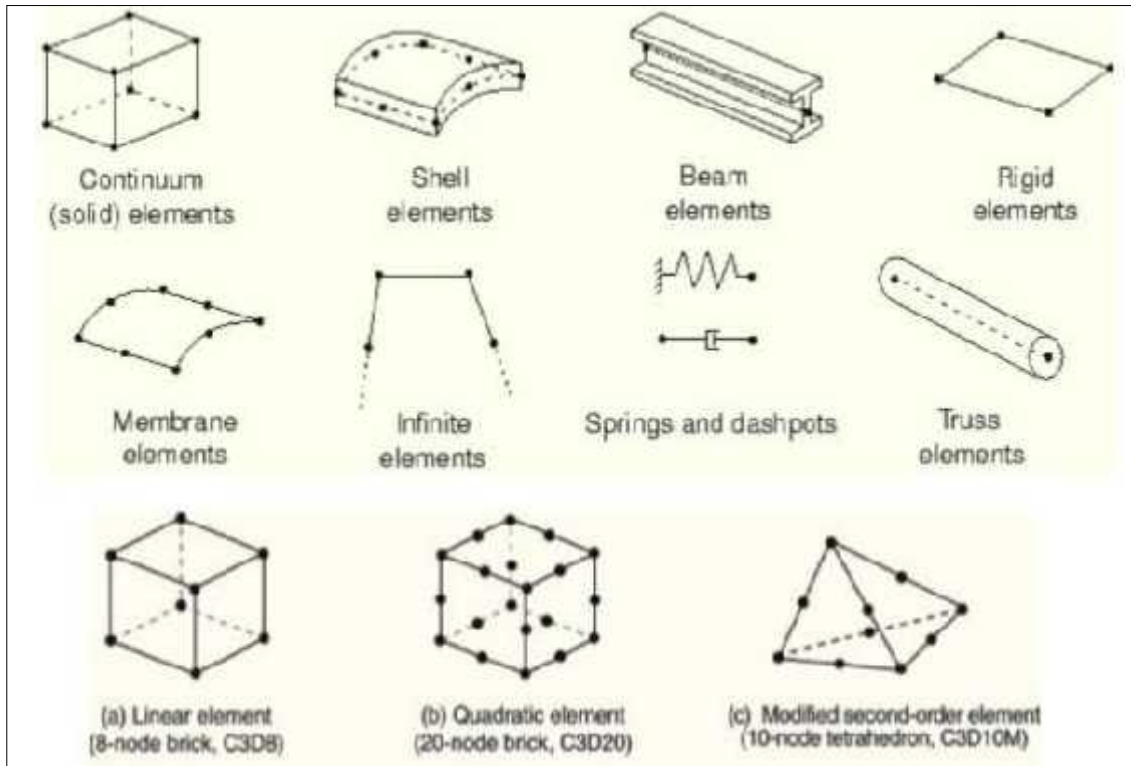


Figure IV.1 : Quelques formes complexes possibles à programmer sur ABAQUS

Tableau IV.1 : Tableau des unités correspondant à ABAQUS.

MASSE	LONGUER	TEMPS	FORCE	PRESSION	ENERGIE
M	L	T	$M.L.T^{-2}$	$M.L^{-2}.T^{-2}$	$M.L.T^{-2}$
Kilogramme	Mètre	Seconde	Newton	Pascal	Joule
Gramme	Millimètre	Milliseconde	Newton	MPa	Mili joule
Tonne	Millimètre	Seconde	Newton	MPa	Mili joule

ABAQUS se divise en trois grands codes :

-) **ABAQUS/Standard** : résolution par un algorithme statique implicite ;
-) **ABAQUS/Explicit** : résolution par un algorithme dynamique explicite ;
-) **ABAQUS/CAE** : fournit un environnement complet de modélisation et de visualisation pour des produits d'analyse d'ABAQUS.

IV.2.1. ABAQUS /Standard

Généralement, c'est la méthode de **Newton** qui est utilisée pour résoudre les problèmes non linéaires. La base du formalisme de cette méthode est la suivante. Considérons qu'après i itérations sur l'incrément de temps, l'approximation de la solution est $u(i)$. La solution exacte est donc donnée par :

$$u = u(i) + c(i+1) \dots \dots \dots \text{IV.1}$$

En écrivant le principe des travaux virtuels par une équation implicite, $F(u) = 0$.

Cela signifie l'équilibre par rapport à la variable nodale considérée. Cette équation implicite peut être développée en série de Taylor en $u(i)$, ce qui donne ;

$$F(u) + (F[u(i)]/u(i)) \times c(i+1) + (1/2 F''[u(i)]/u(i)) \times c^2(i+1) + \dots = 0 \dots \dots \dots \text{IV.2}$$

Si l'approximation est proche de la solution $u(i)$, alors $c(i+1)$ est petit et l'équation (IV.2) peut être réduite à ces deux premiers termes donnant ainsi :

$$(F[u(i)]/u(i)) * c(i+1) = -F[u(i)] \dots \dots \dots \text{IV.3}$$

IV.2.2. ABAQUS /Explicit

Le schéma explicite implanté au sein d'Abaqus conduit à des temps de calcul plus faibles comparativement au schéma implicite nommé ABAQUS/Standard. L'algorithme explicite assure une certaine robustesse, il est plus efficace pour aboutir à un calcul complet que **Abaqus/Standard**. Ce code présente une bonne résolution des contacts ce qui est un autre intérêt vis-à-vis de la simulation du procédé.

ABAQUS/Explicit met en œuvre un schéma d'intégration par différences centrales exprimé par les équations (IV.4) et (IV.5).

$$du(i+1/2) / dt = du(i-1/2) / dt + [(t(i+1) - t(i)) / 2] \times d^2u(i) / dt^2 \dots \dots \dots \text{IV.4}$$

$$u(i+1) = u(i) + [(Dt(i+1)) \times du(i+1/2) / dt] \dots \dots \dots \text{IV.5}$$

Où du/dt est la vitesse et d^2u/dt^2 est l'accélération. L'exposant (i) indique le numéro de l'incrément.

Ce seul schéma d'intégration est combiné à une procédure dynamique. La clef de l'efficacité calculatoire de la procédure explicite provient de l'utilisation d'une matrice de masse diagonale.

Une telle forme permet un calcul rapide de l'inverse de cette matrice notamment utilisée pour la détermination de l'accélération de l'équation (IV.6).

$$d^2u(i) / dt^2 = (M^{-1}) \times (F(i) - I(i)) \dots \dots \dots \text{IV.6}$$

Où **M** est la matrice de masse diagonale, **F** est le vecteur des charges appliquées et **I** est le vecteur des forces internes. Ainsi, la procédure explicite ne requiert ni itération ni matrice tangente de rigidité mais intègre par rapport au temps en utilisant beaucoup de petits incréments de temps. Or, l'opérateur de différences centrales est conditionnellement stable.

La limite de cette stabilité pour cet opérateur est donnée en termes de plus grande valeur propre du système par :

$$t^{1/2} \frac{2}{\omega_{max}} \dots \dots \dots \text{IV.7}$$

Avec amortissement, l'incrément de temps stable est donné par :

$$t^{1/2} \frac{2}{\omega_{max}} (\sqrt{1 + \varepsilon_{max}^2} - \varepsilon_{max}) \dots \dots \dots \text{IV.8}$$

D'où ε_{max} est la fraction d'amortissement critique dans le mode avec la fréquence la plus élevée.

Une estimation de la plus petite valeur propre du système peut être obtenue en déterminant le mode maximum des éléments du maillage. Ainsi, l'incrément de temps permettant la stabilité est donnée par :

$$t = \frac{L_{min}}{Cd} \dots \dots \dots \text{IV.9}$$

Où **Lmin** est la plus petite dimension d'éléments dans le maillage et **Cd** est la vitesse des ondes en dilatation dans le matériau. Cette vitesse est déterminée dans ABAQUS /Explicit en calculant les modules de matériau hypo-élastiques effectifs à partir de la réponse constitutive du matériau. Les constantes effectives K et $G = 2\mu$ sont déterminées de la manière suivante :

$$= (3K + 2\mu) \times \varepsilon_{vol} \Rightarrow 3K = 3K + 2\mu = \frac{\Delta p}{\Delta \varepsilon_{vol}} \dots \dots \dots \text{IV.10}$$

$$S = 2\mu \times e \dots \dots \dots \text{IV.11}$$

$$+ 2\mu = \frac{1}{3}(3K + 4\mu) \dots \dots \dots \text{IV.12}$$

$$Cd = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \dots \dots \dots \text{IV.13}$$

D'où Δp l'incrément de contrainte moyenne, **S** l'incrément de contrainte déviatrice, ε_{vol} l'incrément de contrainte volumique, **e** l'incrément de déformation déviatrice, ρ est la masse volumique du matériau.

Dans un matériau élastique isotrope, les constantes effectives λ et μ peuvent être définies en fonction de module de Young E et le coefficient de poisson ν .

$$\lambda = \lambda_0 = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \dots\dots\dots\text{IV.14}$$

$$\mu = \mu_0 = \frac{E}{2(1+\nu)} \dots\dots\dots\text{IV.15}$$

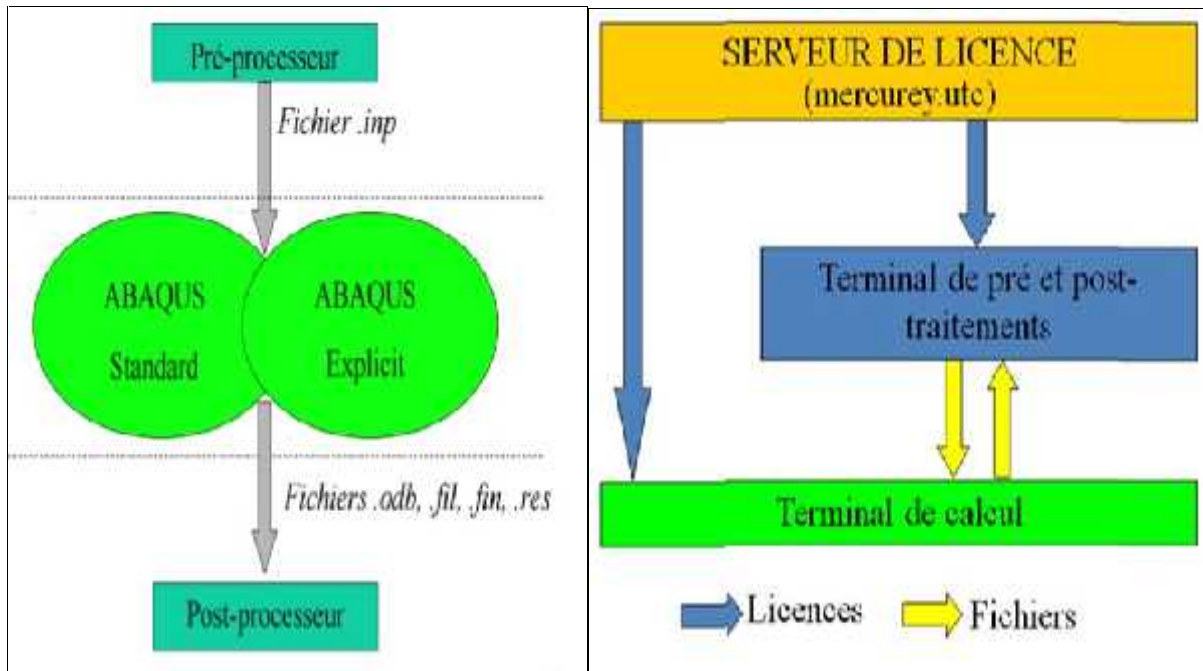


Figure IV.2 : Schéma de fonctionnement d'ABAQUS.

IV.2.3. LE CAE (Complété ABAQUS environnement)

Une interface idéale pour la modélisation, la gestion et le post traitement des modèles Abaqus dans laquelle l'utilisateur peut effectuer la totalité de la mise en donnée, de la création ou l'import de pièce, du maillage jusqu'à l'exploitation avancée des résultats (géométrie des différentes pièces, propriétés mécaniques, choix des éléments, choix de l'intégration de la matrice de rigidité, choix du mode de résolution).

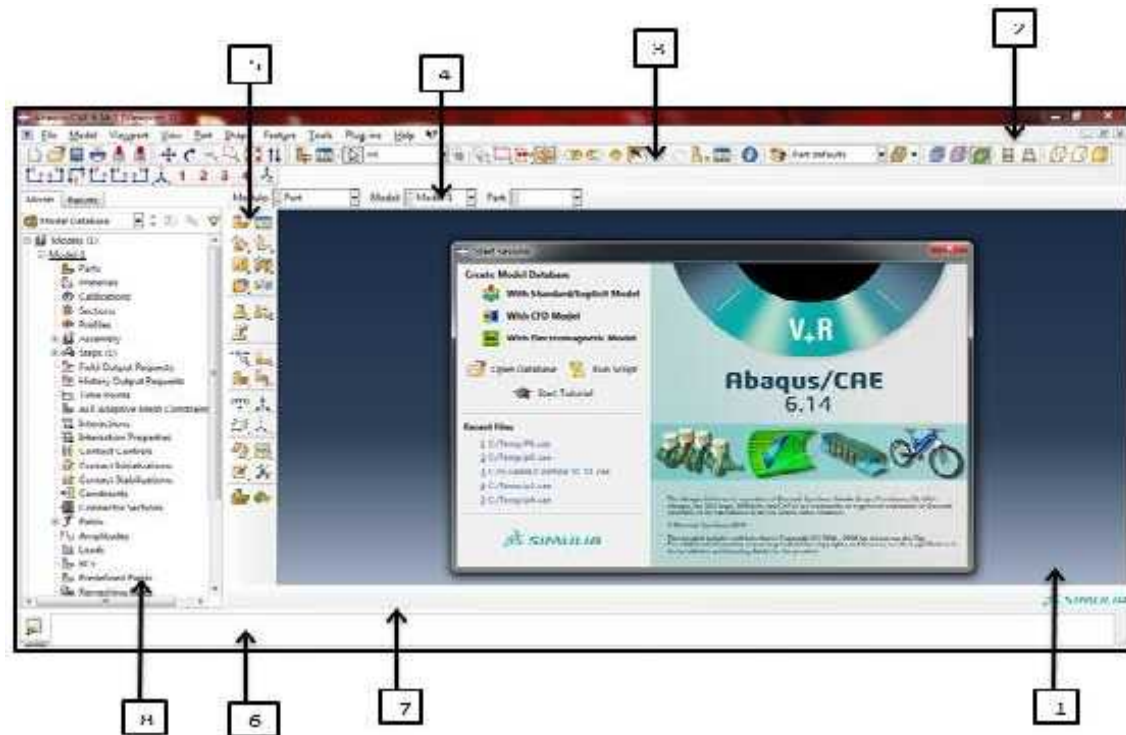


Figure IV.3 : Présentation de l'interface ABAQUS.

1. Fenêtre d'affichage graphique.
2. Barre de menu en haut, ces menus sont relatifs au module correspondant.
3. Barre horizontale d'outil, y sont disposées les icônes correspondant aux commandes les plus courantes.
4. Une troisième barre de menus déroulant permettant d'accéder aux autres modules, ou de sélectionner le modèle ou la pièce sur lesquels on souhaite travailler.
5. On dispose à gauche d'une colonne d'icône permettant d'accéder aux outils disponibles à l'intérieur du module dans lequel on se trouve.
6. L'espace juste sous la fenêtre d'affichage graphique correspond aux messages affichés par ABAQUS lors de la modélisation ; ils permettent d'être mieux guider dans les actions entreprises.

7. Une fenêtre en dessous sur fond blanc est utilisée pour afficher des messages informatifs : réponses à des questions posées, avertissements liés à des problèmes rencontrés, etc.
8. Enfin, arbre du modèle et résultats.

IV.3. Présentation de la variante d'étude

On a simulé une poutre en béton fibré (béton homogène) avec les dimensions suivantes :

- Épaisseur ($H = 70 \text{ mm}$)
- Longueur ($L = 280 \text{ mm}$)
- Largeur ($l = 70 \text{ mm}$)

IV.4. Présentation des étapes de la simulation

Dans cette section les étapes suivies pour notre modèle sont présentées. Le logiciel est divisé en des modules indépendants les un des autres. **Figure IV.6**



Figure IV.4 : Les étapes de la simulation.

➤ La géométrie des éléments (module part)

Dans cette première étape, tous les éléments de la poutre en béton fibré (béton homogène) sont créés grâce aux outils du module « **Part** ».

On a créé la géométrie de la poutre dans le module **part** en utilisant les coordonnées des points en deux dimensions et on a créé la 3ème dimension par extrusion. On a utilisé un **solide déformable** en 3D.

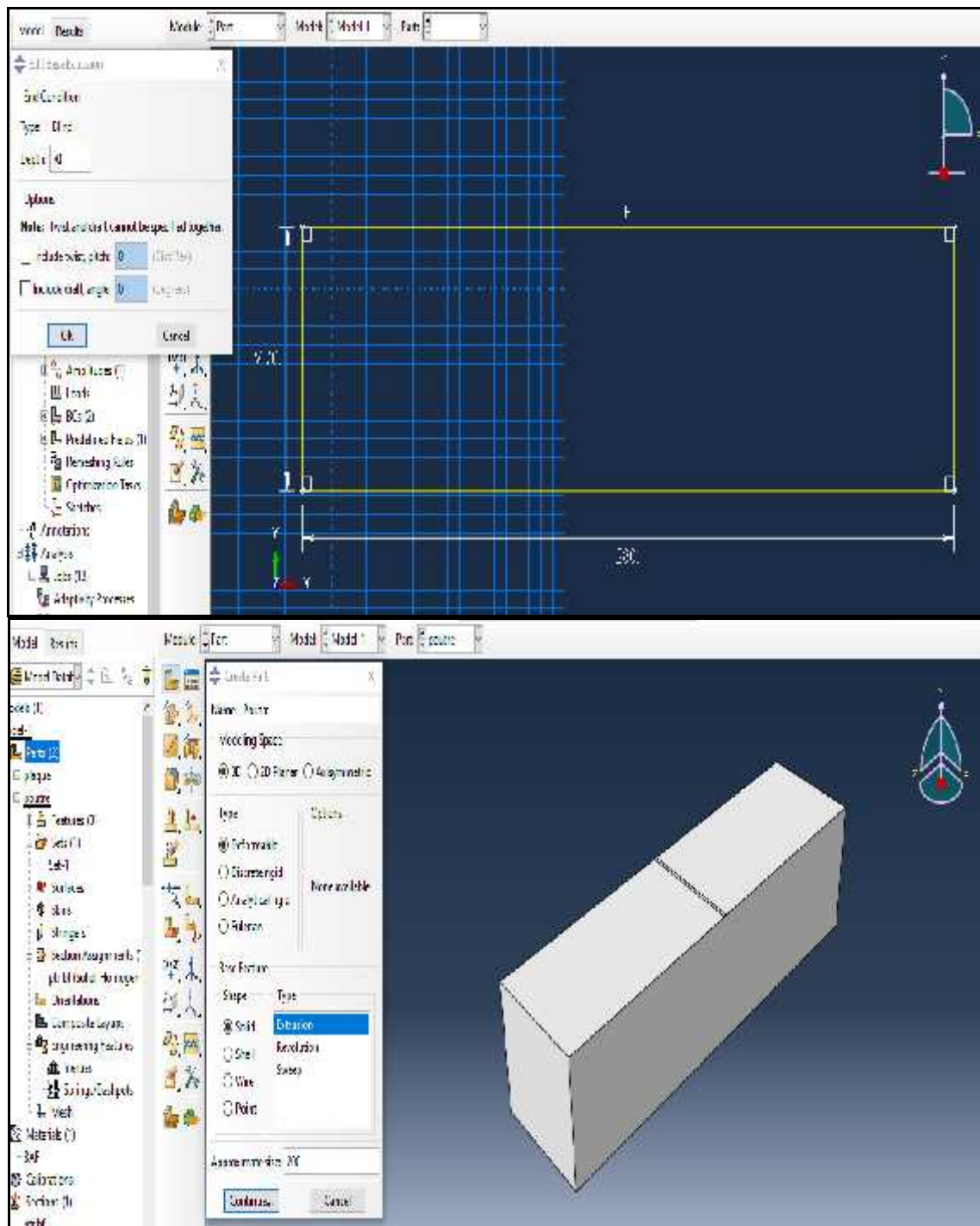


Figure IV.5 : Élément poutre.

On a créé la géométrie des plaques d'appuis et de chargement afin d'empêcher toute déformation d'élément béton à proximité de ces plaques (**Figure IV.8**), en choisissant "Shell" dans "Creat Part".

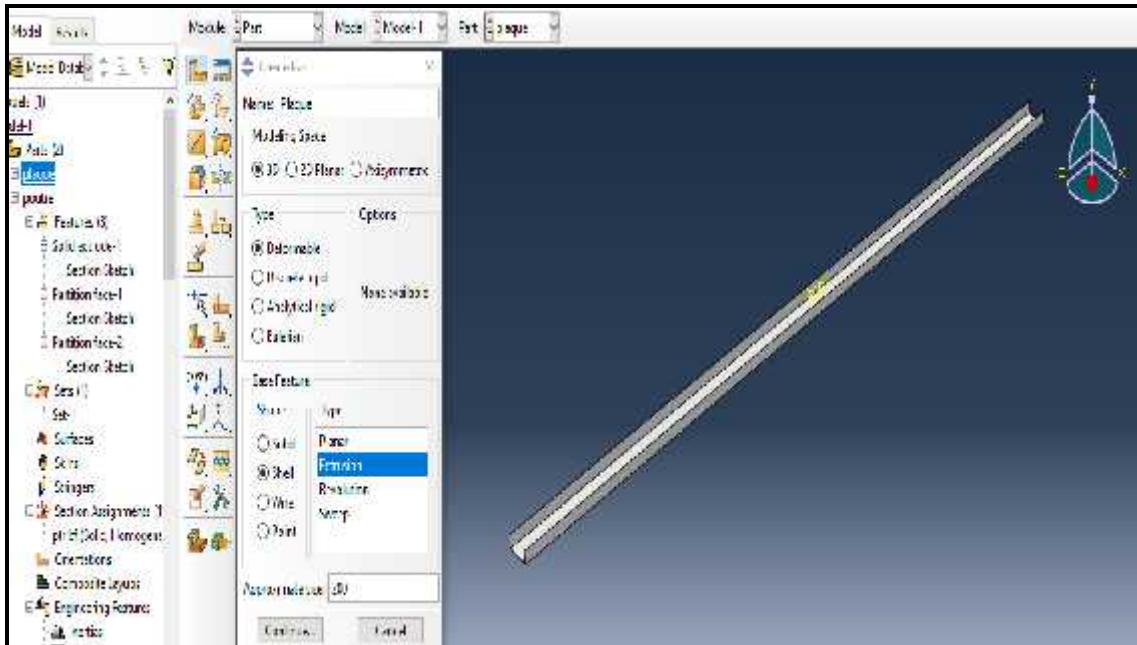





Figure IV.6 : Élément plaque.

➤ Propriétés des matériaux (Module Property)

Le rôle de ce module dans la modélisation numérique comme son nom l'indique est d'affecter toutes les propriétés matérielles d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets. Pour un calcul élastique il faut introduire les paramètres suivants : le module de Young et le coefficient de

- Créer le matériau 
- Créer les sections sur lesquelles appliquer ces matériaux 
- Affecter (assimiler) les matériaux aux sections correspondantes 

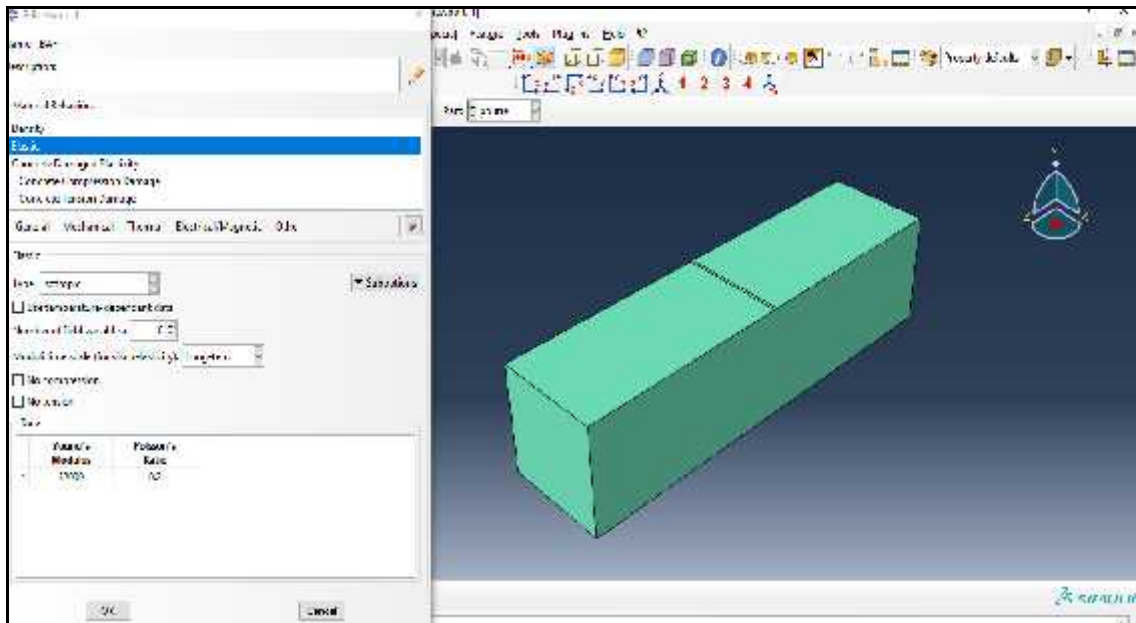


Figure IV.7 : Création des matériaux.

➤ **Assemblage du modèle (Module Assembly)**

Dans ce module, nous importons les deux pièces auparavant dessinées, on les rassemble avec « **Creat instance** », on peut répéter chaque part créé plusieurs fois et lui faire des translations et rotations s'il est nécessaire jusqu' à voir notre modèle. On fait l'assemblage de la poutre avec les plaques.

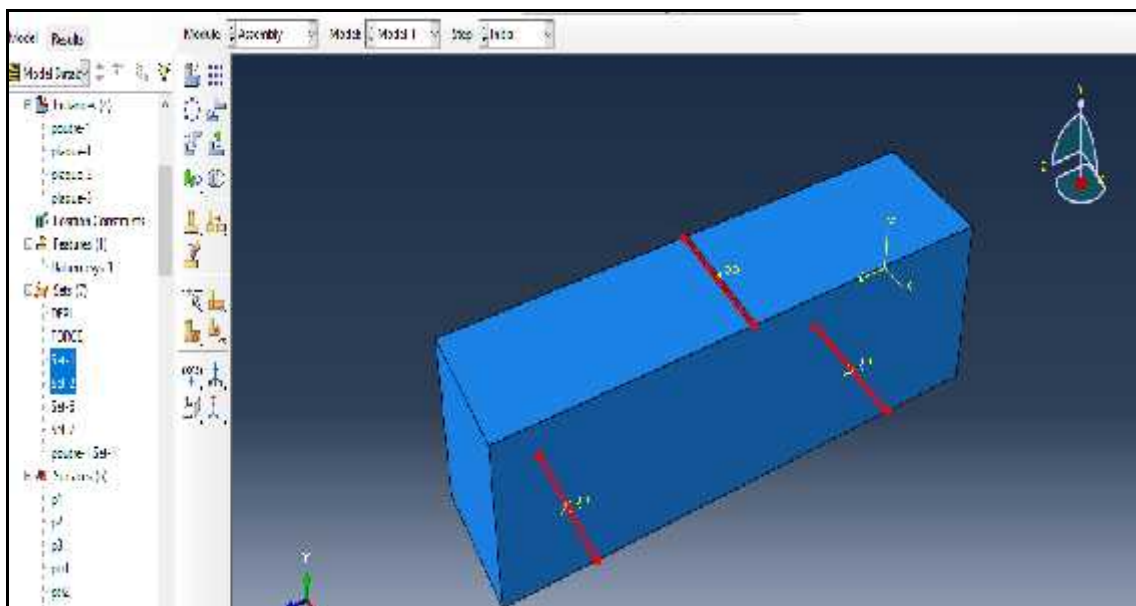


Figure IV.8 : Résultat de l'assemblage sur Abaqus.

➤ **Définition du critère de calcul (Module Steps)**

Dans le module « step », nous créons une procédure explicite. Un point important pour cette simulation est de bien définir le temps de calcul ainsi que l'incrément. Pour notre structure, nous avons spécifié un temps de simulation de 1 s avec un facteur d'échelle de temps pour une incrément de 0.1 s. Deux type de sortie sont définies à savoir : des sorties de type champ « **Field output requests** » qui fournissent des valeurs à un instant donné et des sorties de type « **history output requests** » qui vont donner l'évolution d'une grandeur au cours du temps.

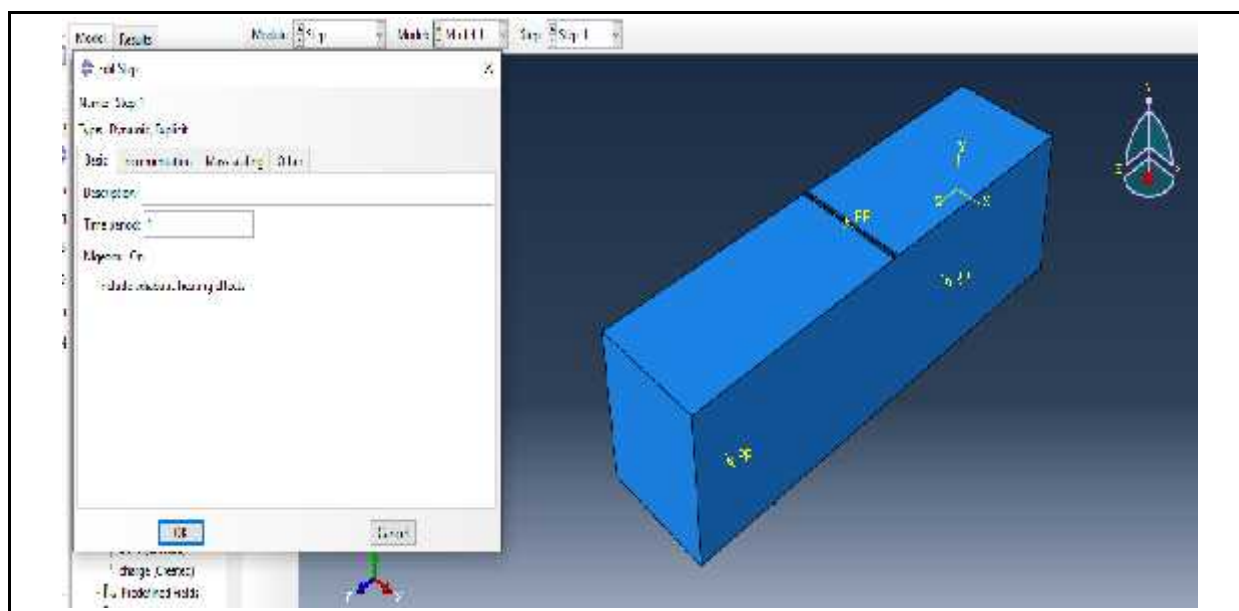


Figure IV.9 : Création du Step.

➤ **Définition des contacts (Module Interaction)**

Il définit les interactions entre chaque pièce et introduit les premières hypothèses portant sur les contacts, les contraintes et les connexions éventuelles. Dans cette simulation on a considéré :

- 1) Un contact surfacique entre le béton et plaques avec « **TIE** », qui considère une adhérence quasi-parfaite entre les deux surfaces choisies.
- 2) Ce module sert aussi à désigner les parties soumises à des contraintes via un corps rigide (telles que les points d'appui et de chargement) en sélectionnant "**Rigid body**".

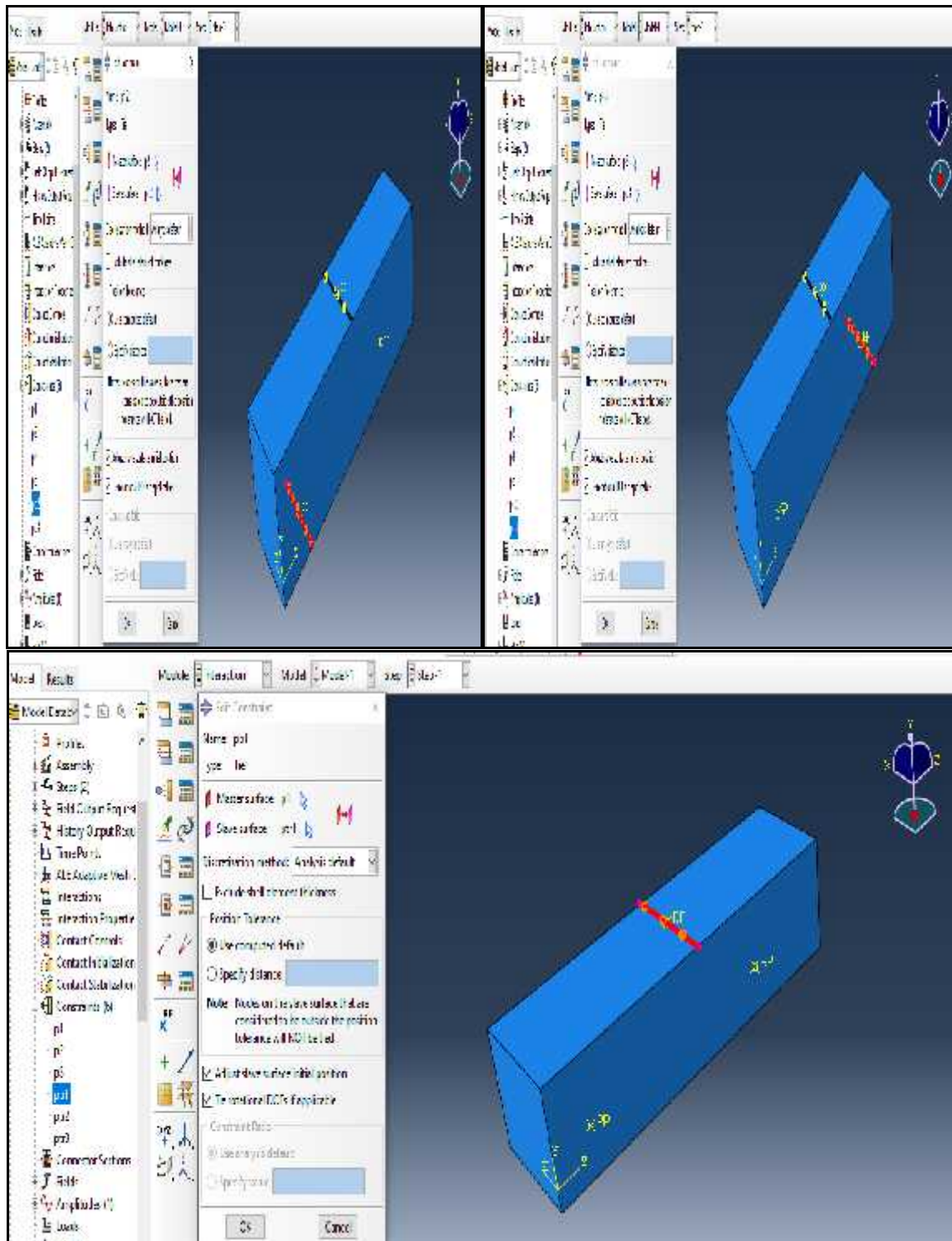


Figure IV.10 : Création des interactions

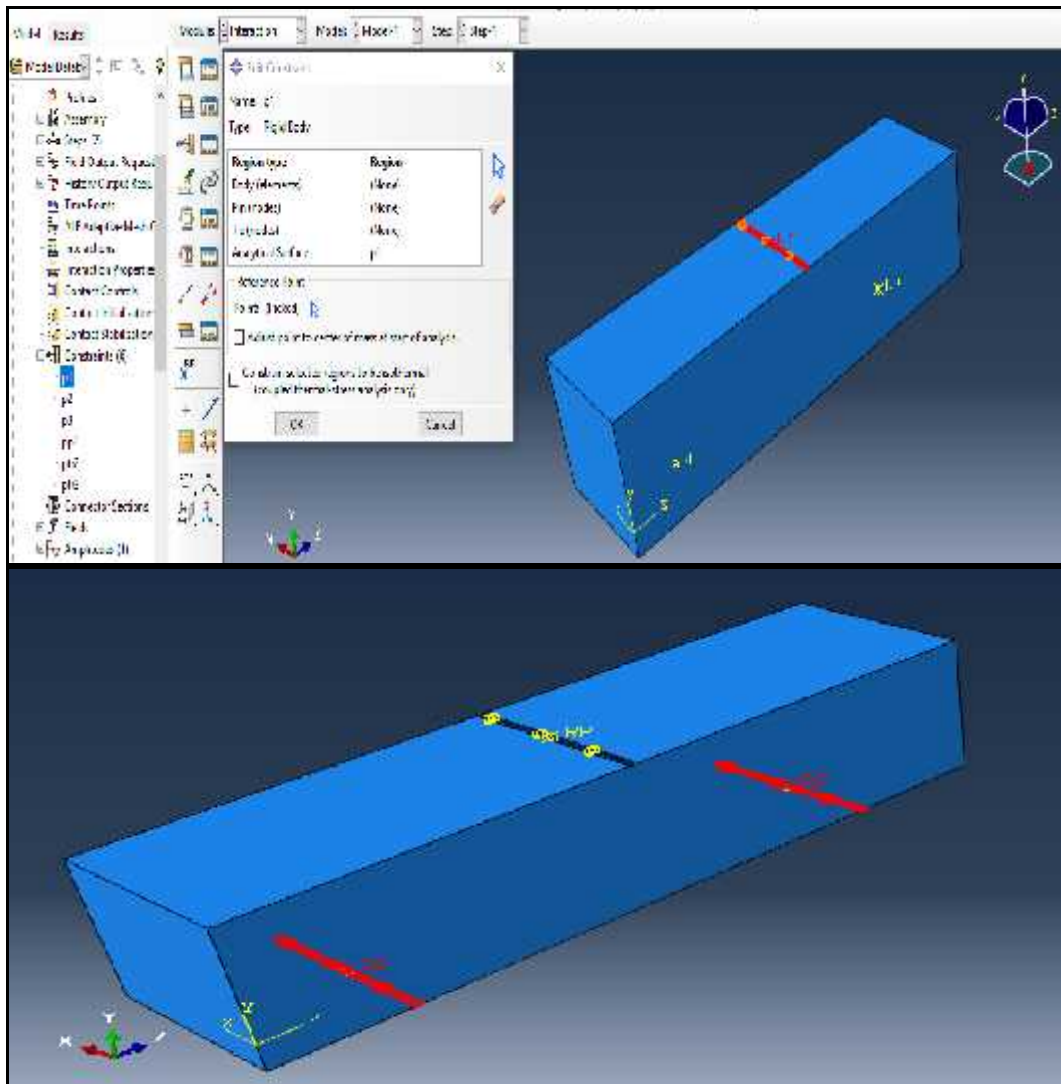


Figure IV.11 : Interaction du corps rigide

➤ **Définition des conditions aux limites et chargement (Module Load)**

Le module load permet de spécifier tous les chargements, conditions aux limites et champs.

-) **Create Boundary Condition''(Bcs)** : l'étape de création des conditions aux limites.
-) **Create Load'' (load)** : regroupe l'ensemble des forces auxquelles le système est soumis.

Dans la présente simulation, la poutre est supposée supporter une charges linéaire. Un déplacement imposé de 2 mm est alors appliqué.

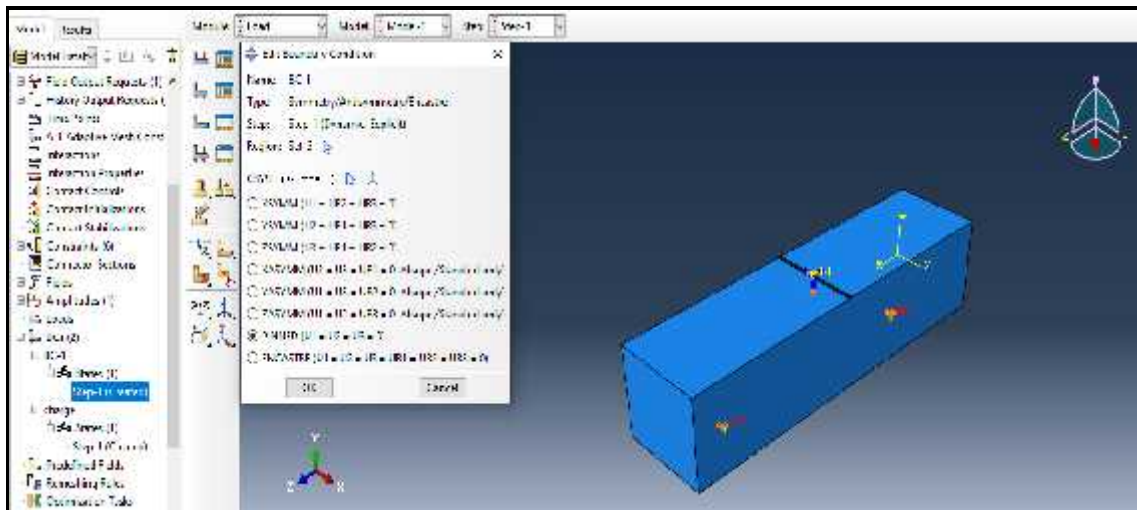


Figure IV.12 : Conditions aux limites de module load

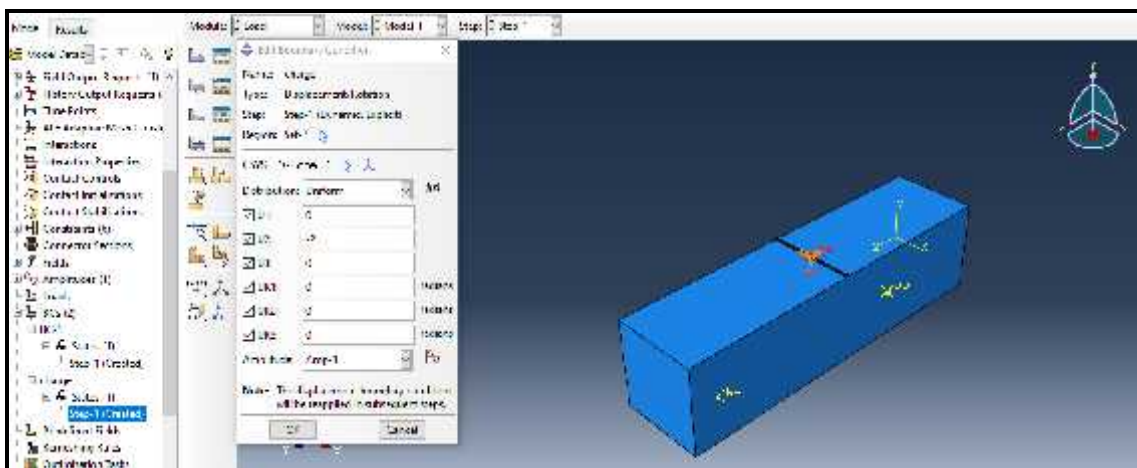


Figure IV.13 : Définition des forces de module load. (Chargement en flexion a 3 points)

Un chargement thermique est également appliqué sur la poutre (20°,200°,450°)

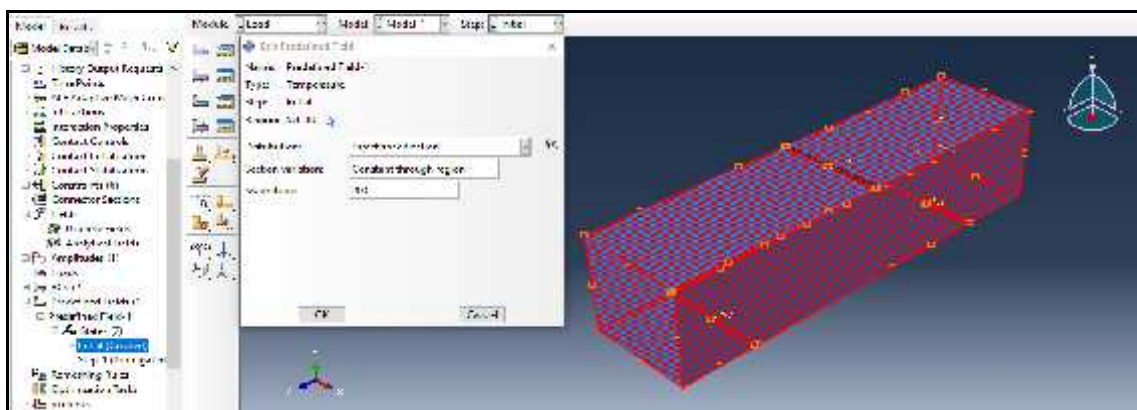


Figure IV.14 : Conditions aux limites de module load

➤ **Génération du maillage (Module Mesh)**

Le module Mesh contient des outils qui nous permettent de générer un maillage d'éléments finis sur un assemblage créé dans Abaqus / CAE pour l'élément. C'est une étape principale, pour aboutir à des résultats numériques cohérents.

En effet, l'art du maillage repose essentiellement sur deux critères : les éléments de maillage (par exemple, hexaédriques, cubiques, tétraédriques dans « **Mesh contrôle** ») et la complexité topologique de chaque pièce. Plus la difficulté et accrue, plus la couleur se rapproche du rouge et inversement plus le maillage sera aisé, plus la pièce se verra colorée en vert ; il est possible aussi de mailler différemment une même pièce pour mettre en exergue les surface les plus déformables.

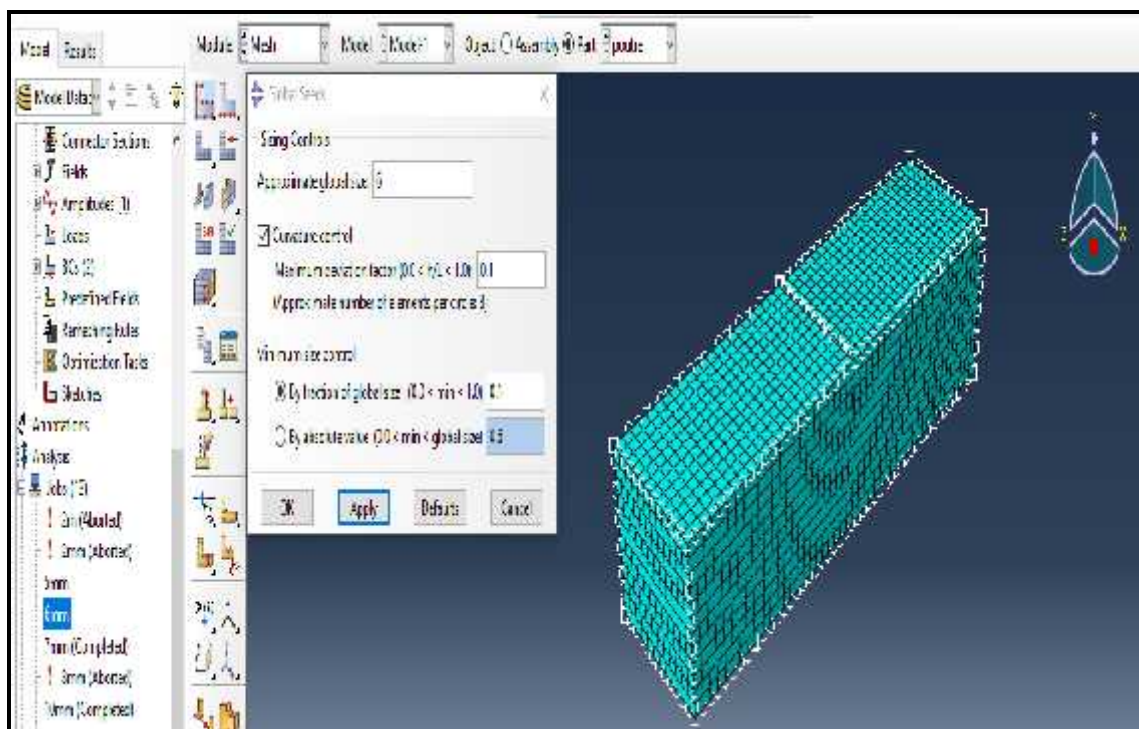


Figure IV.15 : Création du maillage.

➤ **Création du fichier résultats (Module Job)**

Le module « job » reprend les caractéristiques de calcul dans le module « **Step** ». Après avoir définie tout le modèle à simuler (géométrie, matériaux, lois de comportements, les chargements...). On lance le calcul après la définition d'un job, en cliquant sur « **Submit** »

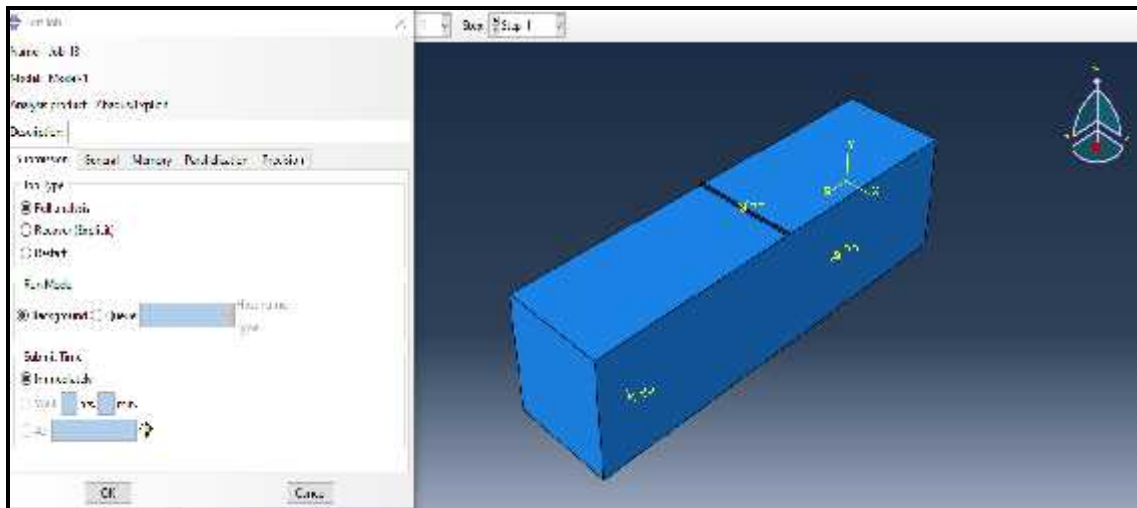




Figure IV.16 : Création de fichier job.

➤ **Visualisation des résultats (Module visualisation)**

L'utilisateur voit le résultat du calcul numérique dans « **Results** » : soit par la visualisation des déformations dans « **Field output** » comme les déformations, les contraintes, la vitesse ou les force ; soit par les courbes dans « **History Output** » comme l'énergie cinétique ou l'énergie totale de l'ensemble du modèle, l'énergie de dissipation ou des déformations.

On peut visualiser la forme déformé du modèle, en cliquant sur les outils :  ou .

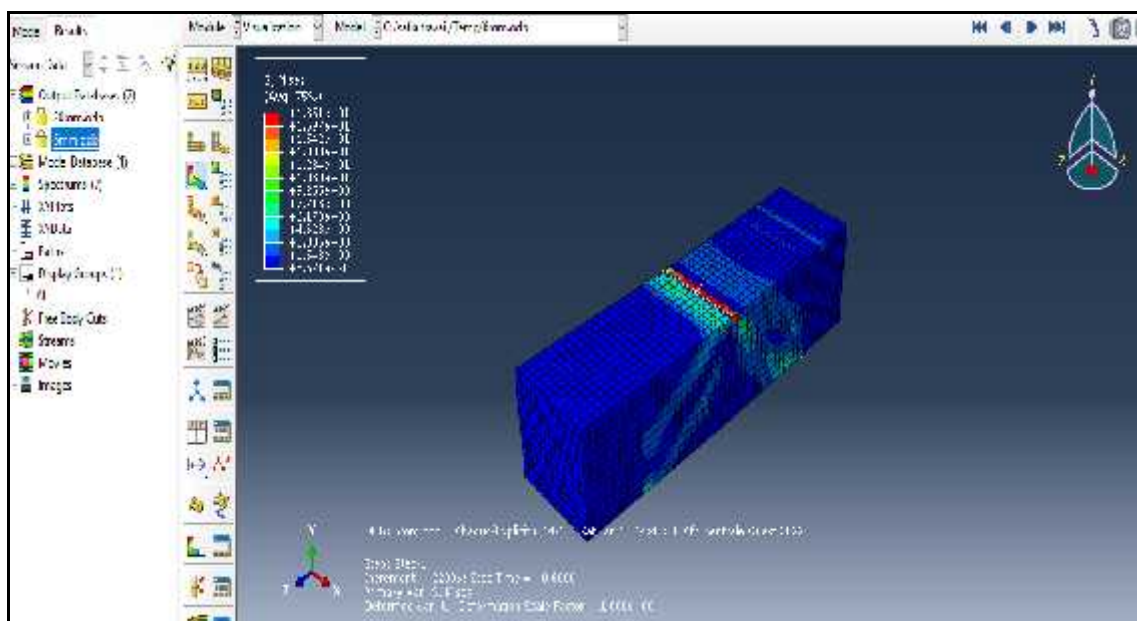


Figure IV.17 : Visualisation des résultats.

IV.5. Modélisation du comportement de matériaux

Pour trouver la réponse globale d'une structure considérée sous sollicitations extérieures, l'utilisation d'un modèle numérique prédictif s'avère être nécessaire. Dans ce contexte, des modèles éléments finis disponibles dans la littérature pour le béton et les matériaux composites sont utilisés séparément sous sollicitations particulières.

IV.5.1. Model non linéaire pour le béton

La modélisation du béton est bien moins évidente et son comportement mécanique est très difficile à décrire par les logiciels utilisant la méthode des éléments finis. En effet, le développement de microfissures très rapidement obtenu en traction, génère d'énormes difficultés de convergence de ces logiciels.

Le modèle numérique utilisé dans notre simulation est « **Concrete Damaged Plasticity** » intégré dans le code des éléments finis ABAQUS. C'est un modèle couplé (plasticité, endommagement) basé sur l'endommagement en incluant les déformations irréversibles, principalement destiné à une capacité général d'analyse des structures en béton sous charge cyclique et / ou dynamique.

IV.5.1.1. Lois du comportement : compression/traction

La théorie de la plasticité est utilisée pour décrire le caractère irréversible des déformations ϵ^{pl} . La partition de la déformation totale ϵ est effectuée en une partie élastique et une partie plastique. Les déformations élastiques ϵ^{el} mettent en œuvre une énergie dite élastique réversible qui est donc restituée lors de toute décharge, tandis que les déformations plastiques ϵ^{pl} conduisent à la dissipation d'une énergie irréversible.

$$\epsilon = \epsilon^l + \epsilon^{pl} \dots\dots\dots V.16$$

Dans le cadre d'une théorie de petite déformation, le tenseur de déformation ϵ_{ij} est obtenu à partir du premier gradient du champ de déplacement $u = (u_x, u_y, u_z)$ tel que :

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{ij} + u_{ji}) \dots\dots\dots IV.17$$

La relation contrainte-déformation est définie par :

$$\sigma = (1+d) D_0^{el} : (\epsilon - \epsilon^{pl}) = D^{el} : (\epsilon - \epsilon^{pl}) \dots\dots\dots IV.18$$

D'où D_0^{el} la matrice de rigidité initiale (non endommagée), D^{el} la matrice de rigidité élastique endommagée.

d est la valeur d'endommagement qui peut prendre des valeurs allant de zéro (matériau non endommagé) à un (matériau complètement endommagé) tel que :

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\varepsilon_c^{pl} \left(\frac{1}{b_t} - 1\right) + \sigma_c E_c^{-1}} \dots \dots \dots \text{IV.19}$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_t^{-1}}{\varepsilon_t^{pl} \left(\frac{1}{b_t} - 1\right) + \sigma_t E_t^{-1}} \dots \dots \dots \text{IV.20}$$

Suivant les notions habituelles de la mécanique des dommages continue, la contrainte effective est définie par :

$$\bar{\sigma} = D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \dots \dots \dots \text{IV.21}$$

D'où $\bar{\sigma}$ est le tenseur de contrainte effective. (Voir la **figure IV.19**)

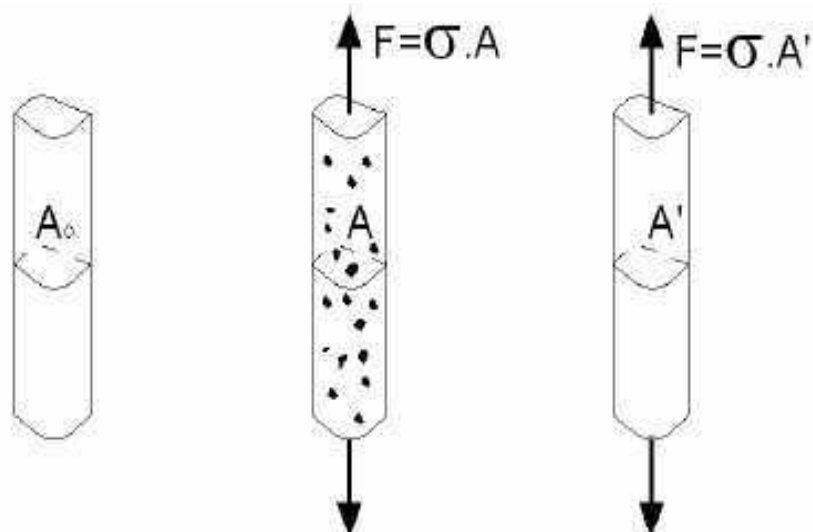


Figure IV.18 : Définition de la contrainte effective d'après [39].

La contrainte de Cauchy est liée à la contrainte effective à travers la relation de dégradation scalaire :

$$\sigma = (I+d) \bar{\sigma} \dots \dots \dots \text{IV.22}$$

On élasticité unidimensionnelle la contrainte s'écrit comme suit :

$$\sigma = E (I+d) \varepsilon \dots \dots \dots \text{IV.23}$$

D'où le facteur $(I+d)$ représente le rapport de la surface effective à la surface de coupe totale (c'est-à-dire la surface totale moins la surface endommagée).

Les états endommagés en traction et en compression sont caractérisés indépendamment par deux variables de durcissement $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ et $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$, sont appelées déformations plastiques

équivalentes en traction et en compression respectivement. L'évolution de ces variables est donnée par :

$$\tilde{\epsilon}^{pl} = \begin{bmatrix} \tilde{\epsilon}_t^{pl} \\ \tilde{\epsilon}_c^{pl} \end{bmatrix}; \tilde{\epsilon}^{pl} = \mathbf{h}(\tilde{\epsilon}^{pl}). \tilde{\epsilon}^{pl} \dots\dots\dots \text{IV.24}$$

L'écoulement plastique est gouverné par un potentiel d'écoulement G selon la règle d'écoulement :

$$\dot{\epsilon}^{pl} = \frac{\partial G(\bar{\sigma})}{\partial \bar{\sigma}} \dots\dots\dots \text{IV.25}$$

D'où λ est le multiplicateur de plastique non négatif.

➤ **La dégradation des rigidités et des dommages :**

Les équations d'évolution des variables de durcissement $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$ et $\tilde{\epsilon}_c^{pl}$ sont convenablement formulées en considérant d'abord les conditions de charge uni-axial.

➤ **Condition uni-axial compression / traction**

Comme le montre la **figure III.16**, lorsque l'échantillon de béton est déchargé en un point quelconque de la branche d'assouplissement des courbes de contrainte déformation ;

- La réponse de déchargement est affaiblie.
- La rigidité élastique du matériau semble être endommagée ou dégradé.
- Les fissures se propagent dans une direction transversale à la direction des contraintes.

La dégradation de la rigidité élastique est significativement différente entre les tests de traction et de compression. Dans les deux cas, l'effet est plus remarqué que la déformation plastique augmente.

On suppose que les courbes contrainte-déformation uni-axial peuvent être converties en courbes contrainte/ déformation de la forme suivante :

$$\epsilon_t = \epsilon_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl}, \tilde{\epsilon}_c^{pl}, \dots, fi) \Rightarrow \tilde{\epsilon}_t^{pl} = \int_0^t \dot{\tilde{\epsilon}}_t^{pl} dt \dots\dots\dots \text{IV.26}$$

$$\epsilon_c = \epsilon_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl}, \tilde{\epsilon}_t^{pl}, \dots, fi) \Rightarrow \tilde{\epsilon}_c^{pl} = \int_0^c \dot{\tilde{\epsilon}}_c^{pl} dt \dots\dots\dots \text{IV.27}$$

D'où les indice **t** et **c** font référence à la traction et à la compression respectivement. $\dot{\tilde{\epsilon}}_c^{pl}$ et $\dot{\tilde{\epsilon}}_t^{pl}$ sont les taux de déformation plastique équivalentes, température, fi , ($i = 1, 2, \dots$) sont d'autre variables de champ prédéfinies.

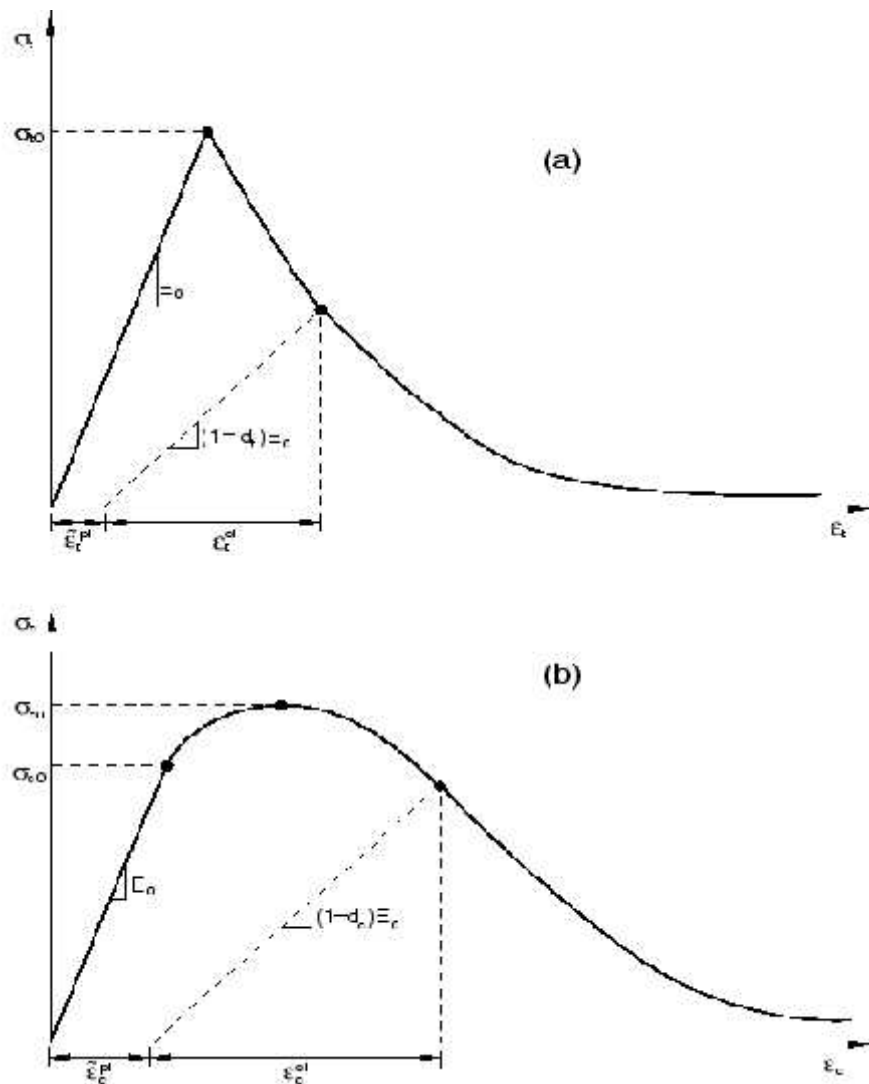


Figure IV.19 : Réponse du modèle ; a) à la traction simple. b) à la compression simple.

Les taux de déformation plastique équivalents est déterminés par :

$$\tilde{\epsilon}_t^{pl} = \epsilon_{11}^{pl} \quad \text{Uni-axial traction} \dots \dots \dots \text{IV.28}$$

$$\tilde{\epsilon}_t^{pl} = -\epsilon_{11}^{pl} \quad \text{Uni-axial compression} \dots \dots \dots \text{IV.29}$$

La réponse dégradée du béton est caractérisée par deux variables de dommage uni-axiales indépendantes d_t et d_c , supposées être en fonction de déformation plastique :

$$d_t = d_t(\tilde{\epsilon}_t^{pl}, f_i), \quad 0 \leq d_t \leq 1 \dots \dots \dots \text{IV.30}$$

$$d_c = d_c(\tilde{\epsilon}_c^{pl}, f_i), \quad 0 \leq d_c \leq 1 \dots \dots \dots \text{IV.31}$$

Si E_0 est la rigidité élastique (rigidité initial) du matériau, les relations contrainte-déformation sous traction et compression uni axiale sont, respectivement :

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 (\epsilon_t - \tilde{\epsilon}_t^{pl}) \dots\dots\dots IV.32$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\epsilon_c - \tilde{\epsilon}_c^{pl}) \dots\dots\dots IV.33$$

Lors des fissures, la surface disponible pour supporter la charge se réduit, ce qui entraîne une augmentation de la contrainte effective de traction $\bar{\sigma}_t$ et de compression $\bar{\sigma}_c$ telle que :

$$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{(1-d_t)} = E_0 (\epsilon_t - \tilde{\epsilon}_t^{pl}) \dots\dots\dots IV.34$$

$$\bar{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{(1-d_c)} = E_0 (\epsilon_c - \tilde{\epsilon}_c^{pl}) \dots\dots\dots IV.35$$

➤ **Condition cyclique uni-axial**

Dans des conditions de chargement cyclique uni-axial, les mécanismes de dégradation sont assez complexes, impliquant l'ouverture et la fermeture de microfissures formées précédemment, ainsi que leur interaction.

Le modèle « **concrete damage plasticity** » suppose que la récupération de rigidité observé dans l'expérimental (lorsqu'un essai d'un chargement cyclique uni axial), est donnée en termes d'une variable scalaire de dégradation d :

$$E = (1 - d) E_0 \dots\dots\dots IV.36$$

Où E_0 est le module initial (non endommagé) du matériau.

Pour les conditions cyclique uni-axial, la dégradation de la rigidité (d) est en fonction, de l'état de contraintes et des deux variables d'endommagement uni axial d_t et d_c , ABAQUS suppose que : $0 \leq d_t, d_c \leq 1$

$$d = 1 - \frac{S_t d_c + S_c d_t}{S_t + S_c} \dots\dots\dots IV.37$$

D'où S_t et S_c sont des fonctions de l'état de contrainte qui sont introduites pour représenter les effets de récupération de rigidité associés aux inversions de contrainte ils sont définis par :

$$S_t = 1 - w_t r^*(\dot{\epsilon}_{11}); \quad 0 \leq w_t \leq 1$$

$$S_c = 1 - w_c (1 - Z r^*(\dot{\epsilon}_{11})); \quad 0 \leq w_c \leq 1 \dots\dots\dots IV.38$$

$$\text{Où } r^*(\dot{\epsilon}_{11}) = \begin{cases} 1 & \text{si } \dot{\epsilon}_{11} > 0 \\ 0 & \text{si } \dot{\epsilon}_{11} < 0 \end{cases} \dots\dots\dots IV.39$$

w_t et w_c sont les deux paramètres qui permettent de contrôler la récupération de la rigidité à la traction et à la compression. Supposons qu'il n'y avait pas de dommages antérieurs à la compression (écrasement) dans le matériau, donc on a : $\tilde{\epsilon}_c^{pl} = 0$ et $d_c = 0$

$$(1 - \bar{d}) = (1 - s_c d_t) = (1 - (1 - w_c (1 - r^*)) d_t) \dots \dots \dots \text{IV.40}$$

- {

Dans la traction $\bar{\sigma} > 0, r^* = 1$ par conséquent $\bar{d} = d_t$

.....IV.41

Dans la compression $\bar{\sigma} < 0, r^* = 0$ et $\bar{d} = (1 - w_c) d_t$

Si $w_c = 1$; ça implique que $\bar{d} = 0$ et, par conséquent, le matériau recouvre entièrement la rigidité en compression (qui est dans ce cas la rigidité initiale endommagé, $E = E_0$)

Si, d'autre part, $w_c = 0, (\bar{d} = d_t)$ dans ce cas-là, il n'y a pas une récupération de rigidité.

w_c et w_t , peuvent prendre des valeur de zéro (0) jusque à un (1). La (**Figure IV.20**) illustre la récupération de rigidité pour un cycle de chargement uni-axial (traction-compression). « D'une traction vers une compression : $w_t = 1$ » ; « d'une compression vers une traction : $w_c = 0$ »

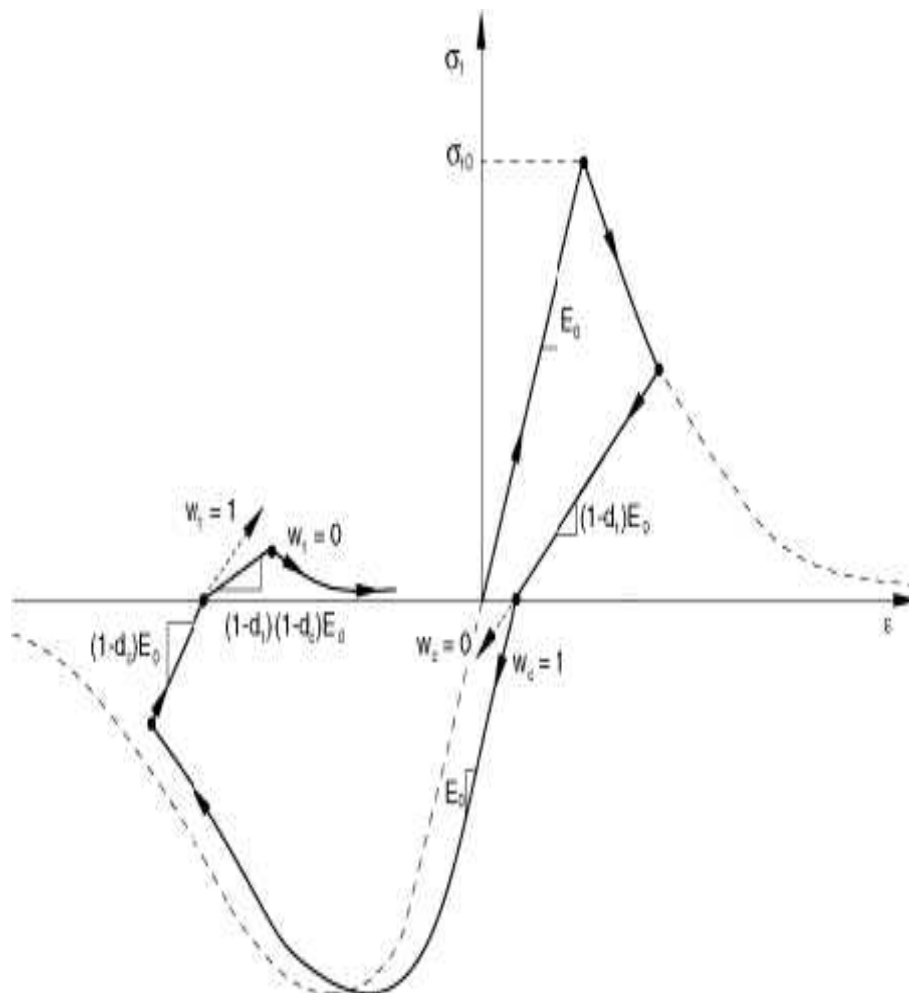


Figure IV.20 : Récupération de rigidité lors d'un cycle complet.

Tableau IV.2 : Les différentes lois utilisées pour le modèle adopté pour le béton.

Noms	Equations
Contrainte effective en traction	$\sigma_t = \frac{-\sigma_t}{(1-d_t)} = E_0 (\epsilon_t > 1) \epsilon_t^{pl} : 111$
Contrainte effective en compression	$\sigma_c = \frac{-\sigma_c}{(1-d_c)} = E_0 (\epsilon_c > 1) \epsilon_c^{pl} : 11$
Contrainte post élastique : Partie écrouis en compression	$\sigma_c^{(2)} = \frac{E_c \frac{\epsilon_c}{f_c} - (\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cl}})^2}{1 + (E_c \frac{\epsilon_c}{f_c} - 2) \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cl}}} f_c$
Contrainte post élastique : Partie adoucissante en compression	$\sigma_c^{(3)} = \left\{ \frac{2 + \gamma_c f_c \epsilon_{cl}}{2 f_c} - \gamma_c \epsilon_c + \frac{\gamma_c \epsilon_c^2}{2 \epsilon_{cl}} \right\}^{-1}$
Contrainte post élastique en traction	$\frac{\sigma_t(w)}{f_t} = \left[1 + \left(\frac{c_1 w}{w_c} \right)^3 \right] e^{-c_2 \frac{w}{w_c}} - \frac{w}{w_e} (1 + c_1^3) e^{-c_2}$
Dommages en compression	$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\epsilon_c^{pl} \left(\frac{1}{b_t} - 1 \right) + \sigma_c E_c^{-1}}$
Dommages en traction	$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_c^{-1}}{\epsilon_t^{pl} \left(\frac{1}{b_t} - 1 \right) + \sigma_t E_c^{-1}}$

IV.5.1.2. Identification des paramètres du modèle

Les paramètres principaux à définir soigneusement sont : la loi contrainte-déformation (puisque cette dernière permet de calculer les valeurs d'écrouissage) qui offrent à l'algorithme du modèle une bonne capacité de convergence. Les paramètres du modèle numérique du béton utilisé dans notre étude numérique sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau IV.3 : Paramètres utilisés pour définir le comportement du béton fibré.

Paramètres		Dénotation
Notations	Valeur	
f_c (Mpa)	33.41	Contrainte en compression
$f_{c0} \times 0.3 f_c$ (Mpa)	10.023	Contrainte élastique en compression
V_{c1} (‰)	2.2	Déformation au pic en compression
$f_{t0} \times 0.6 \Gamma 0.06 f_c$ (Mpa)	2.604	Contrainte maximale en traction
V_{tm} (‰)	1.2	Déformation correspondante à f_{t0}
$E \times 11000 (f_c)^{1/3}$ (Mpa)	32000	Module de Young instantané
ϵ	0.20	Coefficient de poisson

Tableau IV.4 : Valeur contraintes-déformations plastique et d'endommagement à la compression et à la traction du béton.

Compression			Traction		
c (Mpa)	ϵ_p (‰)	d_c	c (Mpa)	ϵ_p (‰)	d_c
14.25	0.000	0.000	2.100	0.0000	0.000
19.42	0.0025	0.3352	0.4555	0.0067	0.4744
07.64	0.0043	0.5569	0.1445	0.0015	0.7317
02.16	0.0069	0.7158	0.0509	0.0026	0.8465
00.98	0.0123	0.8412	0.0151	0.0031	0.9207

IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le code de calcul ABAQUS, en résumant les actions principales à effectuer pour créer nos modèles. Il nous a permis de simuler le comportement mécanique de la poutre en béton fibré (homogène).

Le logiciel ABAQUS est un logiciel de calcul basé sur la méthode des éléments finis. Une fois le système d'équations à résoudre formulé, nous avons explicité les schémas de résolution disponible dans ABAQUS, nous avons par la suite présenté les modèles étudiés du côté géométrique et caractéristique des matériaux.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail de recherche, une étude numérique est réalisée en utilisant le code ABAQUS. L'étude est basée sur la méthode des éléments finis, L'objectif de la présente étude était d'approfondir les connaissances sur le comportement des éléments en béton portés à des températures élevées ainsi que trouver des moyens d'amélioration du béton vis-à-vis de son instabilité thermique et de ses performances mécaniques.

L'utilisation de fibres de polypropylène et de fibres métalliques a été donc envisagée. Nous avons étudié l'influence de chacune des natures de fibres employées (BFPP-BFM), puis l'influence couplée des deux types de fibres (BFMPP). En effet, des bétons témoins sans fibres (BT), des bétons de fibres de polypropylène, des bétons de fibres métalliques et puis enfin des bétons avec mélange de fibres métalliques et fibres de polypropylène ont été modélisés numériquement.

D'après, les résultats obtenus on constate une bonne concordance des résultats numériques en termes du comportement global de la poutre sous chargement de flexion.

L'analyse des graphiques force-déplacement obtenus lors de la simulation numérique et les cartographies de l'évolution des dommages sous l'effet des différentes températures (20°,200°,450°) nous permet de tirer les conclusions suivantes :

- La résistance des différents bétons étudiés (BT, BFPP, BFM, BFMPP) évolue en fonction de la température. A 200°C les bétons ont une meilleure résistance et à 450°C, on constate une chute rapide de résistance.
- Pour le béton avec association de fibres métalliques-polypropylènes (BFMPP), la capacité de résistance à l'effort appliqué est largement supérieure à celle du béton témoin BT (sans fibres), cela s'explique par l'apport en termes de résistance des fibres dans le béton permettant de ralentir la propagation des fissures, offrant ainsi une certaine amélioration du comportement du béton en traction.
- Le béton témoin connaît un endommagement plus important qui se propage sur la zone tendue comparativement aux poutres renforcées de fibres. Nous constatons que les poutres en béton renforcées par des fibres de propylène et métalliques sont accompagnées par une diminution des dommages

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]- **DUPAIN R., LANCHON R., SAINT-ARROMAN J.C.** (2000); Granulats, sols, ciments et bétons, Edition Casteilla, Paris, 236 p
- [2]- **CIMBETON** (2006); Les bétons: formulation, fabrication et mise en œuvre, Paris.
- [3]- **OUCHI M.** (1999) ; State-of-the-art report on self-compactability evaluation, Concrete Engineering Series, N° 30, Japan, pp. 111-120.
- [4]- **CHANVILLARD G., d'ALOIA L.** (1994) ; Préviation de la résistance en compression au jeune âge du béton, Application de la méthode du temps équivalent, Bull. Liaison Lab. Ponts et Ch., 1994, 193, 39-51
- [5]- **NGUYEN T.L.H.** (2007) ; Outils pour la modélisation de la mise en œuvre des bétons, Thèse de Doctorat à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, décembre, 139 p.
- [6]- **TATERSALL G.H., BANFILL P.G.F.** (1983) ; The Rheology of Fresh Concrete, Pitman, London
- [7]- **AFNOR.** (2002) ; Béton et constituants du béton. Tome 1 : Spécifications du béton et de ces constituants, 5e édition, Paris, 431 p.
- [8]- **EL BARRAK M., MOURET M., BASCOUL A.** (2008); Self-compacting concrete paste constituents : Hierarchical classification of their influence on flow properties of the paste, Cement & Concrete Composites.
- [9]- **AİTCIN P.C.** (2001) ; Bétons haute performance, Editions Eyrolles, France, 683 p
- [10]- **LAPOINTE R.** (1997) ; Contribution à l'étude des méthodes d'injections des fissures dans le béton, Mémoire des études graduées, Université McGill, Montréal, Canada, mai.
- [11]- **Norme Française P18-303**, (1999), Eau de gâchage pour béton, Éditions AFNOR, Paris, 1999
- [12]- **DREUX G., FESTA J.** (1998) ; Nouveau guide du béton et ses constituants, éditions Eyrolles ; Paris, 409 p
- [13]- **DE LARRARD F.** (2000); Structures granulaires et formulation des bétons, traduit de l'anglais par LECOMTE A., Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Paris, 414 p.
- [14]- **AHMED Faycel**, (2015) ; Conception d'un béton destiné aux ouvrages hydropiques.
- [15]- **NEVILLE A.M.** (2000) ; Propriétés des bétons, ed. CRIB., Paris, Eyrolles, 806 p.
- [16]- **GALLIAS J.L., KARA-ALI R., BIGAS J.P.** (2000) ; The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes, Cement and Concrete Research 30, pp.

Références bibliographiques

1543-1549

[17]- **BOUFEDAH BADISSI**, Influence de la granularité (classe granulaire 4/22.4) sur les caractéristiques des granulats et sur les propriétés des bétons ordinaire, thèse de magister ; université Mentouri Constantine.

[18]- **Pierre ROSSI** (TUNNELS ET ESPACE SOUTERRAIN - n°218 - Mars/Avril 2010)

[19]- **Asquapro.**, Utilisation des bétons projetés pour la réparation et le renforcement des structures Comité Technique Asquapro Fascicule technique ASQUAPRO page 7 Version 2014

[20]- **ROSSI, 2005** (ROSSI, P., ARCA, A., PARANT, E., FAKHRI, P. (2005), Bending and Compressive Behaviors of a New Cement Composite, Cement and Concrete Research, no 35, p. 27–33)

[21]- **Mohammad Dalour Hossen Beg.**, The Improvement of Interfacial Bonding, Weathering and Recycling of Wood Fibre Reinforced Polypropylene Composites; These de doctorat, University of Waikato, Hamilton, New Zealand, 2007.

[22]- **ABQ**; Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton réalisé par Association Béton Québec, janvier 2005, p 9

[23]- **HUGHES, FATTUCHI**, « the workability of steel fiber reinforced concrete » GB. MAGAZINE of concrete recherché, vol.28 N°96 1981.

[24]- **DEHOUSSE, N ; VANSTERMANS, A ; KUYKENS, T** ; 1974 les mortiers et bétons renforcés de fibres d'acier, Bruxelles , CSTC Revue N°2 1974.

[25]- **SERNA ROSS**, (1984), étude de la contribution des fibres métalliques à l'amélioration du comportement du béton au cisaillement thèse de doctorat de l'ENPC 1984)

[26]- **Cotterell B., Mai Y.W.**, (1996) "Fracture Mechanics of Cementitious Materials. Blackie, Academic & Professional", London/Chapman and Hall. p. 294.

[27]- **Youcef FRITIH**; Thèse de doctorat sur Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton auto plaçant armé. [Yousef FRITIH] pp19 Le 08 Juillet 2009

[28]- **Grunewald S., Walraven J.C.**, (2001) "Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete", Cement and Concrete Research vol.31, pp. 1793-1798

[29]- **Johnston C.D.**, (1996) "Proportioning, mixing and placement of fibre-reinforced cements and concretes, Production Methods and Workability of Concrete", proceedings of the international RILEM conference, edited by Bartos, Marrs and Cleland, E&FN Spon, London, pp. 155-179.

Références bibliographiques

- [30] **Johnston C.D.**, (2001) "Fiber-Reinforced Cements and Concretes", Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, 368 pages ISBN: 9056996940.
- [31]- **JEJCIC.O : ZANGHLLINE .F** 51977). Mortier et ciment armé de fibres : une étude bibliographique, annales l'T.T.B.T.P., suppl. N°347 série matériaux 51, pp 46-87.
- [32]- **MEDDAHI KAMEL, Mme MEDDAHI NACIRA Née REZGUI**, (2015); Comportements des bétons renforcés pa des fibres métalliques, methodologie et hypothèse de recherche.
- [33]- **Baron J., Lesage R.** (1969), Compacité et maniabilité des bétons hydrauliques. Rapport de Recherche LPC n°3.
- [34]- **Tabet Nesrine.**, Thèse de magistère, contribution à l'étude de l'influence de la nature et dimensions des fibres sur le comportement physico-mécanique des bétons autoplacants fibrés (BAPF) 2012.
- [35]- **Casanova P.**, (1996), "Bétons renforcés de fibres métalliques du matériau à la structure", LCPC.
- [36]- **Casanova P., Rossi P.**, (1997), "Analysis and Design of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams", ACI Structural Journal, Vol.94, No.5, pp.595-602.
- [37]- **Bonzel J., Schmidt M.** (1986), Distribution and orientation of steel fibres in concrete and their influence on the characteristics of steel fibre concrete, FRC-86, Development in Fiber Reinforced Cement and Concrete, RJLEM Symposium, Sheffield, vol. 1.
- [38]- **Harrouche N.** (1989), Formulation et comportement à la fissuration des bétons de fibres métalliques, thèse de Docteur - Ingénieur de l'université de Paris VI.
- [39]- **S. Oller, E. Onate, J. Oliver, and J. Lubliner** "Finite element nonlinear analysis of concrete structure using a plastic-damage model," Engineering Fracture Mechanics, vol. 35, pp. 219-231, 2001.
- [40]- (**Swamy R. N., Mangat P. S.**, (1974b), Influence of fiber geometry on the properties of steel fiber reinforced concrete, Cement and Concrete Research, vol. 4, n° 3, pp. 451 - 465.
- [41]- **Rossi P.** (1998), Les bétons de fibres métalliques, Ponts et Chaussées, Paris, 309p.
- [42]- **Abdul Ghaffar1, Amit S. Chavhan, Dr.R.S.Tatwawadi3** Steel Fibre Reinforced Concrete, ISSN: 2231-5381 [Http://www.ijettjournal.org](http://www.ijettjournal.org) Page 791 International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 9 Number 15 - Mar 2014
- [43]- **Swamy R. N.** (1975), Fiber reinforcement of cement and concrete, Matériaux et Constructions, n°45, mai -juin, pp. 235-254.

Références bibliographiques

- [44]- **F. Setti 1, K. Ezziane 1, B. Setti 2, F. Merzoug**, Étude Du Comportement Des Poutres En Béton Renforce De Fibres Métalliques Sous Chargement Monotone Croissant. Colloque international «réduction du risque sismique» chlef les 10 et 11 octobre 2012
- [45]- **Bensaid BOULEKBACHE1, Mustafa HAMRAT, Mohamed CHEMROUK, Sofiane. AMZIANE**. Comportement des bétons fibrés à la flexion : influence des fibres et de la résistance à la compression. 31èmes Rencontres de l'AUGC, E.N.S. Cachan, 29 au 31 mai 2013.
- [46]- (**G.DREUX et FESTA** (1995) « nouveau guide de béton et de ses constituants édition EYROLLES 7ime édition 1995).
- [47]- **Ali ELLOUZE, Mongi BEN OUEZDOU1, Mohamed Ali KARRAY, Aouicha BEDDEY**, Étude des Bétons à Fibres renforcés par des Fibres Métalliques à Base de Matériaux Locaux. Colloque CMEDIMAT 2005, 06 et 07 Décembre 2005.
- [48]- **R.N. Swang et P.S. Mangat** (1974), "Compatibility of steel fibre reinforced concrete", Vol. 8, N°5, pp. 34-35.].
- [49]- **Djebali 2013**, Thèse de doctorat soutenue en 2013. Caractérisation des éléments de structures en béton de fibre métalliques Djebali Saïd.
- [50]- www.lejdd.fr/Societe/Images/Galerie-du-8-Decembre-au-14-Decembre-2008/tunnel-manche-travaux-incendie-35953/.
- [51]- www.debunking911.com/madrid.htm.
- [52]- **Hager, I.**, Comportement à haute température des bétons à haute performance-évolution des principales propriétés mécaniques, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et Ecole Polytechnique de Croatie, 2004.
- [53]- **Harmathy, T.Z.**, Moisture in materials in relation to fire test, ASTM, Special Technical Publication, n° 385, 1964, pp. 74-95.
- [54]- **Hertz K.**, limits of spalling of fire – exposed concrete. Fire Safety Journal, Vol. 38, 2003, pp. 103-116.
- [55]- **Noumowé, N.**, Temperature Distribution and Mechanical Properties of High-Strength Silica Fume Concrete at Temperatures up to 200°C, ACI Materials Journal, Title n° 100-M39, pp. 326-330.
- [56]- **Both, R.**, The behaviour of unprotected loaded concrete tunnel liningssubjected to RWS hydrocarbon fire, TNO report 2000-R01360, 2000.
- [57]- **Haddad, R.H.**, Al-Saleh, R.J., Al-Akhras, N.M., Effect of elevated temperature on bond between steel reinforcement and fiber reinforced concrete, Fire Safety Journal, doi:10.1016/j.firesaf.2007.11.002, 2007.

Références bibliographiques

- [58]- **ArupFire, HSE**, Fire resistance of concrete enclosures, Work Package 1: data collection, Work Package 2: spalling categories, Work Package 5 and 6: Heat transfer modeling in response to two of the HSE design fires, Work Package 7: look-up tables, Work Package 8: spalling guidance, RevB, 2005.
- [59]- **Mindeguia, J-C.**, Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons, Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2009.
- [60]- **Menou, A.**, Etude du comportement thermomécanique des bétons à haute température: approche multi échelles de l'endommagement thermique, Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2004.
- [61]- **Pigeon, M., Cantin, R.**, Flexural properties of steel fiber-reinforced concretes at low temperature, *Cement and Concrete Composites*, 20, 1998, pp. 365-375.
- [62]- **Diederichs, U., Jumppanen, U.M.**, High temperature properties and spalling behaviour of high-strength concrete, *Verlog für architektur und techn.wissencheften*, Ernst & schn, 1992, pp. 191-197.
- [63]- **Phan, L.T., High-strength** concrete at high temperature- an overview, National institute of standards and technology, High performance concrete 6th International symposium proceeding, Vol. 1, 2002. **Phan, L.T., Carino, N.J.**, Codes provisions for high strength concrete strength – temperature relationship at elevated temperature, National institute of standards and technology, *Materials and Structures*, Vol. 36, N°256, 2003, pp. 91-98.
- [64]- **Khoury, G. A.**, Compressive strength of concrete at high temperatures: areassessment, *Magazine of Concrete Research* 44, n°161, 1992, pp. 291- 309.
- [65]- **Dias, W.P.S, Khoury, G.A, Sullivan, P.J.E**, Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperature up to 700°C, *ACI Materials Journal*, title n°87-M18, 1990.
- [66]- **Kanéma, M.**, Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons, Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2007.
- [67]- **Min, Li, Chun xiang, Q., Sun, W.**, Mechanical properties of high-strength concrete after fire, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2004, pp. 1001-1005
- [68]- **Harada, T., Takeda, J., Yamane, S., Furumura, F.**, Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures, *International seminar on concrete for nuclear reactors*, Germany, Vol. 1, 5 October 1970, pp. 377-406.
- [69]- **Hammer, TA.**, High strength concrete, phase 3, SP6 fire resistance report 6.2, Spalling reduction through material design, SINTEF report STF70 F92156, Trondheim, Norway, 1992.

Références bibliographiques

- [70]- **Komonen, J., Penttala, V.**, Effect of high temperature on the pore structure and strength of plain and polypropylene fiber reinforced cementpastes, *Fire Technol* 2003, 39(1), pp. 23-34.
- [71]- **Kalifa, P., Pardon, D., Menneteau, F-D., Gallé, C., Chené, G., Pimienta P.**, Comportement à haute température des bétons à haute performances : de l'éclatement à la microstructure, *Cahier du CSTB*, n°3435, Décembre2002.
- [72]- **Mindeguia, J-C.**, Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons, Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2009.
- [73]- **Sabeur, H.**, Etude du comportement du béton à hautes températures, une nouvelle approche thermo-hydro-mécanique couplée pour une modélisation du fluage thermique transitoire, Thèse de doctorat, Université de Marne La Vallée, 2006.
- [74]- **Castillo, C., Durrani, A.J.**, Effect of transient high temperature on highstrength concrete, *ACI Materials Journal*, title n°87-M7, 1990, pp. 47-53.
- [75]- **Pimienta, P.**, Le comportement au feu des BHP, Synthèse des travaux du projet national BHP 2000 sur les bétons à hautes performances, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp. 77-124.
- [76]- **BOUAZIZ Lynda** 2015, « Etude du comportement mécanique des bétons fibrés soumis à de hautes températures » à l'UMMTO.

Introduction générale

Chapitre I: Généralités sur le béton

Chapitre II: Le béton fibré

Chapitre III :

Dégradation du béton à haute température

Chapitre IV : Généralités sur ABAQUS et simulation

Chapitre V :

Résultats et interprétations

Conclusion générale
