

RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté du Génie de la Construction

Département Génie civil

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme de Master Académique en génie civil

Option : Structure

Thème

**Comportement expérimental et numérique de
l'élément poutre avec ajout de poudre de verre
comme remplaçant partiel du ciment**

Réaliser par :

INGRACHEN Amirouche

OULD HAMMOU Ramdane

Devant :

Mr. MEHADDENE.R

Mr. ATLAOUI.

Mr. GHOUILEM. K

Mr. BOUKAIC

Dirigé par :

GHOUILEM.K

UMMTO

UMMTO

UMMTO

UMMTO

Président

Examineur

Promoteur

Inviter

Promotion 2022/20223

Remerciements

On remercie tout d'abord Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et les moyens afin de mener à terme ce travail.

*Nos vifs remerciements s'adressent à notre promoteur **Mr. GHOULEM.K** pour sa disponibilité, son orientation et ses encouragements qui ont été pour nous une source constante de motivation*

*Nous tenons à témoigner également notre considération et notre remerciement à **Mr. MEHADDENE.R** qui a su nous transmettre sa gentillesse et sa rigueur scientifique dans l'exercice de sa profession*

*Nos remerciements s'étendent également à **Mr. BOUHRAOUA** pour leurs disponibilités et le soutien qu'il nous ont accordé*

Nous remercions l'ensemble des enseignants du département de génie civil

Nous remercions les membres de jury qui nous ont honoré de juger notre travail

Nos remerciements s'adressent chaleureusement à tous nos amis et toute personne qui a contribué à la réussite de ce mémoire

Grand merci à vous tous

Dédicaces

Je tiens à dédier ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance en témoignage de ma profonde affection :

En premier lieu, Au prunelles de mes yeux, mes chers parents qui m'ont soutenu et veillé sur ma bonne éducation et ma réussite dans la vie. Je leur présente toute ma reconnaissance et mon profond amour et respect.

A ma grand-mère.

A mes chères sœurs Yasmina Linda et Assia.

A mes meilleure amis Hanane pour son aide constante et sa disponibilité absolue dans tous j'entretiens

Younes qui j'ai perdue pas longtemps. Tu resteras à jamais dans mon cœur. je vous présente mes sincères condoléances.

Ali, Zaki, Slimane, Thamila, Linda, Lyes, Smail, Sofiane, Hamza

A mon binôme Ramdane pour ses efforts et son dévouement dans la réalisation de ce travail.

Ainsi qu'à tous ceux qui ont attribués de près ou de loin à la réalisation de cette précieuse étude.

A toute la Promotion structure.

Amirouche

Dédicaces

Je tiens à dédier ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance en témoignage de ma profonde affection :

En premier lieu, Au prunelles de mes yeux, mes chers parents qui m'ont soutenu et veillé sur ma bonne éducation et ma réussite dans la vie. Je leur présente toute ma reconnaissance et mon profond amour et respect.

A ma grand-mère.

A ma femme.

A ma fille Eline.

A mes chères sœurs et frère Kamylia, lyna, rayane et karim.

A mon meilleur ami et frère MOUHADI Rabeh, notre poète, dieu te bénie et te garde pour tes parents.

A mon binôme Amirouche, pour l'épreuve de son sérieux, travail et courage .

Ainsi qu'à tous ceux qui ont attribués de près ou de loin à la réalisation de cette précieuse étude.

A tout la promotion structure

Ramdane

Résumé :

Le réchauffement climatique est le problème de ce siècle, il est due à la négligence et le non-respect de la nature. La dégradation de cette dernière c'est fait au cour des siècles, mais malheureusement la solution demandée doit se faire au plus vite possible. Cela nous incite à chercher des solutions pour contenir le taux élevé de déchet existant, diminuer au maximum le taux de gaz carbonique produit chaque année et de prévoir des solutions au mauvaises habitudes environnementale comme solution à long-terme. Dans notre travail de recherche, nous avons prévus une solution pour recycler le maximum de déchet de verre qui pollue la nature et au même temps de diminuer les quantités de ciment portland connue par son taux élevé d'émission de dioxyde de carbone. Notre recherche actuel porte sur l'étude expérimental et la modélisation numérique du comportement des poutres en flexion et des cylindres en compression en béton contenant de la poudre de verre. Ce faisant, un protocole expérimental a été réaliser pour valoriser les déchets de verre par substitution partiel du ciment afin de réduire les niveaux de consommation. De plus, les déchets utilisés sous le verre réparti dans l'environnement. Les niveaux de 10%, 20% ont été utiliser pour remplacer le ciment. Les résistances mécaniques ont été réaliser à 28 jours. Les résultats obtenus confirment que l'utilisation de ce type de déchet à des doses précises augmente la résistance à la compression et la capacité portante à la flexion du béton. Les résultats expérimentaux et numériques obtenues en terme d'évolution des contraintes des différentes poutres son présenter et discuter. Les résultats représentent révélation prometteuse quant à l'amélioration en terme de rigidité des éprouvettes étudiées. En fait, la confrontation des résultats expérimentaux et numérique montre un accord satisfaisant.

Mots clés :

Réchauffement climatique, nature, déchets de verre, poudre de verre, ciment, contraintes, rigidité.

Abstract :

Global warming is the problem of this century, caused by neglect and disrespect for nature. The degradation of nature has been going on for centuries, but unfortunately the solution must be found as quickly as possible. This prompts us to look for solutions to contain the existing high rate of waste, to reduce the rate of carbon dioxide produced each year as much as possible, and to provide solutions to bad environmental habits as a long-term solution. In our research work, we have planned a solution to recycle the maximum amount of glass waste that pollutes nature, and at the same time to reduce the quantities of portland cement known for its high rate of carbon dioxide emissions. Our current research focuses on the experimental study and numerical modeling of the behavior of beams in bending and cylinders in compression made of concrete containing glass powder. In doing so, an experimental protocol has been developed to recover glass waste by partial substitution of cement in order to reduce consumption levels. In addition, the waste used is the glass distributed in the environment. Levels of 10%, 20% were used to replace cement. Mechanical strengths were measured at 28 days. The results obtained confirm that the use of this type of waste in precise doses increases the compressive strength and flexural strength of concrete. The experimental and numerical results obtained in terms of stress evolution of the different beams are presented and discussed. The results are promising in terms of improving the stiffness of the specimens studied. In fact, the comparison of experimental and numerical results shows satisfactory agreement.

Key words:

Global warming, nature, glass waste, glass powder, cement, constraints, rigidity.

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE	13
Chapitre I Les déchets utiliser dans le béton	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition des déchets.....	3
I.3 Recyclage des déchets.....	4
I.4 Les techniques de recyclage	5
I.4.1 Procédés de recyclage	5
I.4.2 La chaine recyclage.....	5
I.4.2.1 Collectes des déchets	5
I.4.2.2 Transformation.....	6
I.4.2.3 Commercialisation et consommation.....	6
I.5 Déchets des utilisés dans le domaine du génie civil.....	6
I.5.1 Laitiers	6
I.5.2 Déchets divers [4].....	6
I.6 Recyclage des déchets de verre	9
I.6.1 La poudre de verre	9
I.6.1.1 Les propriétés de la poudre de verre	10
• Propriété physique	10
Le verre récupéré dans les installations de traitement des déchets peut avoir une densité spécifique perméabilité variant de 10^{-1} à 10^{-2} cm/sec. Donc on peut le considérer comme un matériau très perméable similaire au sable grossier, comme montré ci-dessous dans le tableau (I-3). [9]	10
I.6.1.2 Les caractéristiques physiques de poudre de verre	11
I.6.2 Le béton écologique	11
I.6.2.1 Définition de béton écologique	11
I.6.2.2 Les consistance d'un béton écologique.....	12
I.6.3 Le verre dans le béton	12
I.6.4 Les réactions Alkali-Silica (RAS)	13
I.6.5 La réaction pouzzolanique de la poudre de verre dans le béton	14
I.6.6 Effet de la température de durcissement sur les propriétés d'hydratation de la poudre de verre dans les matériaux à base du ciment.....	14
I.7 Conclusion	15

Chapitre II Les mécanismes des fissures

II.1	Introduction.....	16
II.2	Comprendre la mécanique des fractures.....	16
II.3	Comprendre les modes de rupture.....	17
II.4	Comprendre le calcul des paramètres de la mécanique de la rupture.....	17
II.4.1	Intégrale J.....	17
II.4.1.1	L'intégrale J comme facteur d'intensité de contrainte.....	18
II.4.1.2	Taux de libération d'énergie.....	19
II.4.2	Facteur d'intensité des contraintes.....	20
II.4.3	C*-intégral.....	21
II.5	Comprendre la simulation de la croissance des fissures.....	21
II.5.1	Résolution des problèmes de mécanique des fractures.....	21
II.5.2	Modélisation de la région de la pointe de la fissure.....	22
II.5.3	Modélisation de problèmes de fractures élastiques linéaires 2-D.....	23
II.5.4	Modélisation des problèmes de fractures élastiques linéaires 3-D.....	24
II.6	Calcul des paramètres de fracture.....	24
II.7	Simulation de la croissance d'une fissure basée sur la technique VCCT.....	26
II.8	Processus de simulation de la croissance des fissures par VCCT.....	27
II.8.1	Étape 1. Création d'un modèle d'éléments finis avec un chemin de fissure prédéfini.....	27
II.8.2	Étape 2. Calcul du taux de libération d'énergie.....	28
II.8.3	Étape 3. Effectuer le calcul de la croissance de la fissure.....	29
II.8.3.1	Étape 3a. Initier l'ensemble de croissance de fissure.....	29
II.8.3.2	Étape 3b. Définition de la trajectoire de la fissure.....	29
II.8.3.3	Étape 3c. Spécification de l'ID de calcul de la fissure et du critère de fracture.....	30
II.9	Extension des fissures.....	30
II.10	Critères de rupture.....	31
II.11	Conclusion.....	32

Chapitre III L'investigation Expérimentale

III.1	Introduction.....	33
III.2	Caractérisation des matériaux utiliser.....	33
III.2.1	Constituants du béton.....	33
III.2.1.1	Ciment.....	33
III.2.1.2	Granulats.....	33
III.2.1.3	Eau.....	34
III.2.2	Ajouts minéraux micronisation de la poudre de verre.....	35

III.3	Fabrication du béton	35
III.4	Essais sur béton durci	38
III.4.1	Essais de flexion a trois points.....	38
III.4.2	Essais de résistance à la compression	39
III.5	Conclusion	40

Chapitre IV Interprétation des résultats

IV.1	Introduction.....	41
IV.2	Présentation des résultats du béton	41
IV.2.1	Résistance en compression des bétons à 28 jours	41
IV.2.2	Courbes contrainte-déformation	43
IV.2.3	Détermination du module d'élasticité E.....	44
IV.3	Résistance en flexion des bétons	44

Chapitre V Modélisation du fluage avec fissure mécanique

V.1	Introduction.....	47
V.2	Mécanismes de fluage. Effet de la température sur la microstructure du matériau.....	48
V.2.1	Mécanismes à basses températures	48
V.2.2	Mécanismes à hautes températures.....	49
V.2.3	Cas particulier du micro fluage.....	50
V.2.4	Cavitation lors du fluage tertiaire et rupture	50
V.3	Présentation du logicielle ANSYS.....	51
V.3.1	Procédures de modélisation.....	52
V.4	Procédure de modélisation du fluage par Ansys.....	55
V.4.1	Formulation du fluage et discrétisation de la structure en éléments finis	55
V.5	Procédure de modélisation de fissure par Ansys	59
V.6	Conclusion	69

Conclusion générale	770
----------------------------------	------------

Références

Liste des figures

Chapitre I Les déchets utiliser dans le béton

Figure I-1 : Déchets de Verre dans une décharge. [5].....	3
Figure I-2:le cycle de recyclage des déchets. [5]	5
Figure I-3 :les boues rouges [5].....	8
Figure I-4 : Transformation des déchets de verre en poudre de verre. [5].....	9
Figure I-5:mage MEB d'une particule de verre montrant une formation RAS dans la frontière de la particule. [5].....	13

Chapitre II Les mécanismes des fissures

Figure II-1 : schéma des modes de fracture.	17
Figure II-2:la contrainte de traction (σ).....	19
Figure II-3: schéma d'une pointe de fissure.	20
Figure II-4: le pointe de fissure et front de la fissure.	22
Figure II-5: Exemples d'éléments singuliers.	23
Figure II-6:Spécimen de fracture et modèle EF 2-D.....	23
Figure II-7 : Le chemin de fissure prédéfini est discrétisé avec des éléments d'interface.	28
Figure II-8: La croissance et fusion des fissures.	30
Figure II-9: l'extension des fissures 2-D et 3-D	31

Chapitre III L'investigation Expérimentale

Figure III-1: constituants du béton	34
Figure III-2: micronisation de verre	35
Figure III-3: confection , moulage et démoulage des éprouvettes.	37
Figure III-4: conservation des éprouvettes dans l'eau pendant 28 jours.	37
Figure III-5: la machine de flexion à trois points.....	38
Figure III-6: éprouvette après écrasement(vue de prés sur coté).	38
Figure III-7:la machine de compression.....	39
Figure III-8: éprouvette après écrasement.....	39

Chapitre IV Interprétation des résultats

Figure IV-1:Résistance à la compression des bétons.	42
Figure IV-2: courbe contrainte-déformation à la compression du béton témoin et du	43
Figure IV-3: courbe force-flèche pour la flexion des différents variantes de béton	45
Figure IV-4: résistance à la flexion des bétons	46

Chapitre V Modélisation du fluage avec fissure mécanique

Figure V-2:courbe de fluage	48
Figure V-1:Variation de la vitesse de Déformation [36].....	48
Figure V-3:Schéma d'une structure cellulaire.....	49
Figure V-4:Cavitation entre grains.....	51
Figure V-5: Coalescence des cavités le long des joints de grain.....	51
Figure V-6:Donner un titre à l'analyse	53
Figure V-7:Choix d'unité des paramètres.	53
Figure V-8:Interface d'introduction des propriétés des matériaux	54
Figure V-9:Module de Young et le coefficient de Poisson du béton bitumineux	54
Figure V-10:Introduction des Constantes de fluage.....	55
Figure V-11:Introduction de la loi de comportement au fluage.....	57

Figure V-12:Discrétisation de la poutre en Elément Finis PLANE 182 (ANSYS Technology Guide 7).....	57
Figure V-13:Contour de déformations au fluage « ϵ_x^{fl} »	58
Figure V-14:Contour de déformations au fluage « ϵ_y^{fl} »	58
Figure V-15:Courbe de fluage « ϵ_y^{fl} » selon l'équation V.1	59
Figure V-16 : (a) Variation des contraintes autour de la fissure, (b) Contraintes en coordonnées polaire.....	60
Figure V-17:Trois Modes de Fractures	61
Figure V-18:Modélisation de la fissure avec les éléments PLANE 183	62
Figure V-19:Variation des contraintes selon le Mode I	63
Figure V-20:Variation des contraintes selon le Mode I	64
Figure V-21:Contour des déplacement U_x	65
Figure V-22:Contour des déplacements U_y	66
Figure V-23:Contour de déformations du fluage dans le plan XY	66
Figure V-24:Contour de la 1er Déformation principale du fluage « ϵI^{fl} »	67
Figure V-25:Contour de la 2eme Déformation principale du fluage « ϵII^{fl} ».....	68
Figure V-26:Contour de la 3eme Déformation principale du fluage « ϵIII^{fl} »	68

Liste des tableaux

Chapitre I Les déchets utiliser dans le béton

Tableau I-1:type de verre et ses principales utilisation(1)	4
Tableau I-2:les avantages et inconvenantes de la poudre de verre.....	10
Tableau I-3 :les propriétés physique de poudre de verre.	10
Tableau I-4: les composition chimique poudre de verre.	11
Tableau I-5: les caractéristiques physique de poudre de verre.....	11
Tableau I-6: les avantages et les inconvenantes d'un béton écologique.....	12

Chapitre II Les mécanismes des fissures

Tableau II-1:les éléments pour le calcul des paramètres de fabrication.....	25
---	----

Chapitre III L'investigation Expérimentale

Tableau III-1: dosage des constituants du béton pour le programme experimental.....	34
Tableau III-2 :les quantités des matériaux utilisées pour les différents essais.	36

Chapitre IV Interprétation des résultats

Tableau IV-1:Notations et compositions des éprouvettes de béton en poudre de verre(PV)...	41
Tableau IV-2:résultats des essais de compression des bétons étudiés.	42
Tableau IV-3 : le module d'élasticité E	44
Tableau IV-4: résultats de résistance moyenne à la flexion, la force et la flèche au pic des bétons étudiés.	44
Tableau IV-5 :valeurs maximal de la flèche des différents bétons.	45

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Le béton est actuellement considéré comme le matériau le plus utilisé dans la construction dans le monde entier. Néanmoins, l'acquisition de granulats et la fabrication de ciment ont entraîné des risques environnementaux considérables. Des approches modernes sont utilisées maintenant ou à l'avenir pour réduire la pollution de l'environnement en Eco-établissant les déchets dans le mélange avec du ciment ou des granulats pour éviter un impact nocif sur l'environnement.

Le verre est l'un des matériaux les plus importants et les plus utilisés au monde. Le verre usagé peut-être recyclé pour la production de nouveaux articles en verre en étant tamisé, nettoyé et retraité. Ils finissent généralement dans des décharges ou des stocks en raison des contaminants, de la couleur, de la variété des types et du manque d'équipement de criblage. Les déchets de verre constituent une menace pour l'environnement dans de nombreuses décharges actives à travers le monde. Cela est principalement dû au caractère non biodégradable des déchets de verre et à la disponibilité limitée de grandes surfaces pour de nouvelles décharges dans les villes urbaines très peuplées.

Par conséquent, l'utilisation de ces déchets est une option bien améliorée pour préserver les ressources naturelles en économisant de l'énergie et de l'argent, et en minimisant la surface des décharges. L'industrie du béton est devenue l'une des principales approches pour faire face aux conséquences environnementales de l'accumulation de déchets de verre en raison de la nécessité d'énormes quantités, de faible qualité et de vastes chantiers de construction. Des recherches récentes ont révélé que l'un des plus gros utilisateurs de nombreux sous-produits industriels est désormais l'industrie du béton. En raison de sa consommation importante de matières premières et de son activité de construction élevée, le secteur de la construction offre l'une des alternatives les plus séduisantes pour l'utilisation de matériaux recyclés.

Le béton renforcé par la poudre de verre est un matériau innovant qui présente des avantages par rapport au béton traditionnel. La poudre de verre est utilisée comme moyen de renforcement du béton. Les caractéristiques de compression du béton sont beaucoup plus importantes que celles de la traction, ce qui peut entraîner des fissures dans le béton. La modélisation des fissures est donc importante pour comprendre le comportement du béton renforcé par la poudre de verre. En somme, la modélisation des fissures est importante pour comprendre le comportement du béton renforcé par la poudre de verre, et plusieurs études ont été adaptées sur la modélisation

Introduction générale

des structures en béton/béton armé ainsi que sur l'analyse et la modélisation des mécanismes d'endommagement et de déformation en fatigue multiaxiale de matériaux composites.

Afin d'aboutir aux objectifs visés, notre travail sera articulé autour de parties points :

La première partie de ce mémoire est une synthèse bibliographique qui comporte deux chapitres :

- En premier lieu, nous commencerons par définir les différents déchets utilisés dans les bétons et leur recyclage, ce qui constituera le premier chapitre ;
- Au cours du deuxième chapitre, nous avons défini les mécanismes de fissure et la rupture des structures ;

La deuxième partie est consacrée à l'étude expérimentale répartie en trois chapitres :

- Dans le troisième chapitre nous avons défini l'investigation expérimentale : principales étapes de l'expérimentation et les différentes variantes de l'étude considérées sont présentées.
- Le quatrième chapitre, on a présenté les résultats et interprétations et les différents résultats de notre étude ;
- Le dernier chapitre est consacré à la Modélisation du fluage avec fissure mécanique.

**Chapitre I Les
déchets utiliser dans
le béton**

Chapitre I Les déchets utiliser dans le béton

I.1 Introduction

Le verre est un matériau transparent formé par la fusion d'un mélange de plusieurs composants tel que la silice, les carbonates de sodium et les carbonates de calcium dans des températures très élevées, suivi par un refroidissement durant lequel la solidification se produit sans cristallisation.

I.2 Définition des déchets

Un déchet tout résidu d'un processus de protection, de transformation ou utilisation, Quand les déchets du verre sont concassés/broyés jusqu'à obtenir un sable dont la taille de ses particules et similaire à celle du sable naturel, il présente presque les propriétés d'un agrégat. Le verre est produit sous différentes formes : verre d'emballage, verre de lampes et verre d'écran de tubes à rayon cathodique (TRC) comme montré dans le tableau. (1)



Figure I-1 : Déchets de Verre dans une décharge. [5]

L'utilisation des produits en verre a connu un accroissement ces dernières années, qui a engendré de grandes quantités de déchets de verre. Néanmoins il existe deux types de déchets de verre (les déchets colorés et les déchets incolores). La plupart des déchets incolores sont généralement recyclables mais les déchets de verre colorés représentent un taux de recyclage très bas, d'où l'orientation de ces déchets vers les décharges qui sont très souvent insuffisantes et pose ainsi de sérieux problèmes écologiques.

Tableau I-1: type de verre et ses principales utilisation(1)

Les types de verre	Les principaux du produits
Verre sodocalique	Bouteille ,vaisselle, verre plat
Verre à base du plomb	Vaisselle en cristal, les écrans de télévision, les équipements à écran de visualisation
Verre en borosilicate	Fibre de verre isolation en laine, plats pour les four
Verre techniques par exemple ;alumino silicate, alkali barium	Scientifique optique

Comme le verre n'est pas biodégradable les sites de décharges ne fournissent pas de solutions environnementales, d'où la nécessité de trouver une utilisation à ces déchets. Nous nous proposons dans ce qui suit d'introduire les principales propriétés du verre ainsi que son utilisation dans le béton notamment comme ajout cimentaire.

I.3 Recyclage des déchets

Le recyclage est le procédé de traitement des différents types de déchets et des sous-produits qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Il constitue une activité importante dans les pays développés. Le recyclage a deux conséquences écologiques bénéfiques : la réduction du volume de déchets et préservation des ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. [1]

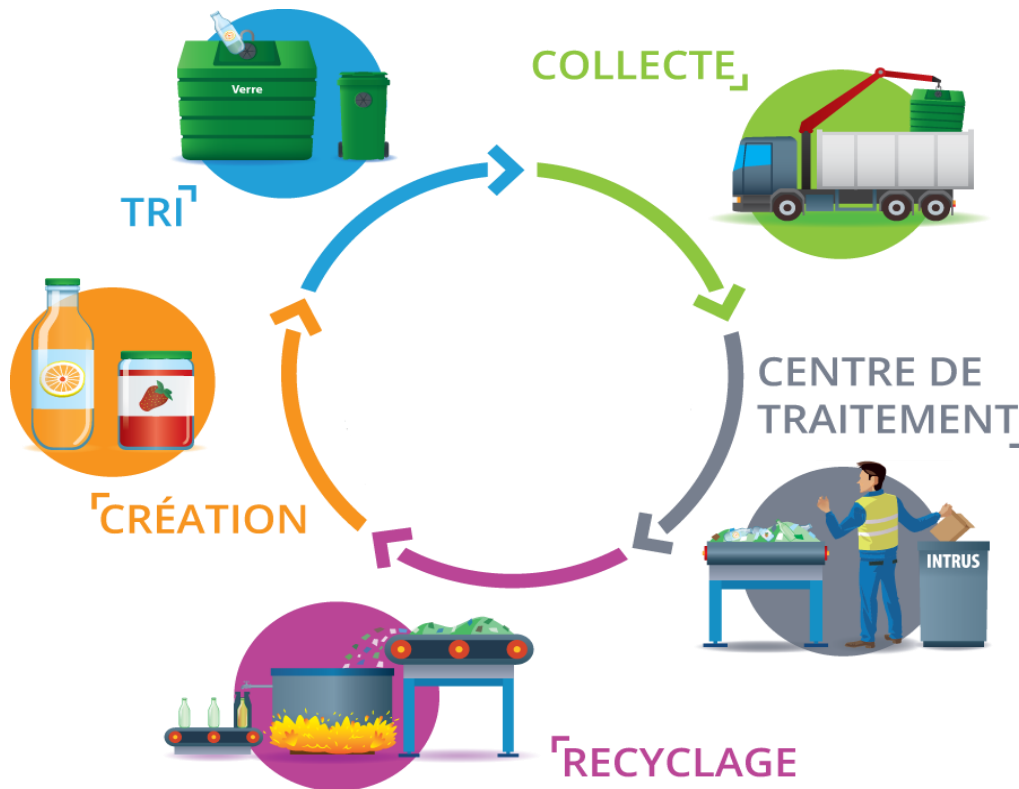


Figure I-2:le cycle de recyclage des déchets. [5]

I.4 Les techniques de recyclage

I.4.1 Procédés de recyclage

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage : chimique, mécanique et organique. Le recyclage dit (chimique) utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants. Le recyclage dit (mécanique) et la transformation des déchets à l'aide d'une machine par exemple pour broyer. Le recyclage dit (organique) consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz. [2]

I.4.2 La chaîne recyclage

I.4.2.1 Collectes des déchets

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis en centres d'enfouissement techniques. Les déchets collectes pour le recyclage ne sont pas destinés ni à l'enfouissement ni l'incinération mais à la transformation la collecte s'organise en conséquence. la collecte sélective, dit aussi séparative et souvent appelée à tort tri sélectif est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui crée le déchet le trie lui-même. A la suite de la collecte, les déchets triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri ou différentes

opérations, permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Le tri manuel est une de ces opérations.

I.4.2.2 Transformation

Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Il entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sous forme de matière prête à l'emploi.

I.4.2.3 Commercialisation et consommation

Une fois transformés, les produits finis issues du recyclage sont utilisés pour la fabrication des produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs et consommés, pour être en fin de vie, à nouveau jetés, récupérés et recyclés.

I.5 Déchets des utilisés dans le domaine du génie civil

I.5.1 Laitiers

- **Laitier de haut fourneau**

Est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Le laitier est ensuite refroidi lentement à l'air libre et donne un matériau cristallin et compact connu sous le nom de (laitier refroidi à l'air). Ce dernier est approprié comme granulats pour le béton. La stabilité volumique, la résistance aux sulfates et la résistance à la corrosion par les solutions de chlorure font que le béton de laitier armé convient pour plusieurs applications.

- **Laitier d'acier**

Est formé par l'élimination des impuretés contenues dans la fonte brute. Il est riche en phosphate ou en calcium et contient du silicate bi-calcique métastable, il est donc utilisé uniquement comme matériau de remblai pour les routes. L'utilisation de ces laitiers est assez peu répandue en raison de problème de stabilité dimensionnelle. Les risques environnementaux associés à l'utilisation des laitiers dans certaines filières sont encore peu connus.

I.5.2 Déchets divers [4]

- **Verre de récupération**

Verre de récupération Des millions de tonnes de verre sont récupérés chaque année et une voie de recyclage du verre consiste à l'utiliser dans les matériaux de construction. Il est utilisé sous deux formes principales : les granulats (taille > 4 mm) et les poudres (taille < 4 mm). Les granulats sont utilisés en remplacement de graves dans les bétons et lui procurent une résistance

moindre. Les poudres (sables et fines) sont utilisées dans les mortiers en remplacement du sable mais aussi dans l'industrie du ciment pour fines.

- **Pneus usagers**

Les matériaux cimentaires ont une capacité de déformation très limitée ainsi qu'une faible résistance à la traction, ce qui les rend sensibles à la fissuration, notamment la fissuration due au retrait. A titre d'exemple, les dallages, les chaussées et plus généralement les éléments mis en place en grande surface se fissurent sous l'effet du retrait. Ainsi, l'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation avant localisation de la macro-fissure. Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des granulats en caoutchouc a une grande résistance à la fissuration de retrait.

- **Ciment durci**

Dans le cas où un sac de ciment est en contact avec l'eau ou l'air, la poudre se cristallise. Cette recristallisation du ciment est suivie d'une réaction d'hydrolyse. Ces deux réactions sont rapides et provoquent le durcissement du ciment. Il devient inutilisable comme liant sur le chantier. Le ciment ainsi durci devient automatiquement un déchet. Il peut être concassé et utilisé comme granulats de béton. Ce déchet est produit accidentellement ou par négligence, il est donc important d'éliminer le ciment durci et d'œuvrer pour empêcher sa production.

- **Résidus d'incinérateurs**

L'incinération des déchets domestiques et industriels entraîne la production de grandes quantités de résidus solides. Ces résidus comportent toutefois certaines matières délétères, ce qui compromet leur utilisation en tant que composants du béton. Ainsi, l'aluminium entraîne la dilatation par suite de l'évolution de l'hydrogène, les métaux ferreux font tacher le béton et les sels de plomb et de zinc solubles nuisent à la prise du ciment. Cependant, d'autres résidus sont bénéfiques pour les mortiers et bétons comme la fumée de silice, les cendres volantes.

- **Boues rouge**

Les boues rouges sont des résidus industriels issus du processus d'extraction d'aluminium à partir de la bauxite (procédé de Bayer). Elles sont stockées soit au fond des océans (en France, en Allemagne), soit près des usines comme au Canada. Elles sont de consistance assez plastique pour être formées en boules, chauffées à des températures de 1260 à 1310°C, elles sont transformées en granulats denses et résistants pouvant entrer dans la composition de bétons de résistances convenables.



Figure I-3 :les boues rouges [5]

- **Granulats recyclés issus de déchets de démolition**

Le béton constitue presque 75%, en poids de tous les matériaux de construction. Il s'ensuit donc que la plus grande partie de rebuts de démolition est constituée de béton. Par ailleurs, les sinistres fournissent des millions de tonnes de débris de béton. Aujourd'hui, les producteurs de granulats recyclés ont une politique de sélection des matériaux de démolition. Ainsi, on distingue cinq catégories de matériaux de démolition en fonction de leur nature :

- les bétons armés sans enduit ni plâtre ;
- les matériaux composés de briques, de tuiles, de graves, de pierres et de blocs rocheux, etc.
- les matériaux mélangés avec une faible teneur en plâtre, bois, plastique, etc.
- les mauvais matériaux avec une teneur en bois, plâtre, plastique : supérieure à 10%.
- les autres matériaux n'entrant pas dans les catégories précédentes.

- **Granulats de déchets de production de l'industrie du béton**

Les granulats de déchets de production ont deux origines :

- Les débris de béton générés tout au long des étapes de la production ; ils résultent du nettoyage des installations de fabrication et du transport du béton frais (chutes de béton) ; il peut également s'agir de béton provenant de gâchées non utilisées ou non utilisables.

- Les produits défectueux, mal formés, partiellement cassés ou d'aspect non conforme ; à ces produits défectueux s'ajoutent les produits ayant fait l'objet d'essais de résistance à la rupture. [6]

- **Les sables fonderie**

Sont des sous-produits de l'industrie de la fonderie. Dans le procédé de moulage de pièces métalliques, les fonderies utilisent un sable fin siliceux associé à d'autres matériaux tels que l'argile ou des liants organiques (résines phénoliques). Quand le sable n'est plus réutilisable pour l'industrie de la fonderie, il est mis en décharge. Les sables de fonderie sont donc susceptibles

de constituer une matière première d'un coût assez faible pour la fabrication des bétons hydrauliques. La réglementation française, en l'occurrence l'Arrêté Ministériel du 16 juillet 1991 relatif à l'élimination des sables de fonderie contenant des liants organiques de synthèse, précise les conditions de la réutilisation de ces sables : « les sables de fonderie peuvent être utilisés pour la fabrication de produits à base de liants hydrauliques si leur teneur en phénol est inférieure à 5 mg/kg de sable rapporté à la matière sèche ». [7]

I.6 Recyclage des déchets de verre

I.6.1 La poudre de verre

Cette poudre est issue de la récupération de bouteilles en verre dans des décharges dispersées dans la nature. Cette poudre est obtenue par broyage des débris ramassés. La valorisation du verre de bouteilles dans les bétons autobloquants pourrait constituer une alternative intéressante, sur le plan environnemental, en évitant sa mise en décharge. [8]



Figure I-4 : Transformation des déchets de verre en poudre de verre. [5]

- Parmi les avantages et l'inconvénients de la poudre de verre en trouve :

Tableau I-2:les avantages et inconvénients de la poudre de verre.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Résistance à la corrosion ; • Haute solidité mécanique ; • Résistance chaud et au froid ; • Faible coefficient thermique d'extension ; • Façonnage facile ; • Moins chères par rapport aux autres types ; 	<ul style="list-style-type: none"> • La fibre de verre est plus difficile à réparer que le bois ; • La fixation à la structure doit se faire le dessous ce qui peut rendre l'installation difficile dans les espaces ;

I.6.1.1 Les propriétés de la poudre de verre

- **Propriété physique**

Le verre récupéré dans les installations de traitement des déchets peut avoir une densité spécifique perméabilité variant de 10^{-1} à 10^{-2} cm/sec. Donc on peut le considérer comme un matériau très perméable similaire au sable grossier, comme montré ci-dessous dans le tableau (I-3). [9]

Tableau I-3 :les propriétés physique de poudre de verre.

Echantillon du verre	Densité spécifique	Perméabilité (cm/sec)
Grossier Fin	1.96–2.41	$\sim 2 \times 10^{-1}$
	2.49–2.52	$\sim 6 \times 10^{-2}$

- **Propriété chimique**

Les composants du verre sont les éléments qui peuvent être convertis en verre lorsqu'ils sont combinés avec de l'oxygène. Le dioxyde de silicium (SiO_2) entrant dans la composition du sable, est l'élément le plus commun des différents types de verre. [9]

Tableau I-4: les composition chimique poudre de verre.

Elément	%
SiO ₂	72,84
Al ₂ O ₃	0,98
Fe ₂ O ₃	0,55
CaO	9,66
MgO	1,76
SO ₃	0,25
K ₂ O	0,43
Na ₂ O	12,96
TiO ₂	0,016
P.A.F	0,79

I.6.1.2 Les caractéristiques physiques de poudre de verre

La poudre de verre est caractérisée comme suit dans le tableau :

Tableau I-5: les caractéristiques physique de poudre de verre

Couleur	Blanc grisâtre
Densité absolue	2,43 g/cm ³
Densité apparente	1,22 g/cm ³
S.S.B	5500 cm ² /g

I.6.2 Le béton écologique

I.6.2.1 Définition de béton écologique

Le principe du béton écologique est relativement simple, il s'agit d'intégrer principalement des matériaux d'origine naturelle dans son processus de production. L'objectif est alors de produire un béton plus respectueux de l'environnement et moins polluant pour la planète.

Le béton est aujourd'hui l'un des principaux matériaux utilisés pour la construction de bâtiments en tout genre. Pourtant, malgré ses nombreuses qualités, le béton possède un principal

Chapitre I

Les déchets utiliser dans le béton

inconvenient : il est polluant. Heureusement, de nombreux matériaux de substitution font aujourd'hui leur apparition dans le monde de la construction. C'est notamment le cas du béton écologique, qui se révèle davantage respectueux de l'environnement. [10]

Tableau I-6: les avantages et les inconvenantes d'un béton écologique.

Avantages	Inconvenantes
<ul style="list-style-type: none">• Il soit conçu à base d'éléments 100% naturels ;• La qualités égale ou béton classique ;• Résistant à la chaleur et même au feu ;• Moins polluant de produire du béton classique ;	<ul style="list-style-type: none">• Il s'agit d'un matériau trop cher ;• Sa démocratisation limite : son tarif ;

I.6.2.2 Les consistance d'un béton écologique

Ce béton écolopeut alors être conçu dans des matières végétales biodégradables.

En effet, le béton dit « classique » est fabriqué à partir de calcaire et d'argile. Or, le mélange de ces deux matériaux est émetteur de grande quantité de CO₂. Aujourd'hui, on estime que l'industrie du béton est responsable de 7 % des émissions de gaz à effet de serre. Le recours aubéton écologique permet de réduire cette empreinte carbone. [10]

I.6.3 Le verre dans le béton

Du fait de sa nature amorphe et qu'il contienne des quantités relativement appréciables de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est broyé finement. Ainsi il pourrait être utilise en remplacement du ciment Portland dans les bétons. Plusieurs travaux ont été conduits dans les années soixante sur l'utilisation du verre comme granulats dans les bétons. Cependant ces travaux ont montré que tous les bétons ont gonfle et fissure. Depuis, l'idée a été en partie abandonne. Ce n'est que depuis une quinzaine d'année que le sujet est redevenu d'actualité. En effet, pour des raisons économiques et environnementales, l'utilisation du verre recycle dans les ciments et bétons a suscité l'intérêt d'innombrables municipalités et celles-ci ont encouragé de nouvelles études. [9]

I.6.4 Les réactions Alkali-Silica (RAS)

Le remplacement partiel du granulat naturel ou du ciment par le verre dans les bétons, améliore ses propriétés mécaniques notamment les résistances en compression. Toutefois, certains travaux conseillent l'utilisation de ce matériau, en prenant certaines précautions. Effectivement, les bétons à base de verre sont confrontés à un problème lié à leur durabilité. La silice du verre en combinaison avec les alcalins du ciment donne naissance à des produits gonflants qui entraînent l'endommagement des bétons. La réaction alcali-silice du verre dépend de différents paramètres. La bibliographie a montré que le processus de la réaction alcali-silice en général avec des granulats de verre est un phénomène complexe influencé par plusieurs facteurs. [11]

Les paramètres qui conditionnent la réaction alcali-silice du verre :

- La taille des grains de verre
- Teneur en verre
- La porosité et la réaction alcali- du verre
- Les éléments mineurs et la réaction alcali-silice

La

réaction alcali-silice se produit en général dans un délai de l'ordre de plusieurs dizaines années après la fabrication du béton [12].

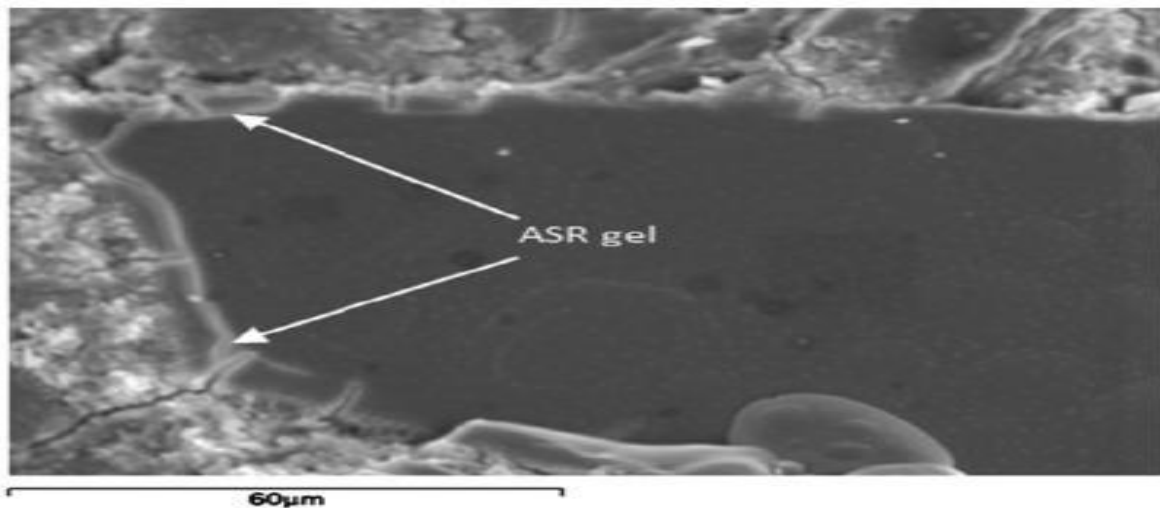


Figure I-5:mage MEB d'une particule de verre montrant une formation RAS dans la frontière de la particule. [5]

I.6.5 La réaction pouzzolanique de la poudre de verre dans le béton

L'activité pouzzolanique du verre a été évaluée par diverses méthodes : les tests mécaniques sur éprouvettes de mortier et béton à base de ciment ou sur des mortiers à base de chaux, ou encore tests chimiques de consommation de chaux notamment par ; l'essai Chapelle, ATG, DRX. La Figure ci-dessous présente les résultats de quelques travaux effectués entre les années 2000 et 2008 qui traitent de l'activité pouzzolanique du verre. L'indice d'activité est défini comme étant le rapport de la résistance du mélange avec verre à la résistance du mélange témoin. Il a été difficile, voire impossible, de rassembler des travaux tous faits dans des mêmes conditions. [13]

Toute fois les conclusions suivantes se dégagent nettement :

- La taille des grains de verre joue un rôle prépondérant sur l'activité pouzzolanique du verre : plus les grains de verre sont fins, meilleure et son activité pouzzolique ;
- La résistance des mortiers et bétons diminue à mesure que leur teneur en verre augmente 3. Le verre de couleur brune est le verre qui possède la plus faible activité pouzzolanique derrière le verre vert puis le verre blanc;
- Pour des résistances optimales, il est plus intéressant de substituer le sable que le ciment par le verre;
- Une température élevée joue un rôle important dans l'activation du verre;
 - Le verre, compare à d'autres pouzzolanes notamment la cendre volante, développe rapidement son activité pouzzolanique;
- L'utilisation simultanée d'un verre et d'une pouzzolane en remplacement partiel du ciment pourrait conduire à des synergies intéressantes.

I.6.6 Effet de la température de durcissement sur les propriétés d'hydratation de la poudre de verre dans les matériaux à base du ciment

La température de durcissement a des effets non négligeables sur les propriétés d'hydratation de la poudre de verre. Une haute température de durcissement est bénéfique pour le développement de la résistance à la compression pour les pâtes de ciment avec poudre de verre parce qu'elle peut à la fois, favoriser l'hydratation du ciment et la réaction pouzzolanique de verre simultanément.

La température de durcissement relativement élevée peut en partie compenser la baisse de la résistance due à un surdosage de la poudre de verre.

Lors de la réaction pouzzolanique de la poudre de verre une partie de l'hydroxyde de calcium (CH) est consommée, la teneur en CH diminue avec l'augmentation de la quantité de poudre de verre, d'où une haute température de durcissement peut contribuer à améliorer la réaction pouzzolanique en permettant une meilleure consommation du CH.

I.7 Conclusion

Le béton est un matériau qui est souvent perçu comme un lieu potentiel pour les déchets, en raison de sa nature composite et parce qu'il est largement utilisé. Ce qui signifie que si un déchet peut être utilisé dans le béton, alors certainement de grandes quantités de celui-ci peuvent être recyclé

Chapitre II

Les mécanismes des fissures

Chapitre II **Les mécanismes des fissures**

II.1 Introduction

La rupture des matériaux est un problème important. La rupture des matériaux est un problème important. La rupture des structures ou des composants du système peut en effet avoir des conséquences colossales en termes de coût. Tous les matériaux contiennent des défauts. Certains de ces défauts perturbent le champ des contraintes et création de concentrations de contraintes qui nécessitent la formation de fissures. Les matériaux fragiles sont particulièrement sensibles à la présence de défauts. Il ne peut pas s'opposer à la croissance des fissures. Les matériaux fragiles sont nombreux. Ils constituent des composants, des structures ou entrent dans des systèmes industriels dans plusieurs secteurs. En outre, les progrès de la technologie et la recherche permanente de performances toujours plus élevées répondant au développement de nouveaux matériaux capables de rivaliser avec les métaux, grâce à leur masse plus faible, leur résistance supérieure aux températures élevées et de l'environnement et à leurs propriétés mécaniques.

II.2 Comprendre la mécanique des fractures

Les concepts de conception structurelle utilisent traditionnellement une approche de résistance des matériaux pour concevoir un composant. Cette approche n'anticipe pas les niveaux de contrainte élevés dus à l'existence de fissures. La présence de telles contraintes peut entraîner une défaillance catastrophique de la structure.

La mécanique des fractures tient compte des fissures ou des défauts dans une structure. L'approche de la conception des structures par la mécanique des fractures inclut la taille des défauts comme variable importante, et la résistance à la rupture remplace la résistance du matériau comme paramètre matériel pertinent.

L'analyse de la rupture est généralement effectuée en utilisant soit le critère d'énergie, soit le critère du facteur d'intensité de la contrainte. Pour le critère d'énergie, l'énergie requise pour une extension unitaire de la fissure (le taux de libération d'énergie) caractérise la ténacité de la rupture. Pour le critère du facteur d'intensité de la contrainte, la valeur critique de l'amplitude des champs de contrainte et de déformation caractérise la ténacité de la rupture. Dans certaines circonstances, les deux critères sont équivalents.

Les sujets supplémentaires suivants concernant la rupture sont disponibles :

II.3 Comprendre les modes de rupture

Selon la cinématique de rupture (c'est-à-dire le mouvement relatif des deux surfaces de la fissure), on peut distinguer trois modes de rupture, comme le montre la figure II.1 : Schéma des modes de fracture :

- Mode I - Mode d'ouverture ou de traction
- Mode II - Mode de cisaillement ou de glissement
- Mode III - Déchirement ou mode hors plan

La rupture est généralement caractérisée par une combinaison de modes de rupture.

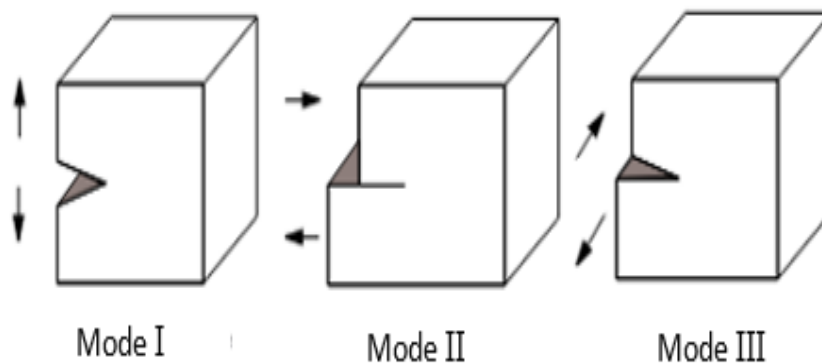


Figure II-1 : schéma des modes de fracture.

II.4 Comprendre le calcul des paramètres de la mécanique de la rupture

Les paramètres typiques de la mécanique de la rupture décrivent soit le taux de libération d'énergie, soit l'amplitude des champs de contrainte et de déformation en amont de la pointe de la fissure.

Les paramètres suivants sont largement utilisés dans l'analyse de la mécanique de la rupture :

II.4.1 Intégrale J

L'intégrale J est l'un des paramètres de mécanique de la rupture les plus largement acceptés pour les matériaux plastiques linéaires et élastiques-plastiques non linéaires. L'intégrale J est définie comme suit :

$$J = \lim_{\Gamma \rightarrow 0} \int_{\Gamma_0} \left[(W + T) \delta_{li} - \sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_l} \right] n_j d\Gamma$$

Où W est la densité d'énergie de déformation, T est la densité d'énergie cinématique, σ représente les contraintes, u est le vecteur de déplacement, et Γ est le contour sur lequel l'intégration est effectuée.

Pour une fissure dans un matériau élastique linéaire, l'intégrale J représente le taux de libération d'énergie. De même, les amplitudes des champs de contrainte et de déformation à l'extrémité de la fissure sont caractérisées par l'intégrale J pour une fissure dans un matériau élastique non linéaire.

II.4.1.1 L'intégrale J comme facteur d'intensité de contrainte

Hutchinson [17] et Rice et Rosengren [18] ont montré indépendamment que l'intégrale J caractérise le champ de la pointe de la fissure dans un matériau élastique non linéaire. Ils ont tous deux supposé une relation de type loi de puissance entre la déformation plastique et la contrainte. Si la déformation élastique est incluse, la relation pour une déformation uni axiale est donnée comme suit :

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n$$

T où σ_0 est la contrainte de référence (la limite d'élasticité du matériau), et $\varepsilon_0 = \sigma_0/E$, α est une constante sans dimension, et n est la composante de durcissement. Ils ont montré que, à une distance très proche de la pointe de la fissure et bien à l'intérieur de la zone plastique, la contrainte et la déformation en avant de la pointe de la fissure peuvent être exprimées comme suit [16] :

$$\sigma_{ij} = f(\theta) \left(\frac{J}{r} \right)^{\frac{1}{n+1}}$$

Et

$$\varepsilon_{ij} = g(\theta) \left(\frac{J}{r} \right)^{\frac{1}{n+1}}$$

Pour un matériau élastique, $n = 1$ et l'équation ci-dessus $1/\sqrt{r}$ prédit la singularité qui est cohérente avec la mécanique de la rupture élastique linéaire.

II.4.1.2 Taux de libération d'énergie

Le taux de libération d'énergie, limité à la mécanique de la rupture élastique linéaire, est basé sur le critère d'énergie pour la rupture proposée par Griffith et développé par Irwin. Dans cette approche, la croissance de la fissure se produit lorsque l'énergie disponible pour la croissance de la fissure est suffisante pour surmonter la résistance du matériau [15].

Le taux de libération d'énergie G est défini dans les matériaux élastiques comme le taux de changement de l'énergie potentielle libérée par une structure lorsqu'une fissure s'ouvre. Par exemple, l'illustration suivante montre une fissure de longueur $2a$ dans un grand corps élastique de module E soumis à une contrainte de traction (σ) :

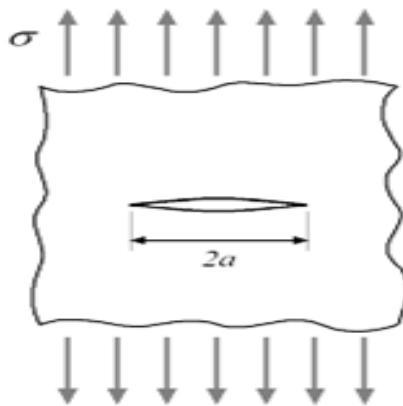


Figure II-2: la contrainte de traction (σ)

Le taux de libération d'énergie est donné par :

$$G = \frac{\pi\sigma^2 a}{E}$$

Au moment de la rupture, G est égal au taux critique de libération d'énergie G_c , fonction de la ténacité de la rupture. La valeur de G_c pour un matériau peut être déterminée par un ensemble relativement simple d'expériences de fissuration.

Pour un mode de rupture unique, le facteur d'intensité de contrainte et le taux de libération d'énergie sont liés par :

$$G = \frac{K^2}{E'}$$

Où G est le taux de libération d'énergie,

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2}$$

Pour une déformation plane, et $E'=E$ pour une contrainte plane. (E est le module de Young du matériau, et ν est le coefficient de Poisson).

II.4.2 Facteur d'intensité des contraintes

En se limitant à un matériau élastique linéaire, les champs de contrainte et de déformation en avant de la pointe de la fissure sont exprimés comme suit :

$$\sigma_{ij} = -\frac{K}{\sqrt{r}} f_{ij}(\theta)$$

$$\varepsilon_{ij} = -\frac{K}{\sqrt{r}} g_{ij}(\theta)$$

Où K est le facteur d'intensité de la contrainte, r et θ sont les coordonnées d'un système de coordonnées polaires (comme illustré à la Figure II.3 : Schéma d'une pointe de fissure). Ces équations s'appliquent à l'un des trois modes de rupture.

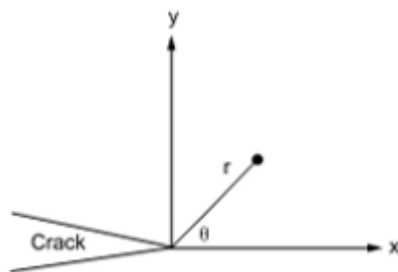


Figure II-3: schéma d'une pointe de fissure.

Pour une fissure de mode I, le champ de contraintes est donné par :

$$\sigma_x = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right)$$

$$\sigma_y = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)$$

II.4.3 C*-intégral

Comme l'intégrale J pour les matériaux élastiques isotropes, l'intégrale C* caractérise les conditions de pointe de fissure dans les matériaux homogènes subissant une déformation de reptation secondaire (en régime permanent) [29] [30]. Le C*-intégral est défini comme suit :

$$C^* = \int_A \left[\sigma_{ij} \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} - \dot{w} \delta_{ij} \right] \frac{\partial q}{\partial x_i} dA$$

Où σ_{ij} est le tenseur des contraintes , \dot{u}_j est le vecteur de vitesse de déplacement, \dot{w} est la densité de vitesse d'énergie de déformation, δ_{ij} est le delta de Kronecker, x_i est l'axe de coordonnées, et q est le vecteur d'extension de la fissure.

II.5 Comprendre la simulation de la croissance des fissures

La rupture/croissance de fissure est un phénomène dans lequel deux surfaces sont séparées l'une de l'autre, ou le matériau est progressivement endommagé sous une charge externe. Les méthodes suivantes sont disponibles pour simuler une telle rupture :

II.5.1 Résolution des problèmes de mécanique des fractures

Une analyse de rupture est une combinaison d'une analyse des contraintes et du calcul des paramètres de la mécanique de la rupture. L'analyse des contraintes est une analyse plastique linéaire élastique ou non linéaire standard.

Étant donné que des gradients de contrainte élevés existent dans la région autour de la pointe de la fissure, la modélisation par éléments finis d'un composant contenant une fissure exige une attention particulière dans cette région.

Les représentations 2-D et 3-D de la région autour de la pointe de la fissure et la terminologie utilisée sont décrites dans la section suivante. Le bord ou l'extrémité de la fissure est appelé pointe de fissure dans un modèle 2-D et front de fissure dans un modèle 3-D, comme l'illustre la Figure II.4 : Pointe de fissure et front de fissure.

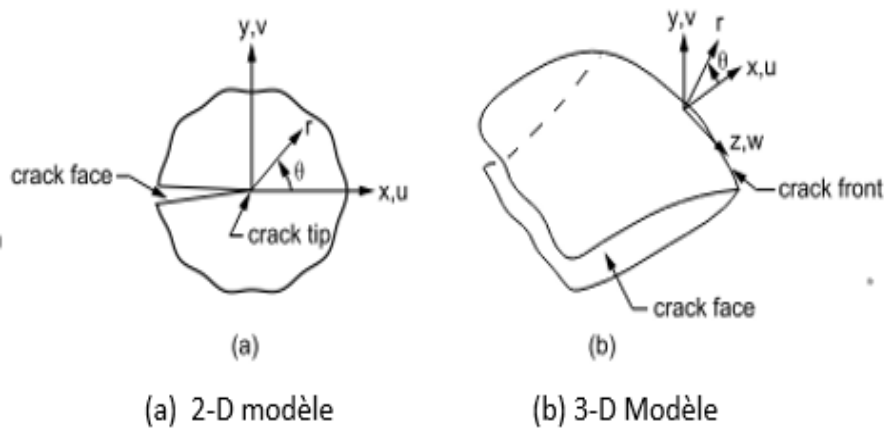


Figure II-4: le point de fissure et front de la fissure.

II.5.2 Modélisation de la région de la pointe de la fissure

Les champs de contrainte et de déformation autour de la pointe de la fissure présentent généralement des gradients élevés. La nature précise de ces champs dépend du matériau, de la géométrie et d'autres facteurs. Pour capturer les champs de contrainte et de déformation qui varient rapidement, utilisez un maillage raffiné dans la région autour de la pointe de la fissure. Pour les problèmes élastiques linéaires, les déplacements à proximité de la pointe de la fissure (ou du front de la fissure) varient comme \sqrt{r} , où r est la distance de la pointe de la fissure. Les contraintes et les déformations sont singulières à l'extrémité de la fissure et varient comme $1/\sqrt{r}$.

Pour produire cette singularité des contraintes et des déformations, le maillage de la pointe de la fissure doit présenter certaines caractéristiques :

- Les faces de la fissure doivent coïncider.
- Les éléments autour de la pointe de la fissure (ou du front de la fissure) doivent être quadratiques, avec les nœuds centraux placés aux quarts de points. (De tels éléments sont appelés éléments singuliers).

La figure II.5 : Exemples d'éléments singuliers montre des exemples d'éléments singuliers pour des modèles de fracture en 2-D et en 3-D

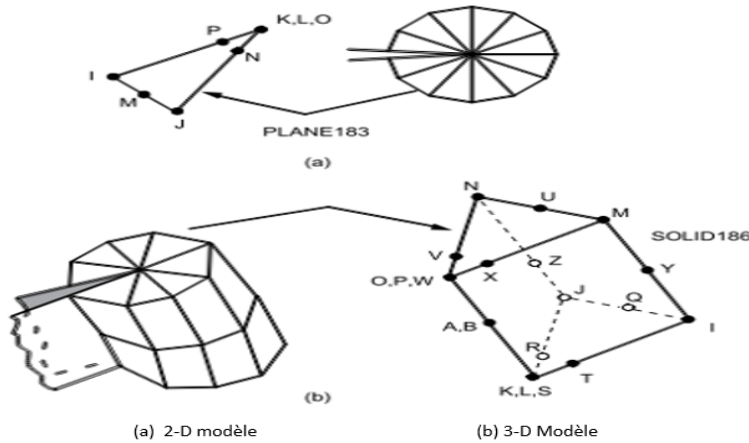


Figure II-5: Exemples d'éléments singuliers.

II.5.3 Modélisation de problèmes de fractures élastiques linéaires 2-D

Le type d'élément recommandé pour un modèle de fracture 2-D est PLANE183, le solide quadratique à 8 nœuds. La première rangée d'éléments autour de la pointe de la fissure doit être singulière, comme illustré dans la Figure II.6 : Exemples d'éléments singuliers (a).

La commande KSCON du préprocesseur PREP7 (Menu principal> Préprocesseur> Maillage> Cntrls de taille> Concentration KPs> Créer), qui attribue des tailles de division d'éléments autour d'un point clé, est particulièrement utile dans un modèle de fracture. Elle génère automatiquement des éléments singuliers autour du point clé spécifié. D'autres champs de la commande vous permettent de contrôler le rayon de la première rangée d'éléments, le nombre d'éléments dans la direction circonférentielle, etc. La figure II.6 : Spécimen de fracture et modèle EF 2-D montre un modèle de fracture généré à l'aide de KSCON.

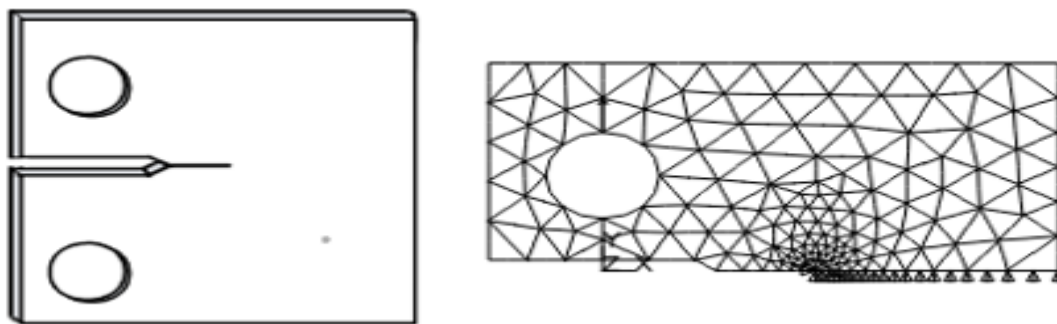


Figure II-6: Spécimen de fracture et modèle EF 2-D

II.5.4 Modélisation des problèmes de fractures élastiques linéaires 3-D

Le type d'élément recommandé pour les modèles 3-D est SOLID186, l'élément brick à 20 nœuds. Comme le montre la figure II.6 : Exemples d'éléments singuliers (b), la première rangée d'éléments autour du front de fissure doit être constituée d'éléments singuliers. Remarquez que l'élément est en forme de coin, avec la face KLPO effondrée dans la ligne KO.

La génération d'un modèle de fracture 3D est considérablement plus complexe que celle d'un modèle 2D. La commande KSCON n'est pas disponible pour la modélisation 3D. Vous devez vérifier que le front de fissure se trouve le long de l'arête KO des éléments.

Les recommandations concernant la taille des éléments sont les mêmes que pour les modèles 2D. En outre, les rapports d'aspect ne doivent pas dépasser environ 4 pour 1 dans toutes les directions.

Pour les fronts de fissure courbes, la taille des éléments le long du front de fissure dépend de l'importance de la courbure locale. En règle générale, il faut prévoir au moins un élément tous les 15° à 30° le long d'un front de fissure circulaire.

Tous les bords des éléments doivent être droits, y compris le bord du front de fissure.

II.6 Calcul des paramètres de fracture

Vous pouvez évaluer différents paramètres de fracture. La plupart sont calculés pendant la phase de solution de l'analyse (CINT), les résultats étant stockés dans le fichier. Rstresults pour le post-traitement.

Les facteurs d'intensité de contrainte peuvent également être calculés pendant le post-traitement (POST1) (KCALC).

Les outils suivants sont disponibles pour évaluer les paramètres de la mécanique de la rupture :

- Calcul de l'intégrale J
- Calcul du taux de libération d'énergie VCCT
- Calcul du facteur d'intensité des contraintes (SIF)
- Calcul de la contrainte T

- Calcul de la force du matériau
- Calcul de l'intégrale C^*
- Méthode de maillage non structuré (UMM)

Pour plus d'informations, voir Comprendre le calcul des paramètres de la mécanique de la rupture.

La plupart des calculs de fracture s'appuient sur l'ordre de connectivité nodale des éléments et doivent se conformer au modèle indiqué pour chaque élément tel que documenté. On accède au calcul des paramètres de la mécanique des fractures par la commande CINT.

Pour les éléments d'ordre élevé, ne laissez pas tomber les nœuds du milieu dans la connectivité nodale de l'élément lorsque vous utilisez la commande CINT. Dans la plupart des cas, ANSYS, Inc. recommande d'utiliser des mailles de balayage le long des fronts de fissure dans la modélisation 3D. Pour une analyse plus précise et plus efficace en présence d'une singularité de champ de pointe de fissure, utilisez un maillage plus fin dans le champ proche autour de la fissure que vous ne le faites dans les mailles de champ lointain. Pour les problèmes axisymétriques 2-D, utilisez un maillage plus fin dans la région proche de la pointe de la fissure.

Si des charges de pression existent sur les surfaces de la fissure, elles doivent être appliquées directement sur les éléments solides.

Tableau II-1: les éléments pour le calcul des paramètres de fabrication.

Type d'élément	Description	Calculs de Paramètres pris en charge
Plane 182	2-D 4-Structure de nœud solide	J-intégral
PLANE183	2-D 8-Noeude ou 6- Structure de nœud solide	VCCT taux réel d'énergie Facteur d'intensité de contrainte T-contrainte Force matérielle C^* -intégral
SOLID185	3-D 8- Structure de nœud solide	

SOLID186	3-D 20- Structure de nœud solide	J-intégral (UMM optionnel) VCCT taux réel d'énergie Facteur d'intensité de contrainte (UMM optionnel) T-contrainte Force matérielle C*-intégral
SOLID187	3-D 10-Nœud tétraédrique solide structurel	J-intégral (UMM optionnel) VCCT taux réel d'énergie Facteur d'intensité de contrainte (UMM optionnel) T-contrainte Force matérielle C*-intégral
SOLID285	3-D 4-Nœud tétraédrique solide structurel avec des pression nodales	J-intégral (UMM optionnel) Facteur d'intensité de contrainte (UMM optionnel)

II.7 Simulation de la croissance d'une fissure basée sur la technique VCCT

La technique de fermeture virtuelle des fissures (VCCT) a été initialement développée pour calculer le taux de libération d'énergie d'un corps fissuré [20]. Elle a depuis été largement utilisée dans la simulation de la croissance des fissures interfaciales des composites stratifiés, avec l'hypothèse que la croissance des fissures suit toujours un chemin prédéfini, en particulier les interfaces [2] [22] [23] [24].

La simulation de la croissance des fissures basée sur VCCT est disponible avec les éléments linéaires de technologie actuelle tels que PLANE182 et SOLID185.

Une simulation de la croissance des fissures basée sur VCCT implique les hypothèses suivantes :

- La croissance de la fissure se produit le long d'un chemin de fissure prédéfini.
- Le chemin est défini par des éléments d'interface.

- L'analyse est quasi-statique et ne tient pas compte des effets transitoires.
- Le matériau est élastique linéaire et peut être isotrope, orthotrope ou anisotrope.

La fissure peut être située dans un matériau ou le long de l'interface des deux matériaux. Les critères de rupture sont basés sur les taux de libération d'énergie calculés à l'aide de VCCT. Plusieurs critères de rupture sont disponibles, y compris une option définie par l'utilisateur. Plusieurs fissures peuvent être définies dans une analyse.

Une simulation de la croissance des fissures basée sur VCCT utilise :

- Les éléments d'interface INTER202 (2-D) et INTER205 (3-D).
- La commande CINT pour calculer le taux de libération d'énergie.
- La commande CGROW pour définir l'ensemble de fissuration, le critère de rupture, le chemin de fissuration et les paramètres de contrôle de la solution.

II.8 Processus de simulation de la croissance des fissures par VCCT

Une simulation de la croissance des fissures basée sur VCCT est supposée être quasi-statique. Voici le processus général de réalisation de la simulation :

- Étape 1. Créer un modèle d'éléments finis avec un chemin de fissure prédéfini.
- Étape 2. Calcul du taux de libération d'énergie
- Étape 3. Calcul de la croissance de la fissure
- Exemple : Définition du jeu de fissures

La simulation de la propagation des fissures est une analyse structurelle non linéaire. Les détails de l'analyse présentés ici mettent l'accent sur les caractéristiques spécifiques à la croissance des fissures.

II.8.1 Étape 1. Création d'un modèle d'éléments finis avec un chemin de fissure prédéfini

Les procédures standard de solution non linéaire s'appliquent à la création d'un modèle d'éléments finis avec des paramètres de contrôle de solution, des charges et des conditions aux limites appropriés.

Le chemin de fissure prédéfini est discrétisé avec des éléments d'interface et regroupé en tant que composant d'élément, comme le montre la figure suivante :

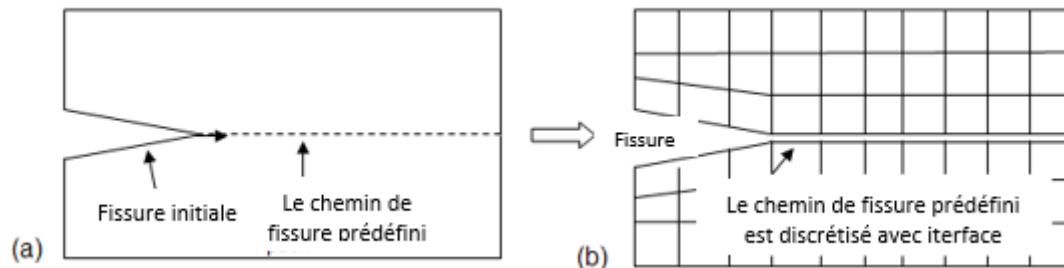


Figure II-7 : Le chemin de fissure prédéfini est discrétisé avec des éléments d'interface.

Les éléments d'interface peuvent être maillés via CZMESH ou maillés par un outil tiers qui génère des éléments d'interface.

L'option de contrainte MPC de l'élément (KEYOPT(2) = 1) lie les faces de fissures potentielles avant que les fissures ne commencent à se développer. Les contraintes MPC sont ensuite relâchées lorsque le critère de rupture est atteint, ce qui entraîne la croissance des fissures.

Dans un problème 2-D, un élément d'interface derrière la pointe de la fissure peut s'ouvrir s'il satisfait au critère de rupture à une sous-étape donnée. Dans un problème 3-D, tous les éléments d'interface derrière le front de la fissure peuvent s'ouvrir s'ils répondent au critère de rupture.

Les différences de taille des éléments situés devant et derrière la pointe/le front de la fissure affectent la précision du calcul du taux de libération d'énergie. Bien que le programme utilise un algorithme de correction, il peut être inadéquat pour produire une solution précise. Utilisez plutôt des mailles de taille égale pour les éléments le long du chemin de fissure prédéfini.

II.8.2 Étape 2. Calcul du taux de libération d'énergie

Pour la simulation de la croissance des fissures basée sur VCCT, il est nécessaire d'effectuer d'abord le calcul du taux de libération d'énergie.

Pour calculer les taux de libération d'énergie, lancez la commande CINT,TYPE,VCCT. Exécutez les commandes CINT suivantes pour spécifier d'autres options telles que le composant du nœud de la pointe de la fissure et la normale du plan ou du bord de la fissure.

Le calcul de VCCT utilise les hypothèses suivantes :

- L'énergie de déformation libérée lorsqu'une fissure avance d'une petite quantité est la même que l'énergie requise pour fermer la fissure de la même quantité.
- Le champ de la pointe de la fissure/déformation à l'emplacement de la pointe de la fissure/avant est similaire à celui de la fissure qui s'étend d'une petite quantité.

Les hypothèses ne s'appliquent pas lorsque la croissance de la fissure s'approche de la limite ou lorsque les deux fissures se rapprochent l'une de l'autre ; par conséquent, utilisez le calcul du VCCT avec précaution et examinez les résultats de l'analyse.

II.8.3 Étape 3. Effectuer le calcul de la croissance de la fissure

Le calcul de la croissance des fissures intervient dans la phase de solution après le calcul des contraintes. Pour effectuer le calcul de la croissance des fissures, vous devez définir un ensemble de croissance des fissures, puis spécifier le chemin de fissure, le critère de rupture et les commandes de solution de la croissance des fissures. La commande de solution CGROW définit tous les paramètres nécessaires au calcul de la croissance des fissures.

Effectuez le calcul de la croissance de la fissure comme suit :

- Étape 3a. Lancez l'ensemble de croissance de fissure
- Étape 3b. Spécifiez le chemin de la fissure
- Étape 3c. Spécifier l'ID de calcul de la fissure et le critère de fracture
- Étape 3d : Spécifier les contrôles de solution pour la croissance de la fissure

II.8.3.1 Étape 3a. Initier l'ensemble de croissance de fissure

Pour définir un ensemble de croissance de fissures, lancez la commande CGROW,NEW,n, où n est le numéro de l'ensemble de croissance de fissures.

II.8.3.2 Étape 3b. Définition de la trajectoire de la fissure

Pour définir le chemin de fissuration, lancez la commande CGROW, CPATH, cmname, où cmname est le nom du composant pour les éléments d'interface.

II.8.3.3 Étape 3c. Spécification de l'ID de calcul de la fissure et du critère de fracture

Spécifiez l'ID de calcul de la fissure au moyen de la commande CGROW,CID,n, où n est l'ID de calcul de la fissure (CINT) pour le calcul du taux de libération d'énergie avec VCCT. (La commande CINT définit les paramètres associés à Vous pouvez également définir la même fissure avec différents critères de rupture dans un ensemble distinct de croissance de fissures. Les fissures peuvent croître sur la base de différents critères (selon le critère satisfait), et sont indépendantes les unes des autres. Cette technique est utile pour comparer les mécanismes de facture.

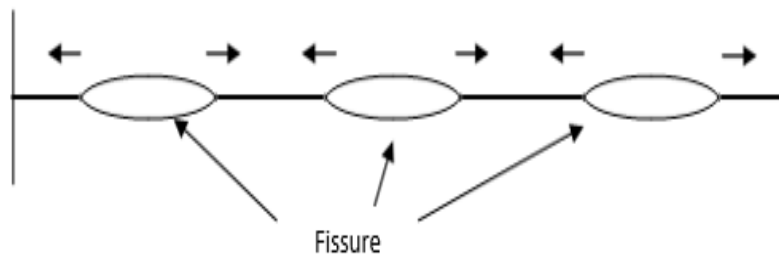


Figure II-8: La croissance et fusion des fissures.

II.9 Extension des fissures

Dans une simulation de croissance de fissure, une quantité d'intérêt est la quantité d'extension de fissure. Le VCCT mesure l'extension de la fissure sur la base de la longueur des éléments d'interface qui se sont ouverts, comme l'exprime l'équation suivante et la figure suivante :

$$\Delta a = \sum \Delta_i$$

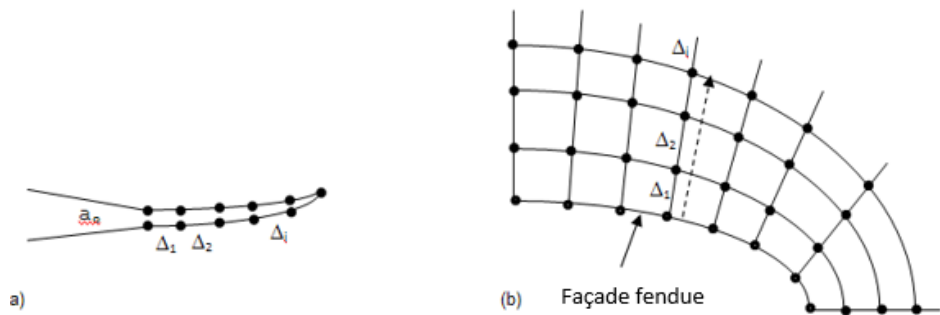


Figure II-9: l'extension des fissures 2-D et 3-D .

Pour les problèmes de fissures 2-D, l'extension de la fissure est la somme des longueurs des éléments d'interface qui sont actuellement ouverts (a). Pour les problèmes 3-D, l'extension de fissure est mesurée à chaque nœud de front de fissure et est la somme de la longueur des bords des éléments d'interface qui suivent la direction d'extension de la fissure (b).

L'extension de fissure Δa est disponible en tant que CEXT dans le cadre de la variable de solution de fissure associée à l'ID de calcul de fissure, et peut être post-traité de manière similaire aux taux de libération d'énergie via les commandes de post-traitement POST1 et POST26 (telles que PRCINT, PLCINT et CISOL).

II.10 Critères de rupture

Pour modéliser la croissance des fissures, il est nécessaire de définir un critère de rupture pour l'apparition des fissures et leur croissance ultérieure. Pour les applications de mécanique de la rupture élastique linéaire (LEFM), le critère de rupture est généralement supposé être une fonction des taux de libération d'énergie critique du mode I (GI), du mode II (GII) et du mode III (GIII), exprimés comme suit :

$$f = f(G_I^C, G_{II}^C, G_{III}^C, G_I, G_{II}, G_{III}, \dots)$$

D'autres paramètres peuvent être nécessaires pour certains modèles.

La fracture se produit lorsque l'indice du critère de fracture est atteint, exprimé comme suit :

Où f_c est le ratio du critère de fracture. Le rapport recommandé est de 0,95 à 1,05. La valeur par défaut est de 1,0.

II.11 Conclusion

La mécanique des fissures peut être utilisée pour prédire la défaillance des matériaux et des structures et pour développer des stratégies de prévention des défaillances. En conclusion, la mécanique des fissures est un sujet important en science et ingénierie des matériaux. L'étude de la mécanique de la rupture vise à comprendre comment les matériaux se comportent lorsqu'ils sont soumis à des contraintes et comment les fissures se propagent à travers eux.

Chapitre III
L'investigation
Expérimentale

Chapitre III L'investigation Expérimentale**III.1 Introduction**

Dans ce chapitre nous allons présenter les trois étapes munies lors de l'étude expérimentale investie au laboratoire Génie civil de l'université MOULOUD MAMMARI de tizi ousou. La première partie consiste à concasser le verre de recyclage manuellement, jusqu'à avoir une poudre de verre de finesse inférieure à 0.1mm pour remplacer une quantité de ciment portland dans le béton. La seconde étape consiste en la réalisation des éprouvettes en béton et enfin la troisième étape concerne la réalisation des essais de flexion a trois points et les essais de compression.

III.2 Caractérisation des matériaux utilisés**III.2.1 Constituants du béton**

Le béton est un matériau composé constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concasser, sable), de ciment et d'eau. Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcie la pâte de ciment hydratée et le sable constituant le mortier. Celui-ci a pour rôle de lier les granulats pour former un conglomérat solide. La formulation de ce béton a été déterminée à partir de la méthode de DREUX-GORISSE.

III.2.1.1 Ciment

C'est un liant hydraulique qui se présente sous forme d'un produit minérale fine s'hydratant en présence d'eau. Il forme une pâte faisant prise et qui durcie progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamentale du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide.

Un seul type de mélange de béton a été utilisé pour la fabrication des différents spécimens à étudier. Le ciment utilisé est un ciment de type NA442 CEMII/B-L42.5N, LAFARGE Algérie.

III.2.1.2 Granulats

Ils constituent le squelette du béton, ils doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. Il est possible de produire des granulats à béton qui peuvent être d'origine détritique (essentiellement alluvionnaire), sédimentaire, métamorphique ou éruptive.

Les granulats sont lavés et séchés à l'étuve à une température de 120°C, ils sont mis dans des sacs pour éviter qu'ils reprennent de l'humidité et stockés au laboratoire de l'université.

III.2.1.3 Eau

De façon générale, l'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. Il est exclu d'employer de l'eau de mer qui contient 30g/l de chlorures de sodium, pour la fabrication de béton armé ou précontrainte. L'eau de gâchage utilisée est l'eau du robinet, c'est une eau très propre. Les différents constituants du béton sont résumés dans la figure (III.1).

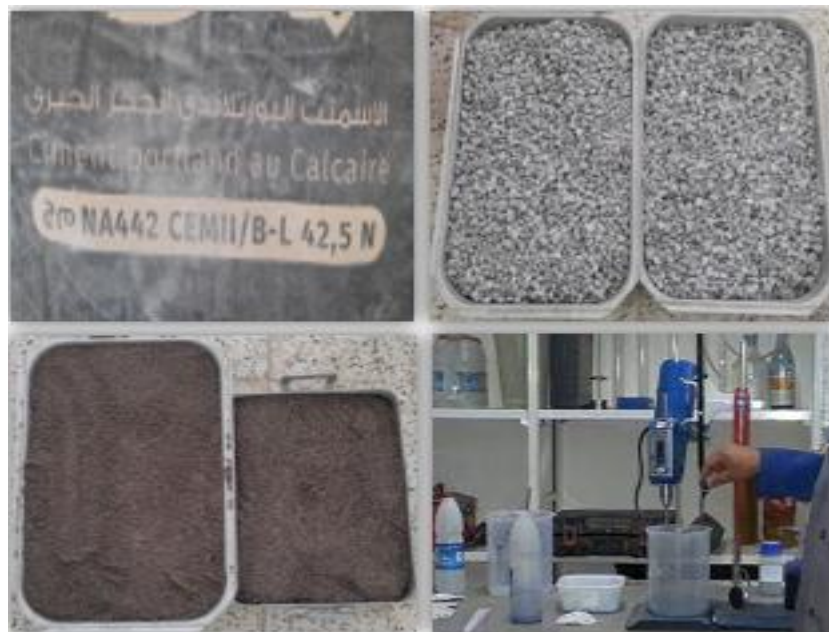


Figure III-1: constituants du béton

Les fractions massiques utilisées pour un volume de 1m³ de béton sont données dans le tableau (III.1).

Tableau III-1: dosage des constituants du béton pour le programme expérimental.

Composant (kg/m ³)	Masse pour 1m ³ de béton(kg)
Ciment	380
Sable(0/3)	753
Gravier(3/8)	171
Gravier(8/15)	895
Eau	206.52
E/C	0.5

III.2.2 Ajouts minéraux micronisation de la poudre de verre

La poudre de verre (Figure III.2) provient essentiellement des déchets de verre de bouteilles colorées. Elles sont ramassées puis lavées et séchées. Le verre est concassé par un broyeur puis micronisé avec un moulin à café traditionnel et tamisé au niveau du laboratoire de génie civil de l'université MOULOUD MAMMERI de tizi ousou.

L'étape décrite ci-dessus est valorisée dans la figure suivante (III.2)



Figure III-2: micronisation de verre

III.3 Fabrication du béton

Pour uniformiser les essais, on a décidé de travailler avec des granulats secs. Il a donc fallu mettre en étuve tous les granulats pour sécher pendant au moins 24 heures. Après séchage, faire en sorte que tous les granulats soient ramenés à température ambiante et les mettre en sac pour éviter qu'ils reprennent de l'humidité et de poussière.

On a préparé les moules de forme cylindrique (16/32) prévus pour les éprouvettes de béton, les moules sont huilés pour faciliter le décoffrage.

Les pesées des matériaux à utiliser ont été faites : gravillons, ciment, eau, poudre de verre. En ce qui concerne l'analyse granulométrique et l'équivalent de sable l'étude a été faite

précédemment (voir le mémoire de SEDKI Meriem page 36-50). Les quantités sont données dans le tableau (III.2)

Tableau III-2 :les quantités des matériaux utilisées pour les différents essais.

notation	Ciment (kg)	Sable (0/3) (kg)	Gravier (3/8) (kg)	Gravier (8/15) (kg)	Eau (kg)	Poudre de verre (kg)
B.Témoin	11.02	22.28	4.976	25.96	6.02	/
B10%pv	5.472	12.48	2.736	14.32	3.32	0.608
B20%pv	5.715	12.59	2.862	14.96	3.19	1.27

Le malaxeur utilisé pour la fabrication des bétons est un malaxeur à axe vertical. Après avoir déterminé les proportions de chaque composant, la séquence de malaxage retenue a été la suivante :

- Humidifier tout le matériel à utiliser ;
- Introduire le sable et le sable de verre, les gravillons dans le malaxeur ;
- Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange pendant 30s ;
- Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement l'eau de pré-humidification et le mélanger pendant 30s ;
- Ajouter le ciment et la poudre de verre, ensuite mélanger le tout durant 30s ;
- Verser l'eau restante graduellement et laisser malaxer pendant 60s ;
- Effectuer immédiatement les essais de caractérisation du béton frais.
- Remplir les moules des éprouvettes par simple versement (avec vibration).

La mise en place a été effectuée dans les différents moules destinés aux échantillons correspondants aux essais programmés. Les bétons ont subi des vibrations pour mieux compacter le béton et éliminer les bulles d'air à l'intérieur. Le démoulage a été effectué après 24h.

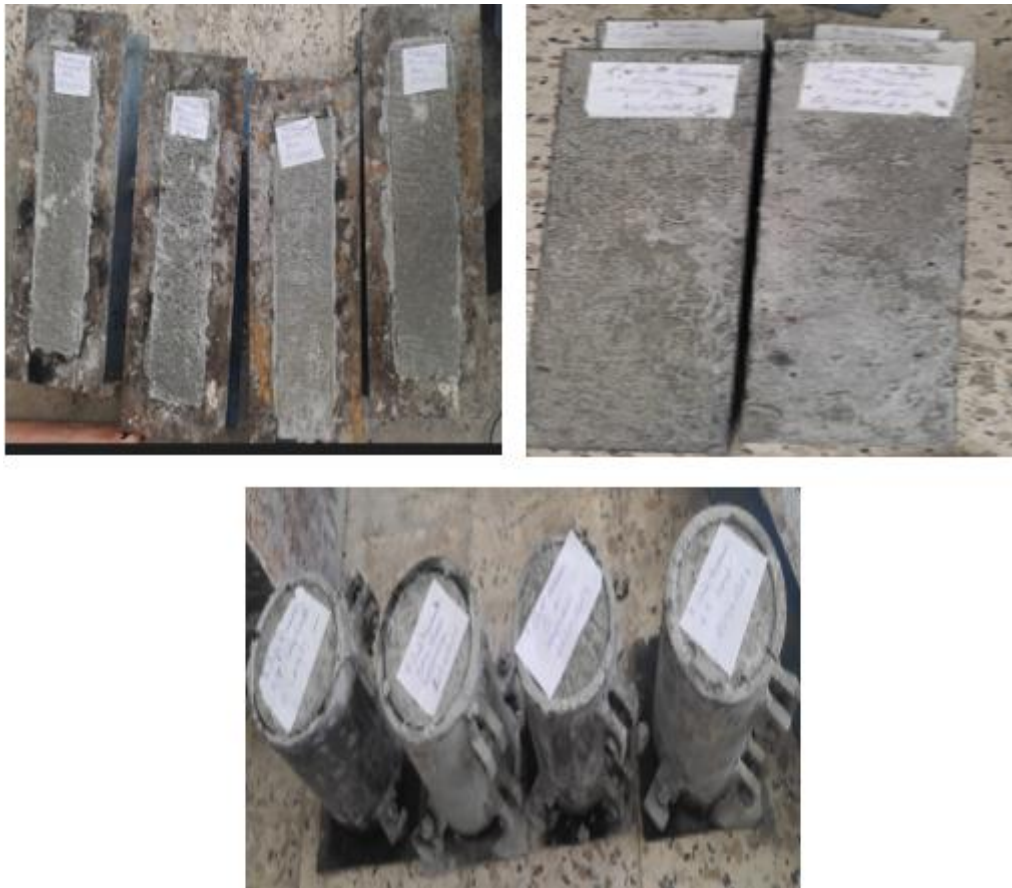


Figure III-3: confection , moulage et démoulage des éprouvettes.

Une fois le décoffrage est fait, les échantillons ont été émergés dans l'eau pour éviter l'évaporation de l'eau (Figure III.4).

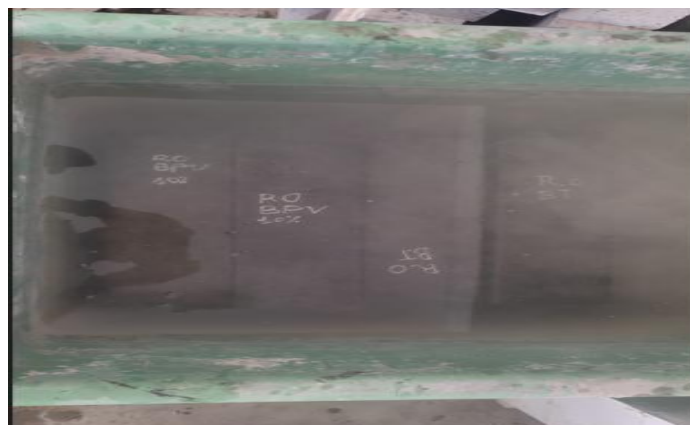


Figure III-4: conservation des éprouvettes dans l'eau pendant 28 jours.

III.4 Essais sur béton durci

III.4.1 Essais de flexion a trois points

Les essais de flexion à été réalisés sur 12 éprouvettes de dimensions (10cm*10cm*40cm), en utilisant la machine «IBERTEST» (figure III-5). Les cinq éprouvettes sont celle du béton témoin, quatre éprouvettes sont à base de 10% de poudre de verre et trois à base de 20% de poudre de verre mais en substituant seulement 10% de ciment.

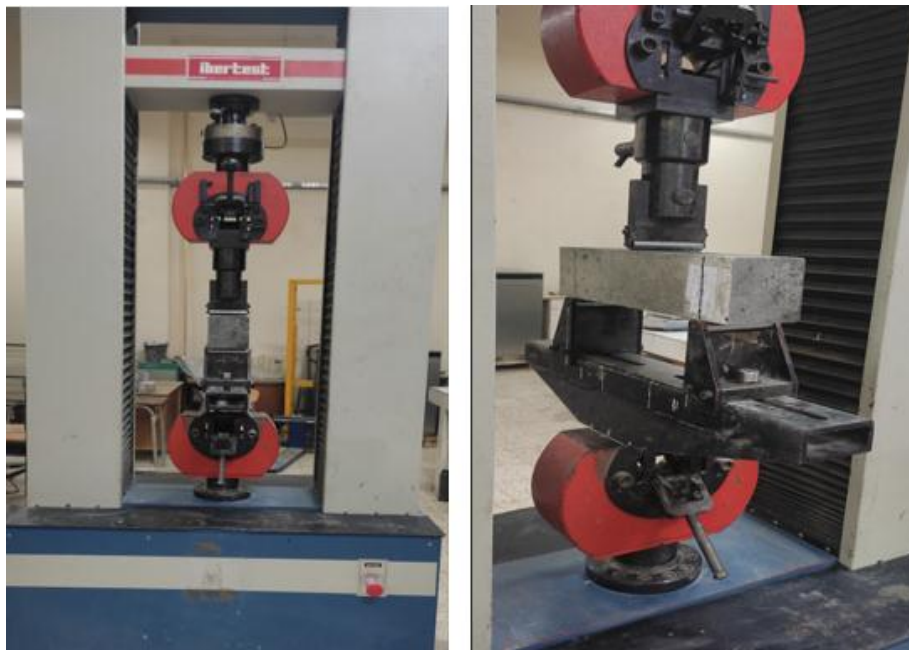


Figure III-5: la machine de flexion à trois points.



Figure III-6: éprouvette après écrasement(vue de près sur coté).

III.4.2 Essais de résistance à la compression

Les essais de compression ont été réalisés sur 7 éprouvettes, en utilisant la machine de compression de type «AUTOTEST» (figure 4.6). Les 3 éprouvettes de béton sont à base de déchets de poudre de verre, ces dernières en été conçue a ce qu'en remplace 10% de la quantité de ciment par 20% de poudre de verre. Et les 4 éprouvettes restantes sont celles du béton témoin. La vitesse d'écrasement utilisée est de 2 KN/s afin d'avoir les valeurs de résistance maximale et force maximale. Ensuite, nous avons déduit la meilleure variante à utiliser pour la suite de notre expérimentation.



Figure III-7: la machine de compression.



Figure III-8: éprouvette après écrasement.

III.5 Conclusion

Dans cette partie, nous avons exposé le matériel et la méthode utilisée pour le type d'essais adopté dans cette étude : essai de flexion et essai de compression pour différent pourcentage de remplacement de ciment portland par poudre de verre.

La campagne expérimentale a été exposée, en commençant par la description des matériaux utilisés, ainsi que leurs compositions. Allant de la préparation des spécimens en béton jusqu'à l'obtention d'éprouvettes prêtes à être soumises à un essai de flexion et de compression. La procédure de ces essais est également détaillée dans ce chapitre, en vue d'étudier la comparaison entre un béton ordinaire et un béton à base de poudre de verre. Une démarche qui s'inscrit dans le cadre du développement durable. Les différents résultats de ces essais de flexion et de compression sont exposés dans le chapitre IV.

Chapitre IV

Interprétation des résultats

Chapitre IV Interprétation des résultats**IV.1 Introduction**

A travers ce chapitre nous allons présenter et interpréter les résultats obtenus à l'issue des essais de flexion et de compression menés sur le comportement des poutres et des cylindres de béton témoin pour avoir la variante qui donne la meilleure résistance et des poutres et cylindres de béton à base de poudre de verre a différent pourcentage de poudre. Les résultats des différents essais en terme d'évolution de la flèche dans les différentes poutres sont présentés et discuter, sous forme d'histogrammes et de graphique contrainte-déformation

IV.2 Présentation des résultats du béton

Pour tous les essais de flexion et de compression nous avons confectionné 11 poutres (10*10*40) cm³, soit 5 éprouvettes pour béton témoin, 3 éprouvettes avec ajout de 10% de poudre de verre et 3 éprouvettes pour ajout de 20% de poudre de verre, avec 9 cylindres (10*20) cm², soit 3 éprouvettes pour chaque variante (béton témoin, B10%PV, B20%PV). Le tableau (5.1) présente les notations et compositions des éprouvettes.

Tableau IV-1:Notations et compositions des éprouvettes de béton en poudre de verre(PV).

Notation	Composition en %
BT (béton témoin)	0%PV
B10%PV	-10% ciment ; +10%PV
B20%PV	-10% ciment ; +20%PV

IV.2.1 Résistance en compression des bétons à 28 jours

Les essais de compression, sur les éprouvettes cylindriques, ont été réaliser à 28 jours d'âge. Ils ont permis de déterminer la valeur moyenne de la résistance en compression du béton. Les résultats des résistances obtenues à 28 jours sont présentés dans le tableau (IV.2).

Tableau IV-2: résultats des essais de compression des bétons étudiés.

Béton	Résistance à 28 jours (Mpa)
BT	31.57
B10%PV	22.38
B20%PV	23.40

Nous avons présenté sous forme d'histogramme les résistances moyennes enregistrés pour les différentes variantes de bétons étudiés dans la figure ci-dessous.

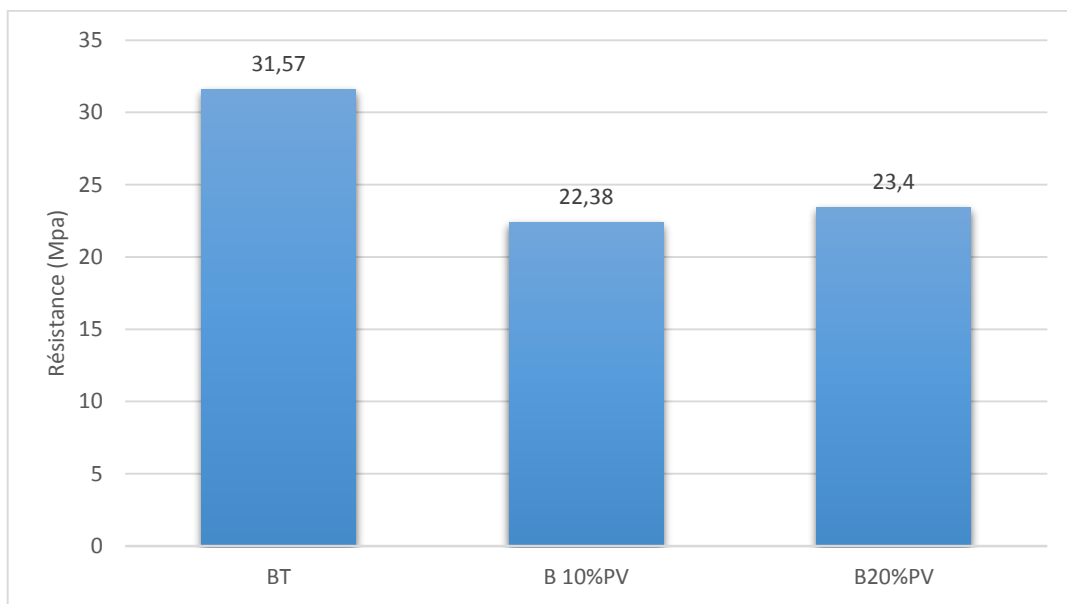


Figure IV-1: Résistance à la compression des bétons.

Sur cette figure, on constate que les bétons avec ajout de la poudre de verre et pour les différents pourcentages (10% ; 20%) ont présentés des résistances légèrement inférieures comparées à la résistance du béton témoin.

Le béton avec un ajout de 20% de poudre de verre à présenter une résistance supérieure par rapport aux béton avec 10% d'ajout de poudre de verre. La meilleure résistance est donnée par la variante (B20%PV) qui est de l'ordre de 23.4 Mpa. Alor que la plus petite résistance est donnée par la variante (B10%PV) qui est de l'ordre 22.38 Mpa.

Pour les bétons avec différents ajouts de poudre de verre, ont présentés une chute de résistance qui varie entre 8.17 Mpa et 9.19 Mpa.

Cette chute de résistance peut s’expliquer par le fait que la réaction pouzzolanique de la poudre de verre ajouté à notre béton, n’as pas eu le temps de se développer correctement à 28 jours, car ce n’est qu’à partir de 90 jours que cette réaction commence à se développer. Ce phénomène s’explique par l’interaction entre la silice réactive qui se situe dans la poudre de verre et la portlandite libérée par l’hydratation du ciment ce qui donne à la poudre de verre la propriété de fixé la chaux. Ceci a été constaté par plusieurs auteurs [30] ; [31].

IV.2.2 Courbes contrainte-déformation

Nous avons présenté les résultats des essais de compression sous forme de courbe contrainte-déformation. L’essai de compression est utilisé pour déterminer les caractéristiques mécaniques suivantes : résistance à la compression, module d’élasticité E. la mise sous contrainte à la compression doit être effectuer sans choc et d’une manière continue. Les résultats sont présentés sur la figure (IV.2)

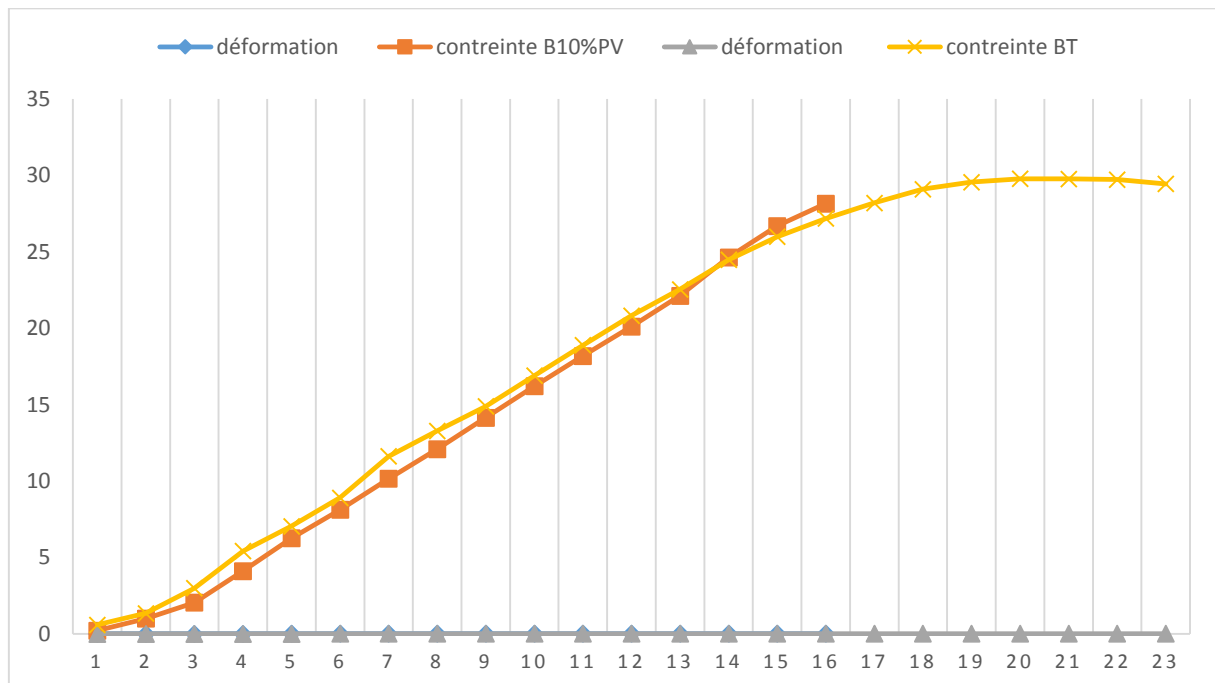


Figure IV-2: courbe contrainte-déformation à la compression du béton témoin et du

(B 10%PV)

Pour le béton avec un ajout de 10% de poudre de verre à présente une courbe contrainte-déformation presque identique à celle de notre béton témoin.

IV.2.3 Détermination du module d'élasticité E

Pour déterminer le module d'élasticité dit module de YOUNG, il suffit de calculer la tangente de la pente visible dans la courbe contrainte-déformation. Les valeurs issues de la figure (V.2) sont les suivantes :

Tableau IV-3 : le module d'élasticité E

Variante	Module d'élasticité E (Gpa)
Béton témoin	$2.75 \cdot 10^8$
B10%PV	$2.24 \cdot 10^8$

IV.3 Résistance en flexion des bétons

Les essais de flexion sur les poutres ont été réalisés à 28 jours d'âge, elles ont permis de déterminer la valeur moyenne de la résistance en flexion du béton. Les résultats des résistances obtenues à 28 jours sont présentés dans le tableau (IV.4)

Tableau IV-4: résultats de résistance moyenne à la flexion, la force et la flèche au pic des bétons étudiés.

Variantes	Résistance (Mpa)	Force au pic (Kn)	Flèche au pic (mm)	Force max (Kn)	Flèche max (Kn)
Béton témoin	5.66	12.453	0.88	12.583	1.642
B 10%PV	6.35	14.102	0.975	14.103	2.72
B 20%PV	5.97	13.222	0.885	13.264	2.02

L'analyse des résultats montre clairement l'amélioration en termes de résistance et de déformabilité de la poutre à base de poudre de verre par rapport à la poutre de référence. Cette amélioration est due à l'ajout de la poudre de verre dans la fabrication du béton, qui permet de retarder l'apparition de la première fissure, ceci procure à l'élément une rigidité flexionnelle très importante. Cet apport en rigidité permet à la fois : de faire travailler les matériaux jusqu'à leurs capacités maximales et d'éviter la rupture prématurée de l'élément considéré.

Nous avons représenté les résultats des essais de flexion sous forme de courbe force-déplacement. L'essai flexion à trois points est utilisé pour voir et étudier le comportement de l'élément poutre vis-à-vis la flèche et déterminer les caractéristiques mécaniques suivantes : la résistance en flexion et la flèche. La mise sous contrainte à la flexion doit être effectuée sans choc et d'une manière continue [6]. Les résultats sont présentés sur la figure IV.3.

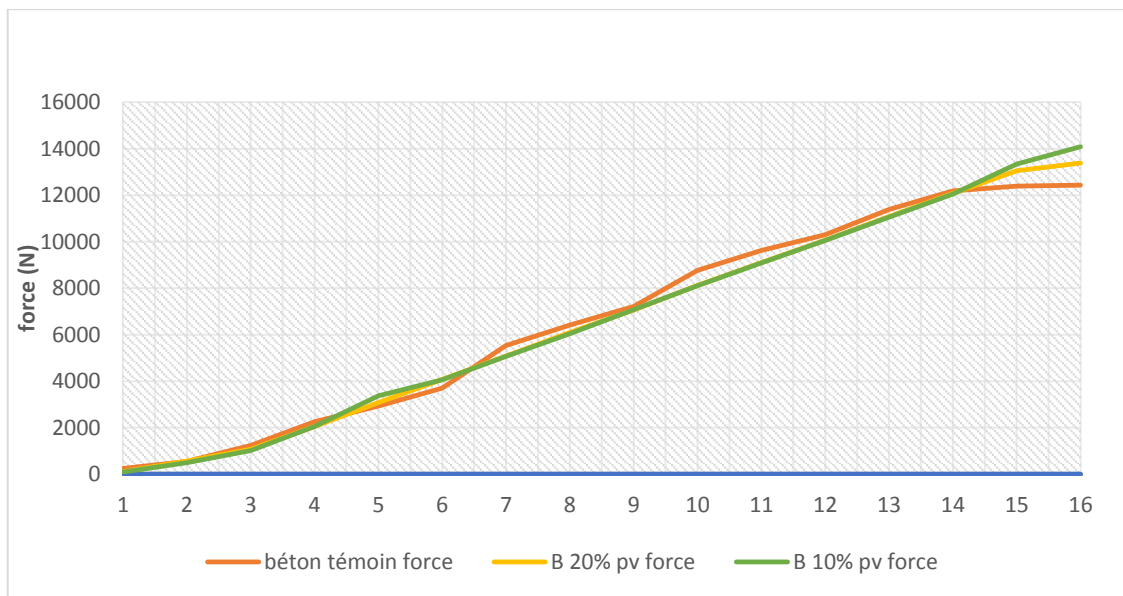


Figure IV-3: courbe force-flèche pour la flexion des différents variantes de béton

Pour ces résultats. On constate que toutes les variantes présentent presque la même pente jusqu'à atteinte de 12 kN de force, puis les deux variante (B 10%PV) et (B 20%PV) continue à fléchir davantage jusqu'à ce qu'elles atteignent leur valeur maximale.

Les valeurs de flèche maximal sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau IV-5 :valeurs maximal de la flèche des différents bétons.

Variantes	Flèche max (mm)
Béton témoin	1.37
B 10%PV	2.73
B 20%PV	2.02

Dans ce tableau on remarque que les valeurs de flèche maximal ce différent d'une variante à l'autre. La flèche maximale a été atteinte par la variante B 10%PV avec une valeur de 2.73 mm.

On remarque aussi que les bétons avec ajout de poudre de verre présentent une flèche supérieure à celle du béton ordinaire. Cela peut s'expliquer par l'effet de l'ajout de poudre de verre qui améliore la flexibilité du béton.

Nous avons représenté sous forme d'histogramme les résistances moyennes en traction enregistré pour les différentes variantes de béton étudié dans la figure ci-dessous.

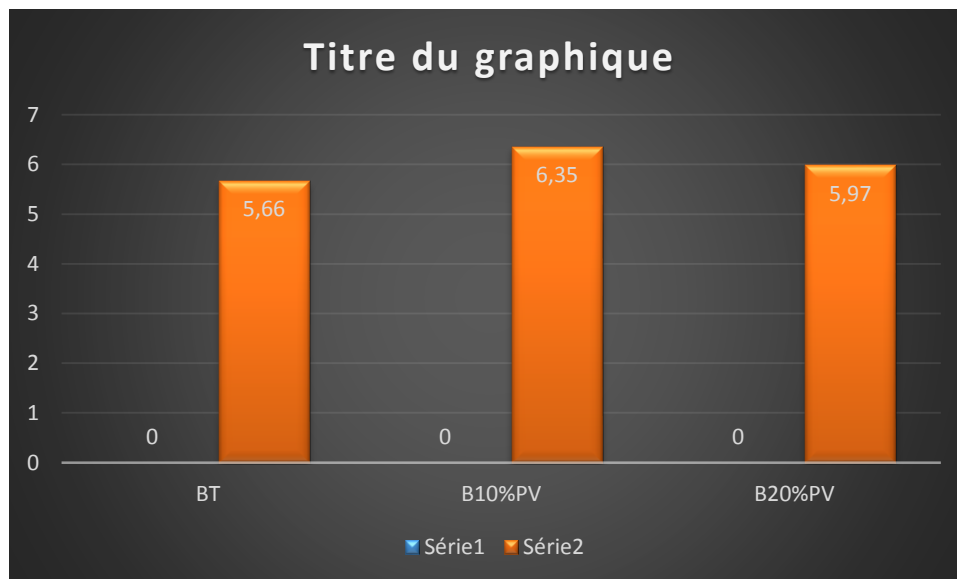


Figure IV-4: résistance à la flexion des bétons

Sur cette figure on constate que les bétons avec ajouts de la poudre de verre en différents pourcentage étudié (10% ; 20%) ont présenté des résistances légèrement supérieures comparées à la résistance du béton témoin.

Les bétons avec un ajout de 10% et de 20% de poudre de verre ont présenté des résistances supérieures par rapport au béton témoin. La meilleure résistance en flexion est donnée par la variante (B 10%PV) qui est de l'ordre de 6.35 Mpa suivie par la variante (B 20%PV) qui est de l'ordre de 5.97 Mpa. Alors que la plus petite résistance est donnée par la variante (BT) qui est de l'ordre de 5.66 Mpa.

Cette amélioration peut s'expliquer par le renforcement des granulats avec le verre recyclé dans le béton, l'ajout de poudre de verre améliore la résistance à la flexion du béton à la fois à 28 jours et à 90 jours de prise, la poudre de verre exerce donc un effet physique et chimique (réaction pouzzolanique et alcali-silice). Ceci a été constaté par plusieurs auteurs.

**Chapitre V Modélisation
du fluage avec fissure
mécanique**

Chapitre V Modélisation du fluage avec fissure mécanique**V.1 Introduction**

Dans ce chapitre, on présente une prédiction du comportement au fluage d'une poutre sous chargement constant, avec une ouverture de fissure, pendant une durée de chargement de 12h. Le but de la modélisation est de refléter les dispositifs de base du fluage dans une structure en donnant le contour des différents résultats issus de l'analyse tels que : Déformations élastique et plastiques, contour des contraintes élastique selon les modes de fissures à savoir : Mode I, Mode II et Mode III, courbes de fluages. La modélisation du comportement à long terme et de l'interaction sol structure nécessite les étapes suivantes :

1. Nécessité de regard sur la géométrie de la structure, type du chargement, conditions aux limites, etc. ;
2. Application d'un model rhéologique approprié, proche de la réalité de la structure.
3. Modélisation et génération de la fissure
4. Introduction de la loi de comportement au fluage
5. Une solution non linéaire du problème est entamée.

Le fluage par définition est la variation des déformations d'un matériau statiquement sollicité en fonction du temps, il comprend les déformations visqueuses, déformations élastiques et plastiques. L'étude du fluage consiste donc à établir la fonction : $\varepsilon = f(t)$ qui décrit la courbe expérimentale du fluage et de variation de la vitesse de déformation voire figures (V.1) et figure (V.2). Cette courbe illustre trois phases de déformation au fluage, à savoir : [36]

- Fluage primaire, au cours duquel la vitesse de déformation diminue rapidement, ce qui correspond à une augmentation de la résistance du matériau, ou encore à une consolidation ;
- Fluage secondaire, au cours duquel la vitesse de déformation reste sensiblement constante
- Fluage tertiaire, dans lequel la vitesse de déformation augmente jusqu'à la rupture.

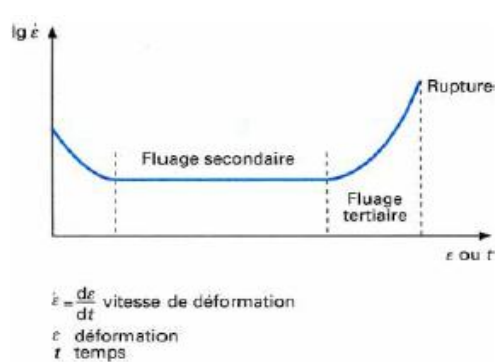


Figure V-2: Variation de la vitesse de Déformation [36]

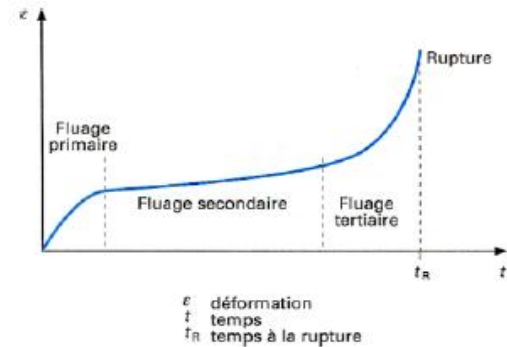


Figure V-1: courbe de fluage

ABAQUS, ADINA, ANSYS, COSMOS constituent une variété de logiciels développés afin de solutionner des problèmes de la mécanique. Par conséquent, des modèles spécifiques avec des variables internes, de types de contraintes et les fonctions de température ainsi que les constantes de matériau sont exposés sous forme de sous-routines à des fins expérimentales afin qu'ils soient commercialisés.

V.2 Mécanismes de fluage. Effet de la température sur la microstructure du matériau

V.2.1 Mécanismes à basses températures

Aux basses températures ($T < 0,4$ à $0,5T_f$), il s'agit d'une déformation plastique, liée à des **mécanismes de dislocations**. Lors du chargement et du fluage primaire, il y a surtout création et propagation des dislocations. En général, ces dislocations ne forment pas de structures cellulaires particulières, elles sont enchevêtrées. On observe les structures formées par glissement des dislocations : bandes de déformation et lignes de glissement plus ou moins espacées suivant la contrainte appliquée et le temps de fluage. Lors du fluage secondaire, les dislocations s'assemblent pour former une structure cellulaire plus ou moins nette : cela correspond à une polygonisation du glissement. Les murs des cellules sont constitués de dislocations enchevêtrées (figure V.3).

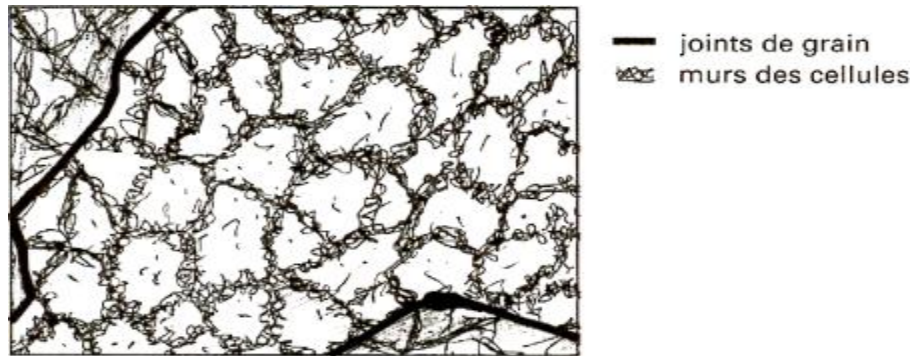


Figure V-3:Schéma d'une structure cellulaire

Ces cellules sont d'autant moins formées que la température est basse. Elles présentent bien souvent un allongement suivant le type de glissement activé. La densité de dislocations reste stable au cours de ce stade. La sous-structure se forme et se détruit constamment : il y a équilibre entre les processus de formation et d'annihilation des dislocations. En revanche, la désorientation entre les sous-grains augmente avec le temps. Tout se passe comme si le processus de formation et d'annihilation des dislocations concourait uniquement à l'accroissement de la désorientation des sous-grains entre eux.

V.2.2 Mécanismes à hautes températures

La différence entre le fluage à basses et à hautes températures ($T > 0,4$ à $0,5T_f$) est liée à la présence de mécanismes de montée des dislocations, phénomène qui est thermiquement activé. Comme précédemment, le chargement et le fluage primaire correspondent à la création et à la propagation des dislocations. Il y a néanmoins une nette tendance à la formation de cellules de dislocations lors du fluage primaire. La disparition de la structure de plastification en fin de chargement est réalisée par restauration (mise en jeu des mécanismes de montée et de glissement dévié des dislocations). Les lignes de glissement sont réparties de manière régulière. Les cellules de dislocations sont nettement équiaxes et divisent chaque grain en sous-grains désorientés les uns par rapport aux autres. La densité de dislocations mobiles décroît au cours de ce stade. L'établissement du fluage secondaire, ou stationnaire, correspond toujours à la présence d'une sous-structure de dislocation parfaitement formée (figure V.3). La taille des sous-grains n'est une fonction ni du temps, ni de la déformation. Elle dépend uniquement de la contrainte appliquée : la taille des sous-grains est inversement proportionnelle à la contrainte σ et n'évolue pas pendant le fluage secondaire.

La densité de dislocation est stable. Il y a équilibre entre les processus de formation et d'annihilation des dislocations. Pour les **très fortes contraintes**, un phénomène de recristallisation, avec accélération de la vitesse de déformation, peut se produire en cours de fluage. Pour les **très hautes températures** ($T > 0,8T_f$), le transport de matière par autodiffusion est prépondérant. La déformation est alors de nature visqueuse. Le transport d'atomes par

diffusion s'effectue avec un contre-courant de lacunes qui s'éliminent au niveau des surfaces libres : c'est le **fluage Nabarro**. Ce fluage est d'autant plus important que la taille de grain est petite. En effet, les joints de grain sont des chemins privilégiés pour la diffusion : entre deux grains d'orientation différente, il existe de nombreux atomes interstitiels et des lacunes. D'une manière générale, la vitesse de fluage augmente avec la diminution de la taille de grain ou, autrement dit, avec l'augmentation de la longueur des joints de grain, il y a augmentation du glissement aux joints.

V.2.3 Cas particulier du micro fluage

Des alliages tels que les alliages base fer contiennent toujours une certaine quantité d'impuretés qui sont soit en position interstitielle dans le réseau, soit en substitution des atomes de la maille cristalline. Au niveau d'une dislocation, le réseau est déformé localement. Les dislocations, lors de leur propagation, captent les impuretés dans leur voisinage immédiat. Si la déformation a lieu à une certaine température, la diffusion permet à ces impuretés de se déplacer près des dislocations et de former ce qui est appelé un nuage d'impuretés ou une atmosphère d'impuretés qui opposent une certaine résistance à la propagation des dislocations. Si la contrainte de fluage est suffisante, les dislocations peuvent se déplacer indépendamment de ce nuage mais, pour une très faible contrainte (ou microfluage), les dislocations ne peuvent s'échapper du nuage d'impuretés. La propagation des dislocations est une fonction de la diffusion du nuage accompagnant les dislocations. Il s'agit alors du mécanisme de traînage des impuretés par les dislocations.

V.2.4 Cavitation lors du fluage tertiaire et rupture

Le stade tertiaire correspond à l'apparition de cavités et de fissures dans tout le matériau, surtout au niveau des joints de grain. La **cavitation** est divisible en trois stades :

- **L'amorçage**, qui est la naissance des cavités bien souvent au niveau des lignes de glissement à l'intersection des joints de grain, des inclusions, des ségrégations, des joints triples ou, encore, à l'interface de deux phases de nature différente ; la naissance des cavités peut avoir lieu avant le stade tertiaire (figure V.4) ;
- **La croissance**, due à la diffusion de lacunes et à la présence d'un champ de contraintes autour des cavités ;
- **La coalescence**, correspondant à la fusion entre cavités entraînant la création des fissures, ce stade précédant la propagation de celles-ci (figure V.5).

- **La rupture** se produit par augmentation de la contrainte, due à la diminution de section de l'éprouvette résultant de la formation des cavités. La rupture par fluage des alliages métalliques est en général intergranulaire à hautes températures, tandis qu'elle est intragranulaire à basses températures.

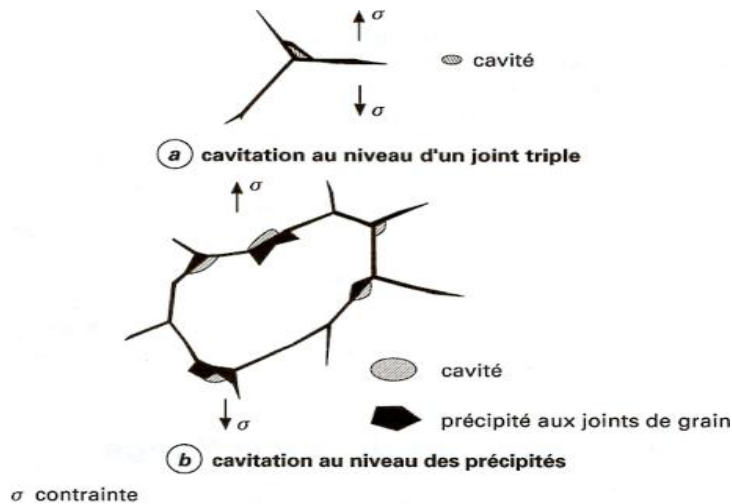


Figure V-4: Cavitation entre grains

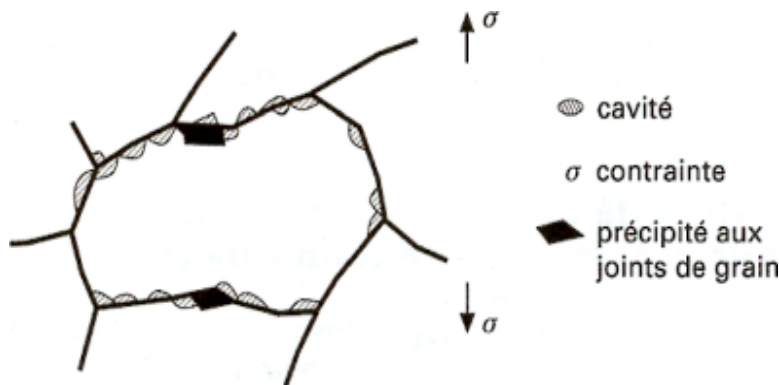


Figure V-5: Coalescence des cavités le long des joints de grain

V.3 Présentation du logiciel ANSYS

Le logiciel ANSYS a été développé par Dr. John Swanson, fondateur de la société ANSYS Inc. qui a son siège Houston, USA. Il s'agit d'un outil de développement en analyse d'ingénierie. ANSYS est un code en éléments finis d'usage général dédié à la résolution numérique d'une large variété de problèmes physique en général et de mécanique en particulier. Ces problèmes portent notamment sur : l'analyse structurale en statique et en dynamique

Chapitre V

Modélisation du fluage avec fissure mécanique

(linéaire et non linéaire), transfert de chaleur, dynamique des fluides, acoustique, électromagnétique. Le traitement des problèmes de technologie contient fondamentalement trois étapes principales : [34]

1) Préprocesseur :

- Choisir le type d'éléments
- Enter les propriétés géométriques
- Entrer les paramètres physiques
- Créer le maillage : définir les nœuds et les éléments
- Appliquer les sollicitations
- Imposer les conditions aux limites

2) Solveur :

- Choisir le type d'analyse (statique, dynamique,..)
- Construire la matrice et le vecteur élémentaire $[ke]$, $\{fe\}$
- Assembler $[ke]$ et $\{fe\}$ dans $[K]$ et $\{F\}$
- Prendre en compte les conditions aux limites
- Résoudre le système d'équations $[K] \{U\} = \{F\}$
- Calculer les variations additionnelles (gradients, réactions...)

3) Post-processeur

- Présenter les résultats sous :
 - Forme numérique
 - Forme graphique
- Effectuer des fonctions complémentaires : combinaisons, interprétation, interpolation, animation,

V.3.1 Procédures de modélisation

- **Pre-Processing** : Définir le Problème

1) Donner un Titre au Problème (par exemple 'Modélisation d'un tunnel'). Dans la barre Utility menu sélectionner : File > Change Title :

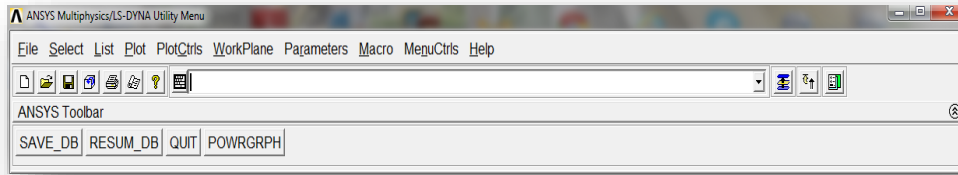


Figure V-6: Donner un titre à l'analyse

2) Choix d'unité (MKS)

- Pour définir l'unité qu'on veut utiliser, on doit suivre les étapes suivantes ;

Preprocessor > Material Props > Material Library > select Units

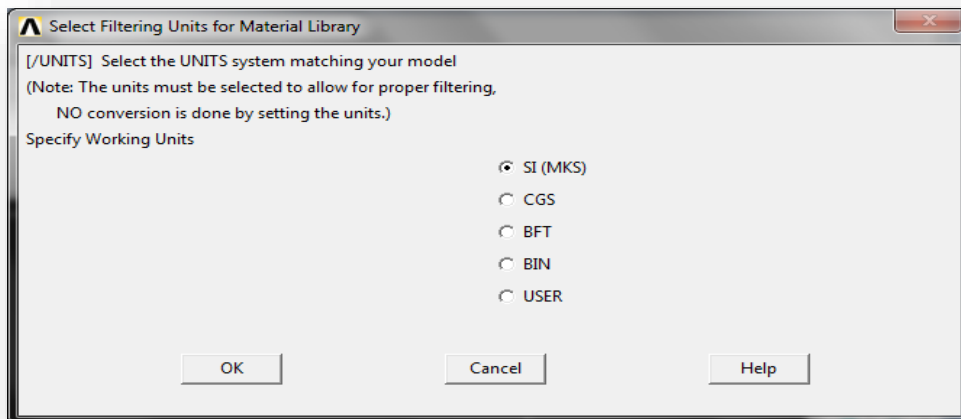


Figure V-7: Choix d'unité des paramètres.

3) Définir les propriétés physiques de l'élément

Nous devons définir les propriétés mécaniques du matériau utilisé par l'interface de la figure suivante. Dans le menu 'Preprocessor', sélectionner Material Props > Material Models

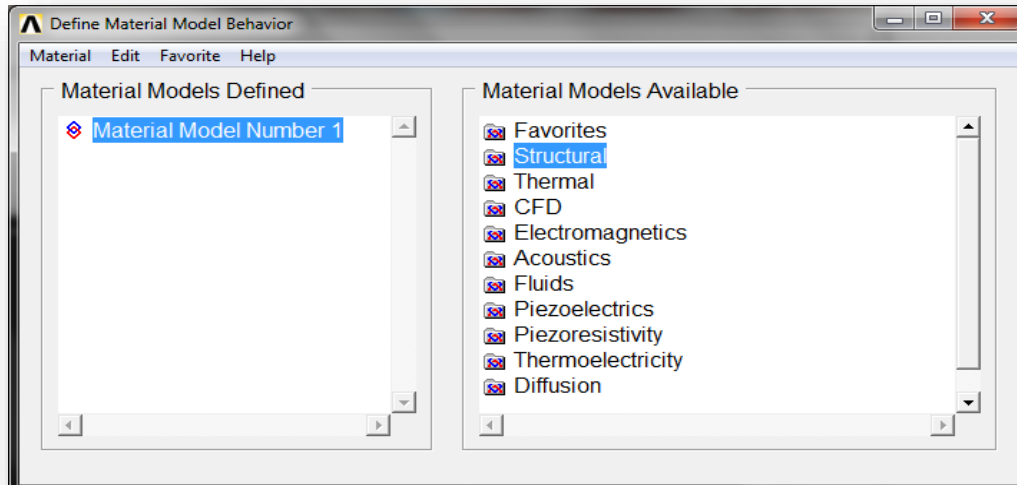


Figure V-8: Interface d'introduction des propriétés des matériaux

- Cliquer sur **Structural > Linear > Elastic > Isotropic**

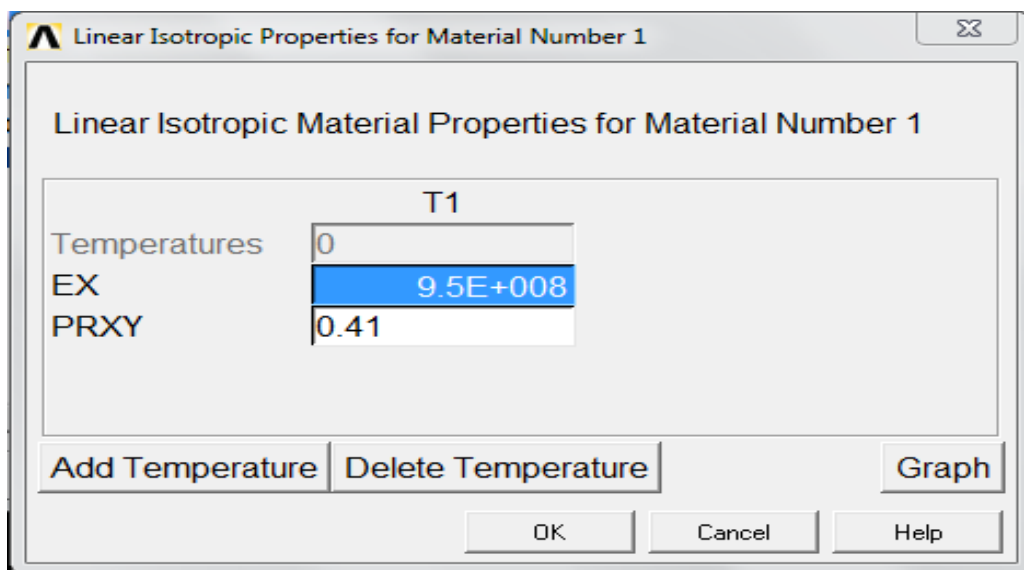


Figure V-9: Module de Young et le coefficient de Poisson du béton bitumineux

- .Cliquer sur '**OK**' pour continuer.
- On clique sur : **structural > Density**

V.4 Procédure de modélisation du fluage par Ansys

Le fluage implicite (Implicit creep) est la méthode la plus utilisée dans le programme ANSYS pour des raisons d'efficacité et d'exactitude. On la programme par l'utilisation de la commande TB avec $Lab = CREEP$, et choisir l'équation du fluage correspondante en spécifiant le numéro du model qu'il lui correspond par la commande $TBOPT$, voir exemple si dessous :

TB,CREEP,1,1,4,2

TBTEMP,100

TBDATA,1,C1,C2,C3,C4

$TBOPT = 2$: Spécifie l'équation de la loi de comportement du model 2 du fluage.

Elle est définie comme étant la loi de fluage dite (time hardening) dans Ansys. Elle décrit la Variations de " ϵ_{cr} " en fonction de plusieurs paramètres. La commande TBTEMP implique l'introduction de la température et TBDATA est celle qui introduit les constantes du fluage associé à l'équation (C1, C2, C3, C4), selon la procédure suivante : **Main Menu>Pre-processor>Material Props>Material Models (Figure IV.10)**

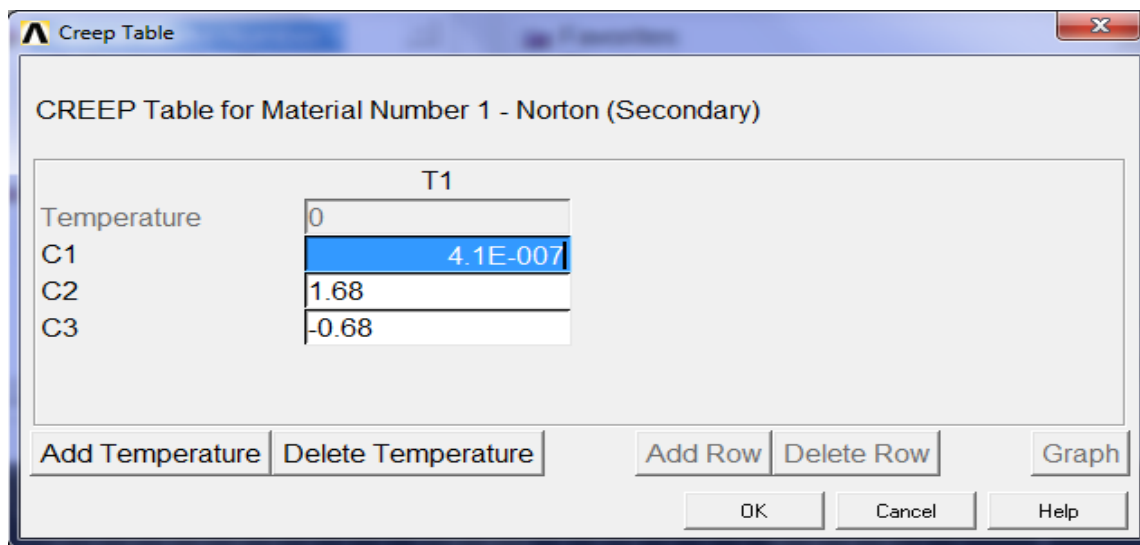


Figure V-10: Introduction des Constantes de fluage

V.4.1 Formulation du fluage et discrétisation de la structure en éléments finis

Le logiciel Non commercial ANSYS, est l'un des simulateurs puissant d'analyse structural basé sur la méthode des éléments finis. Il est ainsi utilisé dans l'analyse et l'évaluation transitoire des transferts thermiques dans les matériaux, le calcul de champ de contraintes résiduelles pendant le chargement, etc. L'analyse effectuée par ANSYS inclue deux étapes, à savoir :

Chapitre V

Modélisation du fluage avec fissure mécanique

- La 1ère étape consiste à modéliser la structure en élément finis en choisissant l'élément qui convient au type d'analyse à effectuer, comme par exemple : l'élément **PLANE 55** convient pour les problèmes thermiques et l'élément **PLANE 183 (fig V.12)** pour l'analyse structural.

- La 2e étape, est subdivisée en trois à savoir : [37]

- 1) L'étape pré- processeur : qui consiste à introduire la géométrie du problème, propriétés des matériaux tel que (constantes du fluage, le module de rigidité, coefficient de poisson, densité, conductivité thermique, etc..) et les conditions au limite.

- 2) Tandis que, dans l'étape solution, on choisit le type d'analyse qu'on doit effectuer.

- 3) Finalement, les résultats de la solution effectuée sont observés dans l'étape post-processeur.

Afin, de modéliser le fluage, le model utilisé dans notre étude est le model donné en équation (V.1). On considère que le matériau est isotropique, et la méthode de solution de base utilisée est celle de Newton-Raphson.

$$\dot{\epsilon}_{cr} = C_1 \sigma^{C_2} t^{C_3} e^{-\frac{C_4}{T}} \quad (V.1)$$

Avec :

$\dot{\epsilon}_{cr}$: Vitesse de déformations de fluage (déformation de fluage de la rate),

σ : Contrainte équivalente, t: Temps de chargement, C1, C2, C3, C4: Paramètres de fluage du béton,

T: Température du milieu en Kelvin, On prend C4 = 0

L'introduction de la loi de comportement (du fluage) se fait par l'intermédiaire de l'interface suivante (Voir figure V.11)

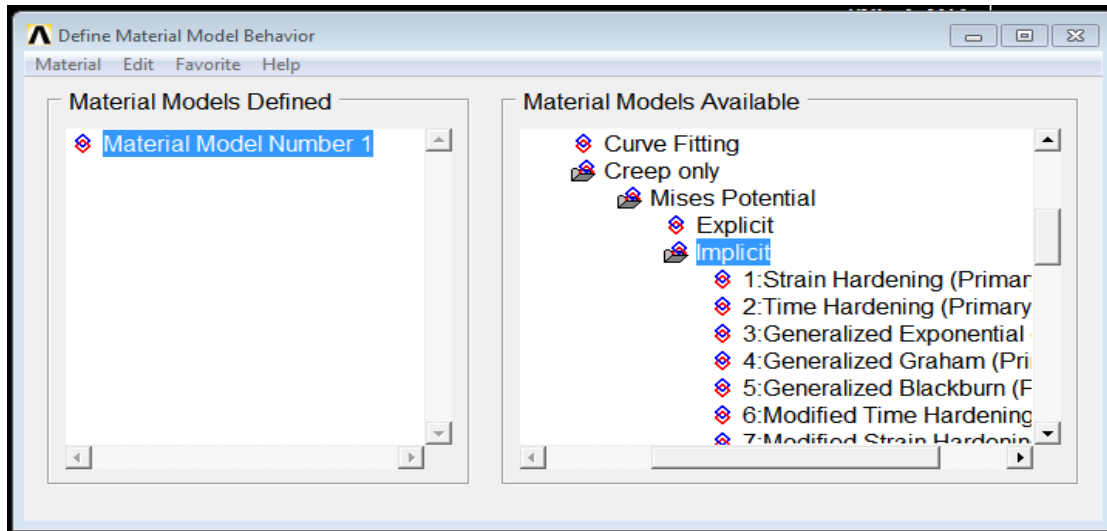


Figure V-11: Introduction de la loi de comportement au fluage

La figure V.12 suivante illustre la discrétisation de la poutre en élément finis PLANE 182, avec un nombre de 177 éléments.

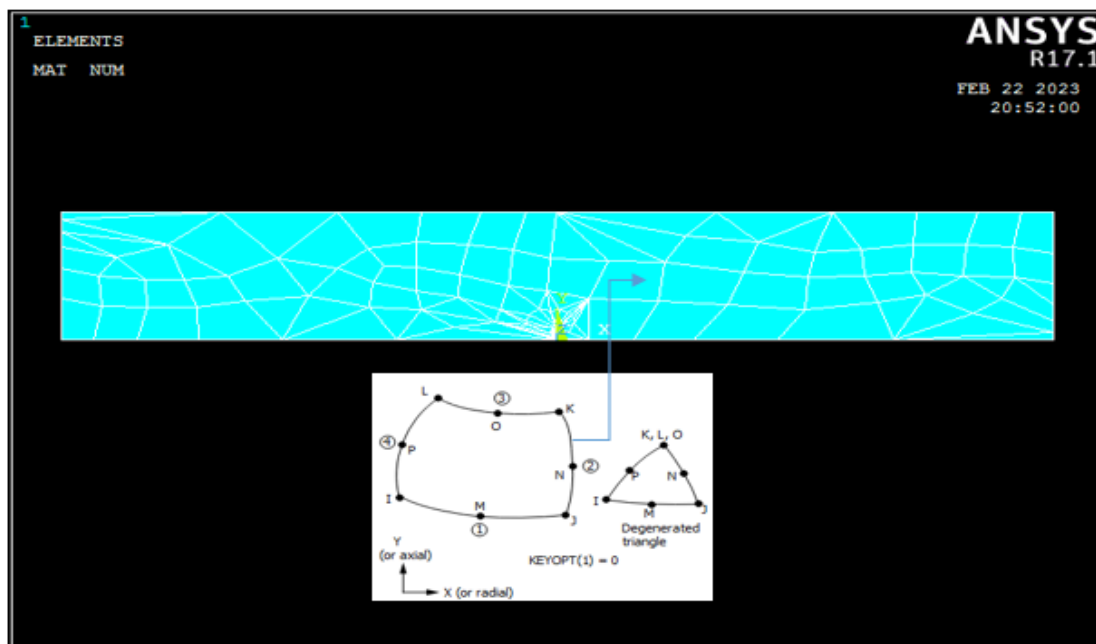


Figure V-12: Discrétisation de la poutre en Élément Finis PLANE 182 (ANSYS Technology Guide 7)

Chapitre V

Modélisation du fluage avec fissure mécanique

Les figure V.13 et IV.15 suivantes, illustrent le contour de déformations au fluage suivant les axes X et Y.

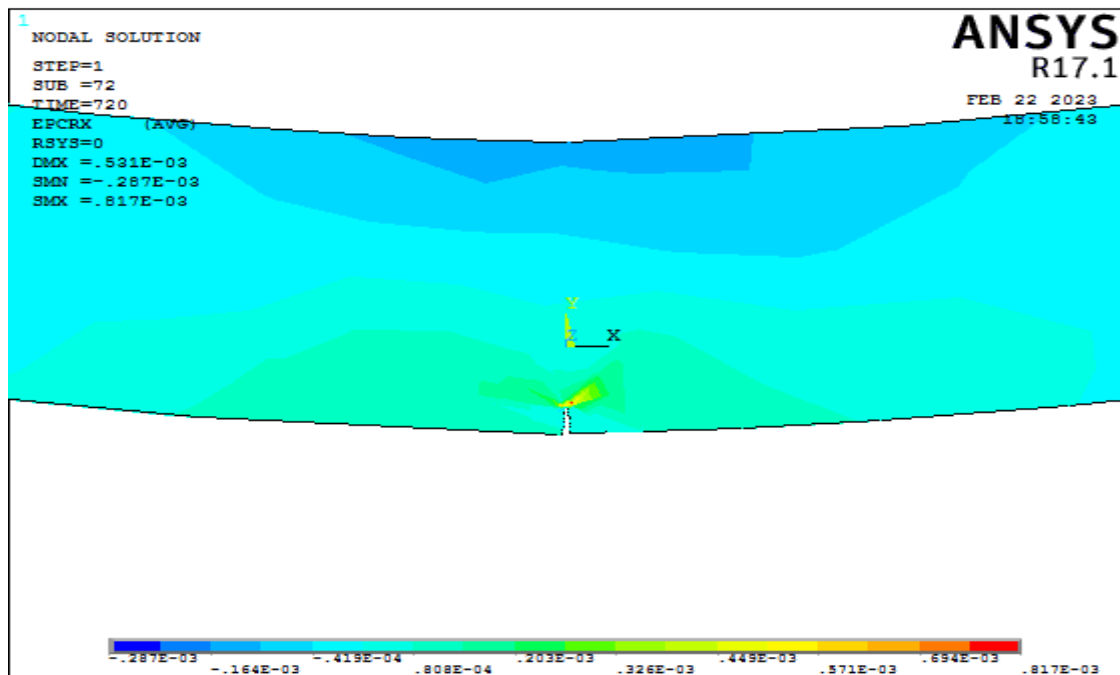


Figure V-13:Contour de déformations au fluage « ϵ_x^{fl} »

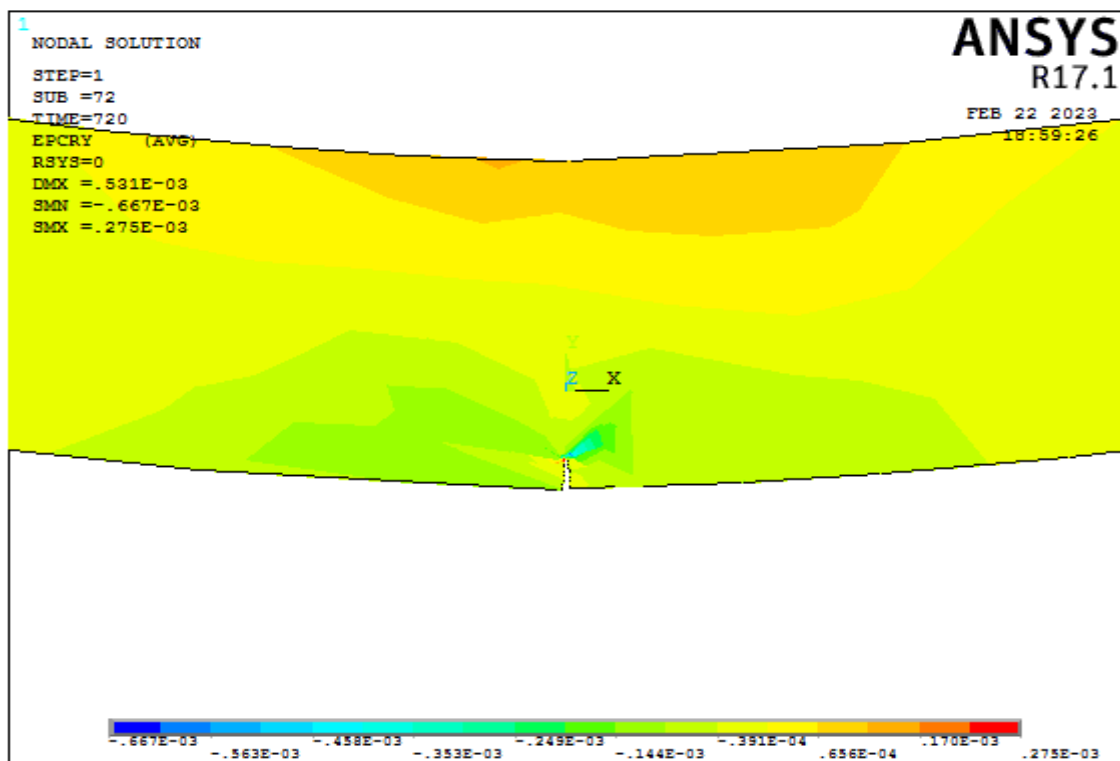


Figure V-14:Contour de déformations au fluage « ϵ_y^{fl} »

La figure V.16 illustre la courbe du fluage sous différentes contraintes (10 MPa, 25MPa et 75 MPa)

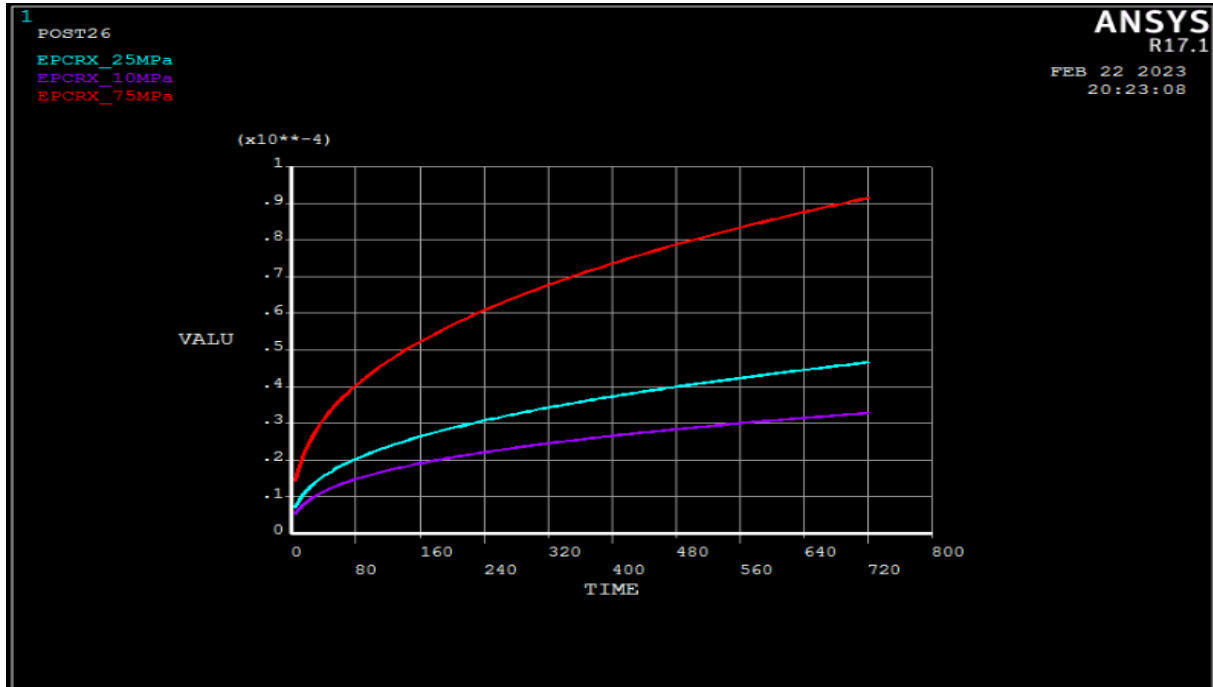


Figure V-15: Courbe de fluage « ϵ_y^{fl} » selon l'équation V.1

V.5 Procédure de modélisation de fissure par Ansys

Une fissure est une discontinuité dans le matériau, où la contrainte de traction ne peut pas être transférée. Étant donné que des gradients de contrainte élevés existent dans la région autour de la pointe de la fissure, la modélisation par éléments finis d'un composant contenant une fissure nécessite une attention particulière dans cette région. [32] expose l'équation des contraintes élastique autour de la pointe de la fissure en coordonnées polaire comme suit :

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[2 + \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \\ \sigma_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \end{aligned} \quad \text{V.2}$$

La Variation des contraintes autour de la fissure a, b

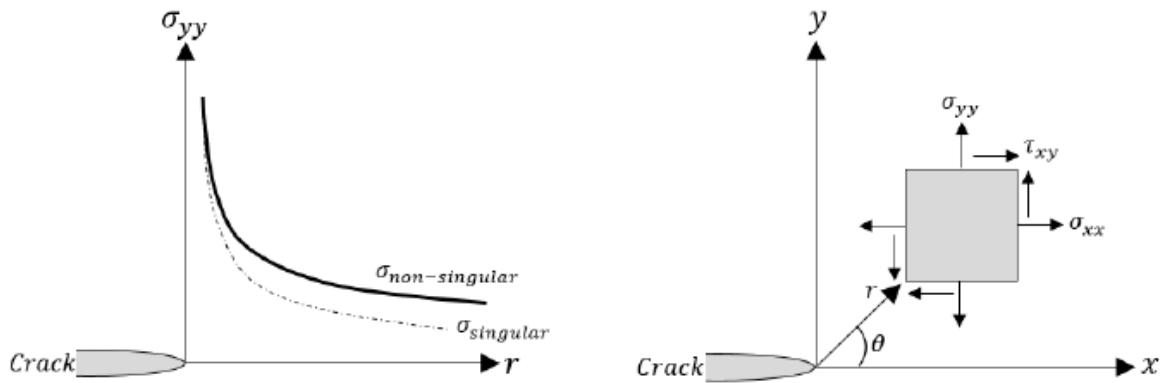


Figure V-16 : (a) Variation des contraintes autour de la fissure, (b) Contraintes en coordonnées polaire

Irwin a développé le facteur d'intensité de contraintes K, qui décrit les conditions de la pointe de la fissure relative aux contraintes appliquées. Pour les deux Modes I et II, le facteur d'Intensité de contrainte est donné comme suit :

$$K_I = \sigma \cos^2(\beta) \sqrt{\pi a} \quad \text{(V.3)}$$

$$K_{II} = \sigma \sin(\beta) \cos(\beta) \sqrt{\pi a} \quad \text{(V.4)}$$

[34] a donné la solution Analytique pour les facteurs d'Intensité de contraintes K_I et K_{II} des Modes I et II comme suit :

$$K_I = \frac{P}{BW} \sqrt{\pi a} \left[1,12 - 0,231 \left(\frac{a}{W}\right) + 10,55 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 21,72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 30,39 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right]$$

$$K_{II} = \frac{P}{BW} \sqrt{\pi a} \left[4,886 \left(\frac{a}{W}\right) - 11,383 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 28,198 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 38,563 \left(\frac{a}{W}\right)^4 + 20,555 \left(\frac{a}{W}\right)^5 \right]$$

Avec :

σ : Contrainte,

β : Angle d'inclinaison de la fissure,

a : demi longueur de la fissure,

W : est la largeur de l'élément.

[35] a présenté les trois modes de fractures mécaniques, selon la figure IV.18 suivante :

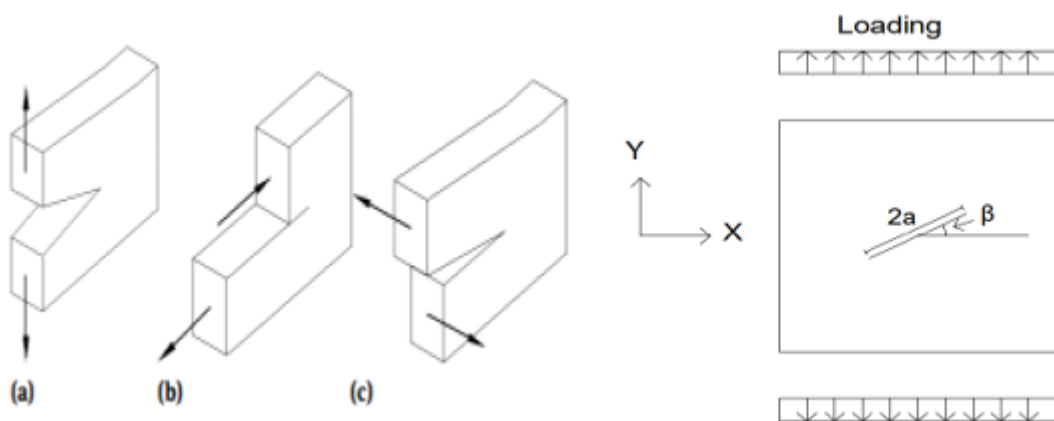


Figure V-17: Trois Modes de Fractures

(a) Mode I : ouverture,

(b) Mode II : Cisaillement plan,

(c) mode III : Cisaillement hors plan. [36]

L'angle d'inclinaison de la fissure [37] ont donnés une autre solution analytique pour les facteurs d'Intensité de contraintes K_I et K_{II} des Modes I et II comme suit :

$$K_I = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\pi R \sin \beta} \left[\frac{\left(1 - \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right)\right) \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}{1 + \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right)} + \cos\left(-\frac{3\beta}{2}\right) \right] \quad \text{V.5}$$

$$K_{II} = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\pi R \sin \beta} \left[\frac{\left(1 - \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right)\right) \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}{1 + \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right)} + \sin\left(-\frac{3\beta}{2}\right) \right]$$

La méthode la plus simple pour la modéliser, consiste à créer une petite discontinuité ou un «écart» dans la géométrie à l'endroit où la fissure devrait se trouver, et à mailler autour d'elle avec des éléments PLANE183 voir figure V.18.

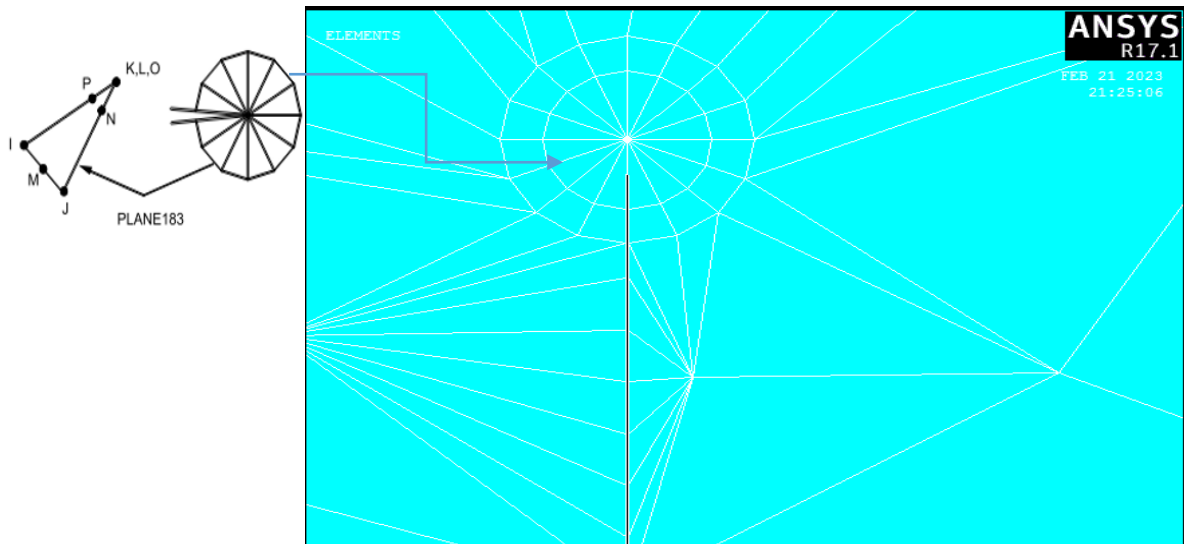


Figure V-18:Modélisation de la fissure avec les éléments PLANE 183

Les figure V.19 et V.20 suivantes, illustrent la variation des contraintes autour de la pointe de la fissure (fissure droite et fissure incliné à 45°).

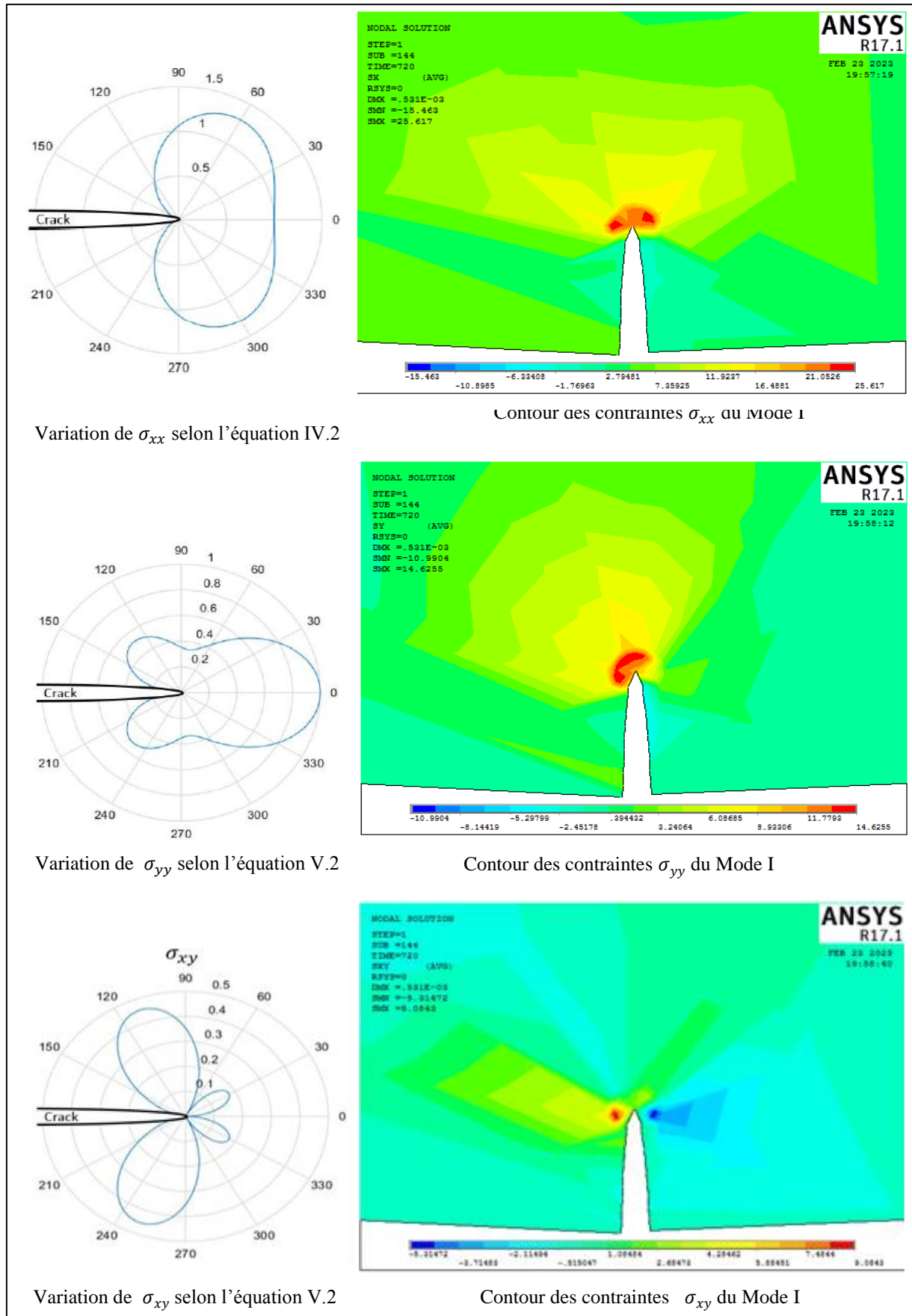


Figure V-19:Variation des contraintes selon le Mode I

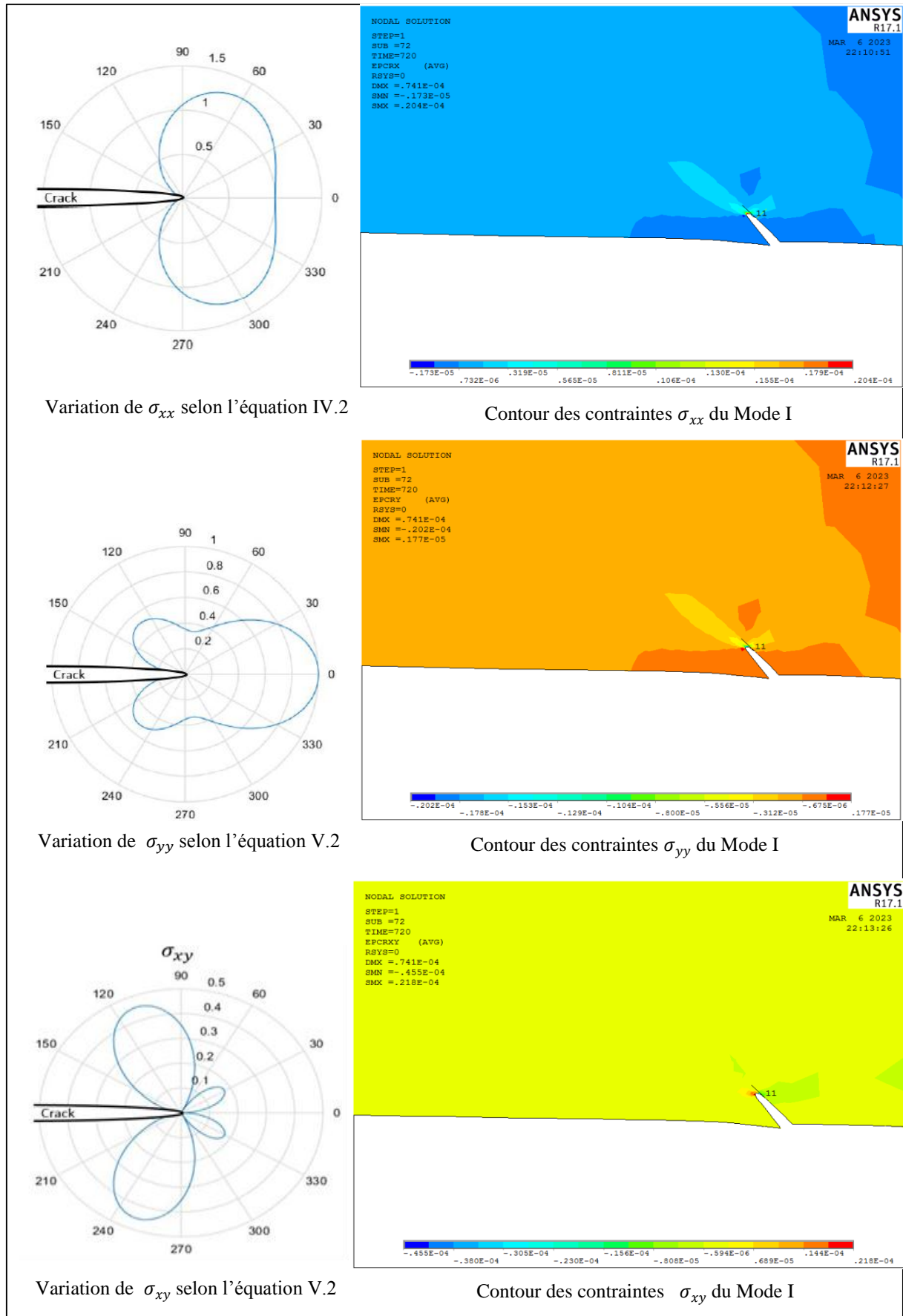


Figure V-20: Variation des contraintes selon le Mode I

Les figures V.21, V.22 et V.23 suivantes, illustrent les déplacements U_x et U_y ainsi que les déformations du fluage dans le plan XY

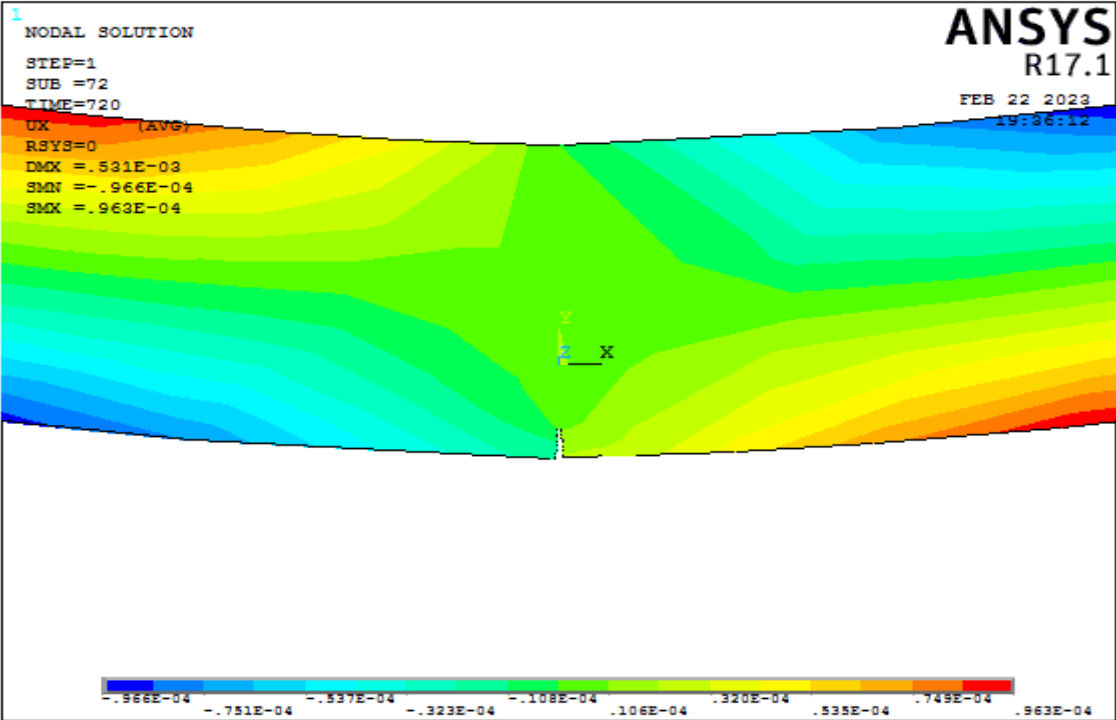


Figure V-21:Contour des déplacement U_x .

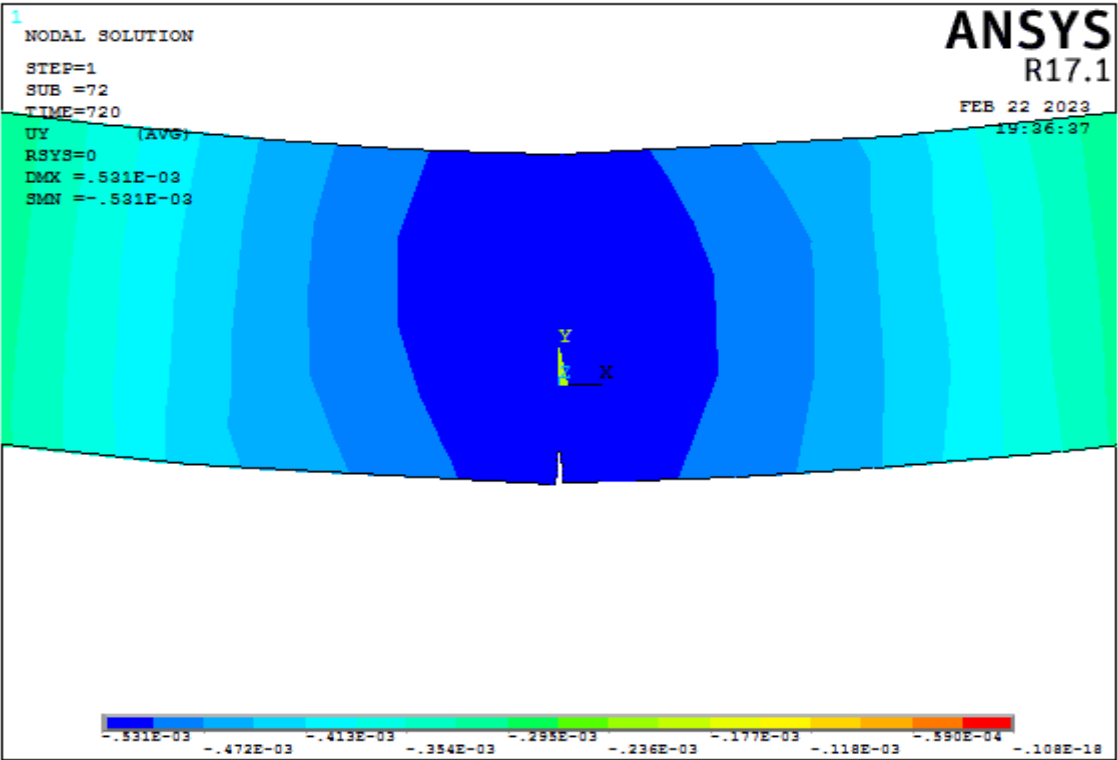


Figure V-22:Contour des déplacements Uy

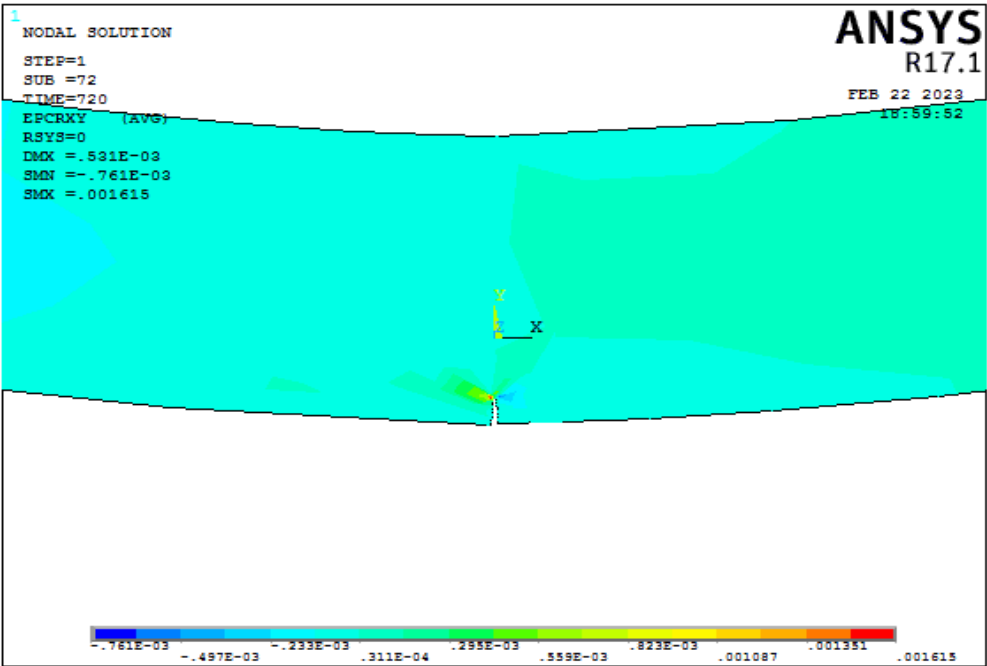


Figure V-23:Contour de déformations du fluage dans le plan XY

Les figures IV.24, IV.25 et IV.26 suivantes illustrent le contour de la 1^{er}, la 2eme contraintes et la 3eme Déformations principales du fluage.

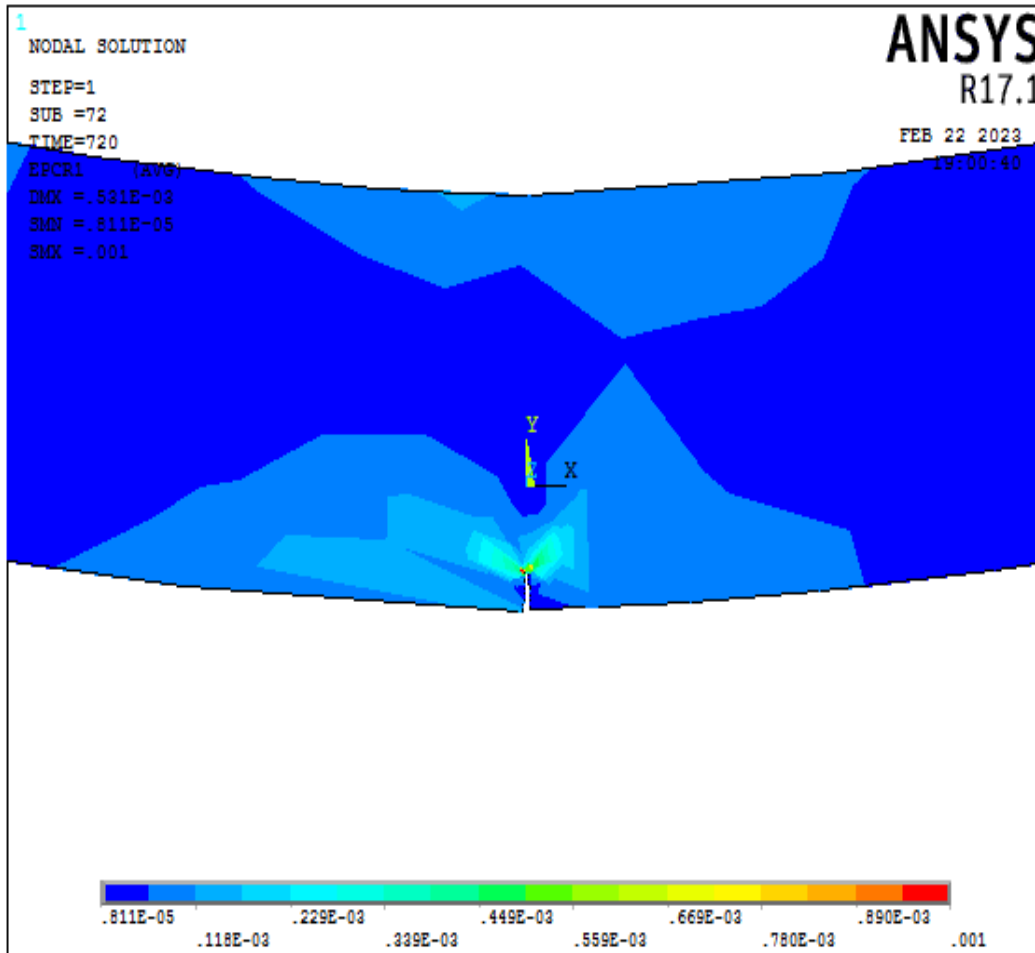


Figure V-24:Contour de la 1er Déformation principale du fluage « ϵ_I^{fl} »

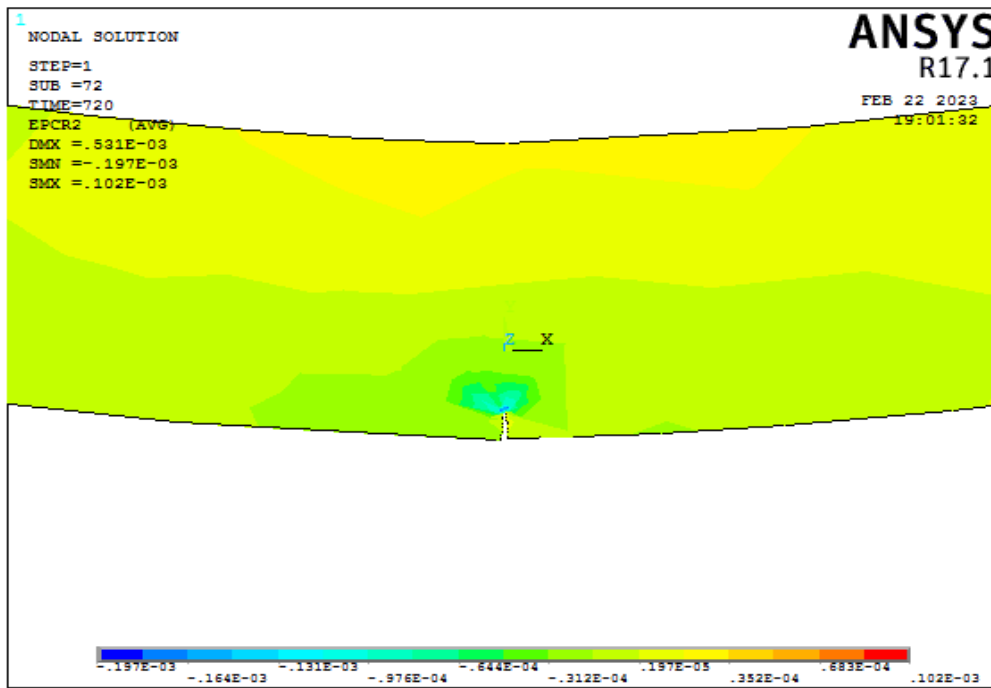


Figure V-25:Contour de la 2eme Déformation principale du fluage « ϵ_{II}^{fl} »

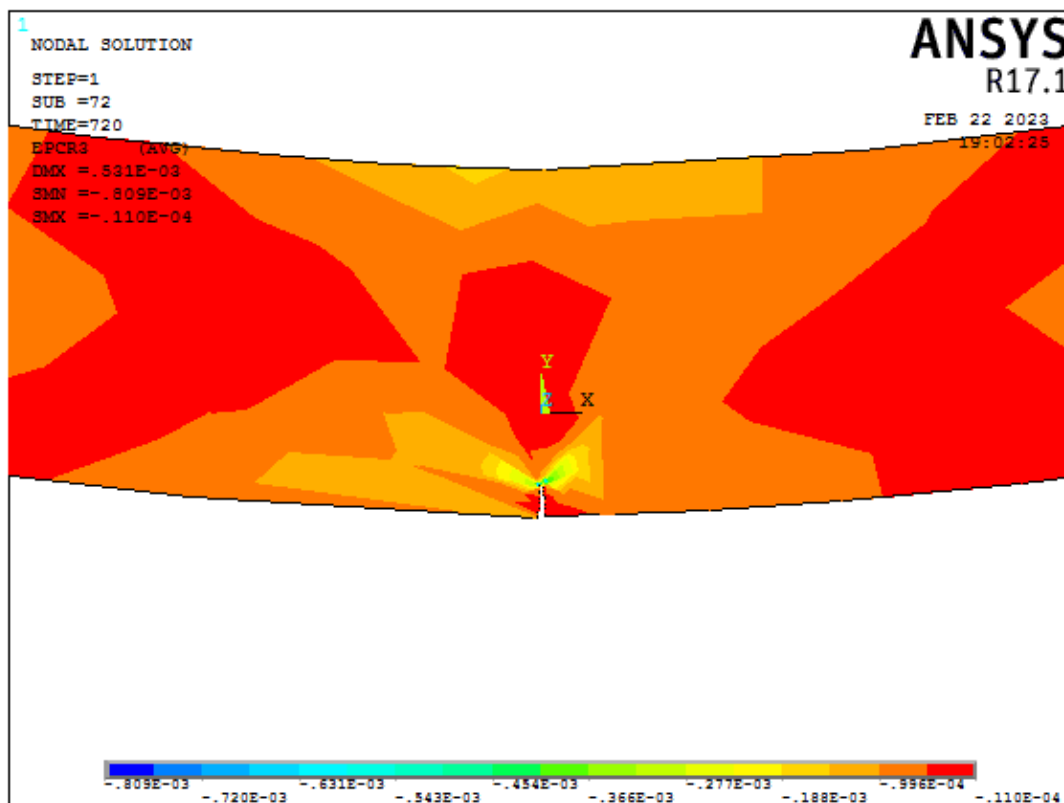


Figure V-26:Contour de la 3eme Déformation principale du fluage « ϵ_{III}^{fl} »

V.6 Conclusion

Au terme de ce chapitre, nous avons exposé les procédures de modélisation du fluage ainsi que la procédure de modélisation de la fracture (Fissure) en flexion dans une poutre en béton. Le but de la modélisation est de refléter les dispositifs de base du fluage dans une structure en donnant le contour des différents résultats issus de l'analyse, d'une part. D'autre part, comprendre la méthode de calcul d'une fracture mécanique ainsi que les éléments qui convient pour chaque étape de calcul dans un élément structural et sa mise en œuvre numériquement par le biais de la Méthode des Eléments finis par le logiciel ANSYS qui constitue une étape cruciale dans la compréhension du comportement au niveau de la zone fissurée.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Un nouveau procédé de conception des poutres en béton est proposé dans le cadre de ce travail

Un nouveau procédé de conception des poutres en béton est proposé dans le cadre de ce travail de recherche.

L'objectif s'inscrit dans la mise en valeur des déchets recyclable tel le verre en toutes ces qualités, comme source d'un matériau utile pour la construction. La démarche consiste à substituer un pourcentage de ciment, connu par son importante émission de dioxyde de carbone et son cout excessif, par un matériau recyclé.

La technique proposée consiste à injecter un pourcentage de verre micronisé à la place d'une proportion de ciment.

Les essais réalisés, consistent à remplacer une quantité de ciment par la poudre de verre dans le béton afin d'utiliser au maximum des déchets de verre qu'ont déversé dans la nature.

Ce travail de recherche est constitué de deux parties, expérimentale et théorique, qui répondent à l'intérêt de cette dernière.

Les différents résultats obtenus dans ce travail de recherche, nous ont permis de formuler les conclusions suivantes :

- la valorisation de la poudre de verre présente une voie prometteuse pour fabriquer de nouveaux ciments composés.

- l'activité de la poudre de verre est remarquée à court-terme.

- L'augmentation de la teneur en déchet de verre dans le béton à un certain seuil provoque la chute de résistance en compression.

- L'ajout de poudre de verre comme remplaçant partiel du ciment portland à donner un résultat positif en terme résistance à la flexion, le déplacement et la capacité portante à 28 jours.

- Les poutres avec de 10% et 20% de poudre de verre développent une résistance de 6.35 Mpa et 5.97 Mpa respectivement pour une charge de 14.103 KN ; 13.264 KN et une flèche a mis- travée de 2.72 mm ; 2.02 mm respectivement.

Ces valeurs sont largement supérieures à celles de la poutre de référence qui développe une résistance de 5.66 Mpa à une charge de 12.583 KN avec une flèche maximale de 1.642 mm à mis-travée.

Conclusion générale

Références

Références

- [1] Hutchinson, J. W. "Singular Behavior at the End of a Tensile Crack in a Hardening Material." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 16, 1 (1968): 13-31.
- [2] Rice, J. R. and G. F. Rosengren. "Plane Strain Deformation Near a Crack Tip in a Power Law Hardening Material." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 16 (1968): 1-12.
- [3] Rice, J. R. "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notched and Cracks." *Journal of Applied Mathematics*. 35 (1968): 379-386
- [4] Carlsson, A. J. "Influence of Non-Singular Stress Terms and Specimen Geometry on Small Scale Yielding at Crack Tips in Elastic-Plastic Materials." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 21, 4 (1973): 263-277
- [5] Rybicki, E.F. and M.F. Kanninen. "A Finite Element Calculation of Stress-Intensity Factors by a Modified Crack Closure Integral." *Engineering Fracture Mechanics*. 9 (1977): 931-938.
- [6] Cotterell, B. and J. Rice. "Slightly Curved or Kinked Cracks." *International Journal of Fracture*. 16, 2 (1980): 155-169.
- [7] Riedel, H. "Tensile Cracks In Creeping Solids." *Fracture Mechanics: Twelfth Conference*. ASTM STP 700 (1980): 112-130.
- [8] Y. Murakami, Stress Intensity Factors Handbook, 1988
- [9] Riedel, H. "Creep Deformation at Crack Tips in Elastic-viscoplastic Solids." *J. Mech. Phys. Solids*. 29 (1981):
- [10] Hackett, E. M. and K. H. Schwalbe. "Constraint Effects in Fracture." *ASTM International -- Committee E08 on Fatigue and Fracture*. 1171 (1993).
- [11] Osher, S. and J. A. Sethian. "Fronts Propagating with Curvature-Dependent Speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations." *Journal of Computational Physics*. 79: 12-49 (1988).
- [12] Anderson, T. L. *Fracture Mechanics -- Fundamentals and Applications*. 2nd ed., Boca Raton: CRC, 1994.
- [13] Belytschko, T. and T. Black. "Elastic Crack Growth in Finite Elements with Minimal Remeshing." *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 45: 601-620 (1999).
- [14] H. Tada, G. R. Irwin, and P. C. Paris, The stress analysis of cracks handbook, 3rd ed. ed. New York, N.Y, London: ASME Press Professional Engineering Publishing, 2000.
- [15] Christian Desachy (2001) « Les déchets sensibilisation à une gestion écologique » 2eme édition paris.
- [16] Stolarska, M. DL Chopp, N. Moes, T. Belytschko. "Modeling Crack Growth by Level Sets in the Extended Finite Element Method." *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 51: 943-960 (2001).
- [17] Tagnit-Hamou A, Nkinamubanzi P-C.(2002) Les ajouts cimentaires et le développement durable. Note trimestrielle d'information du Centre d'Etudes et de Services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction, n° 08, p. 9-11.
- [18] Sukumar, N. and J.-H Prevost. "Modeling Quasi-Static Crack Growth with Extended Finite Element Method Part I: Computer Implementation." *International Journal for Solids and Structures*. 40: 7513-7537 (2003).
- [19] Sukumar, N. and Z. Y. Huang, J.-H. Prevost and Z. Suo. "Partition of Unity Enrichment for Bimaterial Interface Cracks." *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 59: 1075-1102 (2004).
- [20] Pascale Maes (2004) « Gestion des déchets de chantier », Guide méthodologique AFNOR

Références

- [21] Mergheim, J. E. Kuhl, and P. Steinmann. "A Finite Element Method for the Computational Modeling of Cohesive Cracks." *International Journal For Numerical Methods in Engineering*.63: 276-289 (2005).
- [22] Anderson T,L, "Fracture mechanics : fundamentals and applications", 3rd ed. ed. Boca Raton, Fla: Taylor & Francis, 2005.
- [23] Rachida IDIR (2009) « Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique », Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- [24] Brahim Djemaci (2012) „la gestion des déchets municipaux en Algérie : Analyse prospective et éléments d'efficacité” thèse de doctorat, université de Rouen.
- [25] Oubraham C (2012) « Simulation du comportement instantané et différé d'une zone fléchieen béton armé » ; Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de TiziOuzou.
- [26] MAMERY Serifou (2013) Béton à base de recyclats : « Influence du type de recyclats et rôle de la formulation » Université Sciences et Technologies - Bordeaux I.
- [27] AMARNI-Akila (2015) « Valorisation des déchets de verre dans les bétons étude expérimentale », mémoire de fin d'étude, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [28] Melhyas KPLE (2015) « ETUDE DES VOIES DE VALORISATION DES DECHETS MENAGERS AU BENI », thèse de doctorat, Université de Lorraine, soutenue le 24 Novembre,p238. 61
- [29] Kamali M,Ghahremaninezhad A.(2015)Effect of glass powders on the mechanical and durabilityproperties of cementitiousmaterials. Construction and buildingmaterials, – Elsevier.
- [30]M. Graba, "Limit loads for centrally cracked square plates under biaxial tension," Open Engineering, vol. 6, no. 1, 2016.
- [31] Achili Kahina, (2016/2017) « Poudre de verre dans le béton » mémoire master génie civil structure, Université Mouloud Mammeri.
- [32] BOURMATTE Nadjoua (2017) « granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques : béton de démolition - déchets de briques - déchets de verre » Thèse de doctorat Université des Frères Mentouri Constantine.
- [33]Bahia Arab, Rachid Mehaddene, Yacine Bouchnab. (2017) « Substitution du ciment CPA par la poudre de verre dans les mortiers à hautes performances » Laboratoire Géomatériaux, Environnement et Aménagement, Université Mouloud Mammeri, Déchets Sciences et Techniques, N°75.
- [34] ZEGHAD MOHAMED (2018) Recyclage des déchets inorganiques dans les nouveaux bétons : bétons autoplaçants (BAP), bétons fibrés ultra-hautes performances (BFUHP) „”, thèse de doctorat, Tizi-Ouzou.
- [35] Carter, G, J””Contrôles « environnementaux et biologiques de la minéralogie et de la microstructure des coquilles bivalves ». Dans la croissance squelettique des organismes aquatiques. Enregistrements biologiques de la charge environnementale. (Ed. D.C Rhodes et R.A.Lutz) .plenum press, pp 69-115

Références