

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draia ADRAR
Faculté Des Sciences et de Technologie
Département Des Sciences et Technologie



Mémoire De Fin D'étude En Vue De L'obtention Du Diplôme :

Master II En Génie Civil

Option : Construction Civil et Industrielles

Présenté Par :

Ammi Mohammed

Belmahdi Mohammed

THEME

**Endommagement des structures en béton armé d'UE
aux fissures engendrées par le retrait**

Membres de jury :

- *Prof khelafi*
- *Mr Ben Abdelfattah*
- *Mr Hamouda Abdelaziz*

*Examineur
président
Encadreur*

Année Universitaire 2016/2017

Dédicace

Avec un énorme plaisir, que je dédie ce modeste travail à mes parents en particulier et à toute la famille ma femme et mes enfants, mes frères et mes sœurs

;A

Mr Hamouda Abdelazize

,La famille Ammi, Ghazi

Tous mes amis

AMMI

Dédicace

Avec un énorme plaisir, que je dédie ce modeste travail à mes parent en particulier et à toutes la famille ma famme et m'adorable fille «Abir»,més frères «Abdellatif,younes » et mes sœurs «Lalla, .« Zohra, Souad

;A

Mr Hamouda Abdelazize

La famille Belmahdi, Baida, Ben saad, Boukarzia

Tous mes amis

Belmahdi

Remerciement

Avant tout nous tenons à remercier ALLAH le tout puissant qui nous a donné la

.santé, le courage et la patience pour mener à bien ce modeste travail

Il est trop rare de pouvoir dire merci, puisque l'occasion se présente ici, j'en profite en espérant n'oublier personne

*Mes premiers remerciements sont pour notre encadreur **Mr. HAMOUDA Abdelaziz** maître de conférence, pour m'avoir encouragé et à me proposer un sujet fort intéressant. Je lui exprime ma gratitude pour sa disponibilité, ses orientations .tout au long de ce travail*

J'adresse mes vifs remerciements au président et aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'être mes examinateurs

Je remercie également mes parents qui ont organisé mon cours de carrière dont je garderai le souvenir d'un moment exceptionnel. Je remercie Ma femme qui m'a encouragé, mes frères, mes amis et toutes mes familles

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail

A qu'ils trouvent ici l'expression de notre amitié et de notre gratitude

Résumé

Ce travail enregistré dans le cadre de l'étude d'endommagement des structures en béton armé due aux fissures engendré par le retrait. Le béton est un matériau de construction qui trouve son champ d'utilisation pratiquement dans tous les domaines du Génie Civil.

L'apparition d'un comportement non linéaire lors d'un chargement sur le béton traduit l'initiation de la propagation des microfissures dans le volume du matériau. L'étude de ce type de comportement fait appelle à la mécanique de l'endommagement.

Le béton étant un matériau complexe et hétérogène, il existe plusieurs phénomènes qui influent sur son comportement. Parmi eux, le phénomène de retrait qui a fait des déformations dues à la diminution de la teneur en eau ou bien les dimensions des granulats. Le retrait du béton est souvent assimilé à une réduction de volume.

A l'échelle macroscopique, d'un endommagement est observé lorsque les propriétés mécaniques du matériau sont affectées à différentes échelles (dégradation chimique du mélange, fissuration importantes, rupture de l'ouvrage, etc.).

L'objectif de ce travail est d'étudier la propagation des fissures dans une structure en BA qui simulé par la flexion de trois points d'une poutre soumise à des efforts, et en mesurant la déformation durant l'endommagement de cette poutre.

ملخص

إن هذا العمل يسجل في إطار دراسة انكماش و إتلاف الخرسانة.

الخرسانة هي مادة من مواد البناء التي تجد حقل استعمالها التطبيقي في ميدان الهندسة المدنية، حاليا و بدون منازع هي المادة الأكثر استعمالا لأجل ما تقدمه من مزايا اقتصادية وتقنية.

بيد أنه رغم استعمالها الواسع منذ حوالي القرنين تظل مادة لها سلوك غير مفهوم فهما تماما، كما أن الخرسانة مادة معقدة و غير متجانسة، هناك عدة عوامل (ظواهر) تؤثر على هذه المادة من بين هذه الظواهر ظاهرة الانكماش الناتجة عن التشوهات التي تؤدي إلى النقص في حجم الخرسانة واختلاف أبعاد الحصى.

الهدف من هذا العمل هو دراسة تطور التشققات في البنايات الخرسانية والتي مثلت في هذه الدراسة برافدة خاضعة لقوة ومرتكزة على مسندين وبعدها مقوم بقياس التشوهات الناجمة عن ذلك

Abstract

This work was recorded as part of the study of damage to reinforced concrete structures due to the cracks caused by the shrinkage. Concrete is a building material that finds its field of application practically in all areas of Civil Engineering.

The appearance of a nonlinear behavior during loading on concrete results in the initiation of microcrack propagation in the volume of the material. The study of this type of behavior calls for the mechanics of damage.

Concrete being a complex and heterogeneous material, there are several phenomena that influence its behavior. Among them, the phenomenon of shrinkage which caused deformations due to the decrease of the water content or the dimensions of the aggregates. The shrinkage of the concrete is often assimilated to a reduction in volume.

On the macroscopic scale, damage is observed when the mechanical properties of the material are affected at different scales (chemical degradation of the mixture, severe cracking, breakage of the structure, etc.).

The aim of this work is to study the propagation of cracks in a RC structure simulated by the three-point bending of a beam subjected to efforts and by measuring the strain deformation during the damage of this beam.

Sommaire

Introduction générale.....	01
CHAPITRE I	
comportement mécanique du béton armé	
I-1 Introduction.....	03
I.2.:Composition du béton:.....	03
I.2.1 Généralités	03
I-3 Le béton:	04
I-3 -1 Le ciment :.....	05
I-3-2: Sable ou granulat :	07
I-3-3 : les types des granulats :	08
I-3-4 Caractéristiques des granulats :	11
I-3-5 : Gravier :.....	11
I -3-6 L'eau de gâchage:	12
I-3-7 Les adjuvants chimiques :.....	13
I-3-7-1 Classification et utilisation:.....	14
I-4 Propriétés de béton :	18
I-5 Propriétés de changement volumétrique :	20
I-6 Classification de béton :	20
I-7 La mise en œuvre :	20
I-8 Les acier :	20
I-9 Les modèles de comportement du béton :	24
I- 0 Comportement du béton selon la loi de rupture :	24
I-10 Comportement du béton :	24
I-11 Conclusion :	28
Chapitre II : Endommagement des structures en béton armé	
II. 2.1 Introduction:.....	29
II. 2.2.1 Modèles d'endommagement du béton.:.....	29
II.2.1 Mécanique d'endommagement:.....	31
II-2.1.1 Domaine de validité et d'emploi :.....	32
II-2.1.2 Variable d'endommagement:.....	32
II-2.1.3 Définition :.....	32

II-2.2 La théorie d'endommagement isotrope :.....	33
II-2.2.2. Principe d'équivalence en déformation :.....	34
II-2.2.3. Endommagement critique à rupture :.....	34
II-2.2.4. Évolution de la variable d'endommagement :.....	35
II-2.3. La théorie d'endommagement anisotropes:.....	35
II-2.4. Critères d'endommagement:.....	36
II- 2.4.1. Critère du taux de restitution de densité d'énergie élastique :	36
II-2 . 4.2. Critère à trois invariants:.....	36
II-2.4.3. Critère non symétrique en déformation:.....	36
II-2.4.4. Critère de limite de fatigue:.....	36
II-2.4.5. Critère d'extension maximale (Critère de SAINT VENANT) :.....	36
II-2.5 La mécanique de la rupture:.....	37
II-3. Effets de la température sur le béton :.....	37
II-3.1. Propriétés thermiques du béton :.....	37
II-3.1.1. Résistance du béton aux hautes températures et résistance au feu :.....	38
II-3.1.2. Comportement du béton au feu :.....	39
II-4 Les modèles de fissuration:.....	39
II.4.1 Définition générale.....	39
II .4.2 Critère d'amorçage et de propagation de fissure:.....	40
II .4.3 Modèles de la fissure discrète:.....	42
II .4.4 Modèles de la fissure répartie:.....	43
II .4 .4. 1 Principes générales:.....	43
II .4.4.2 Concept du modèle de fissure répartie :	44
II.4.5 Autres modèles:.....	48
II.4.5.2 Le modèle micro-plan:.....	50
II.4.5.6 Les modèles avec discontinuités ancrées dans les éléments:.....	50
II.4.5.6 Les modèles avec discontinuités ancrées dans les éléments:.....	50
II.4.5.7 Les modèles basés sur une méthode sans maillage:.....	50
II .5 CONCLUSION:.....	51

CHAPITRE III: Le retrait

III.2 Types des retraits:.....	52
III-2.1 Le retrait plastique.....	52
III-2.2 Le retrait endogène:.....	56
III.2.3 Retrait thermique:.....	58

III.2.4 Le retrait de dessiccation:.....	85
III.2.5 Le retrait de carbonatation.....	59
III.3-Mesure de retrait :.....	59
III.4 Les conséquences du retrait:.....	62
III.5 Contrôler le retrait :.....	62
III.6 Relation entre le retrait et le fluage :.....	63
III.7-Les causes du retrait et leur Remèdes :.....	64
III.8 Conclusion:.....	65

Liste des symboles

Liste des symboles

A : aire de la section

D :diameter du cylinder pour essai brésilien

E : module d'elasticité de béton (c pour concrete)

E_s : module d'elasticité de l'acier (s pour steel)

I : moment d'inertie

L : longueur de cylindre pour essai brésilien

M : moment appliqué

P :charge appliquée

P_{sh} :facteur de correction pour déformation due au retrait (sh pour shrinkage)

Q_c Facteur de correction pour deformation due au fluage (Cr pour creep

T : Force de traction

a : Distance du point d'application de la charge au support

b Largeur de la poutre

f_c : Contrainte du béton

f'_c : Résistance nominale en compression du béton a 28 jours

f_{c28} : Résistance caractéristique à la compression à 28 jours.

f : La fonction de charge.

ϵ : Fonction du tenseur de déformation

L_s : La longueur d'ancrage

τ_{su} : la contrainte limite d'adhérence

F_e : est la limite élastique de l'acier

ϕ : le diamètres

: Masse volumique de l'acier

Ψ_s : la coefficient de scellement

f_A, f_B : Fraction volumique de matériaux A et B.

E : module de Young.

E_0 : le module de Young initial

E_j : module instantané.

E_v : module vrai de béton.

$E_{A, B}$: module vaut.

S : l'aire d'une section.

S_D : l'aire total de l'ensemble des traces des défauts corrigée des effets de concentrations de contraintes et d'interactions.

ϵ_{D0} : le seuil d'endommagement.

ϵ^S : Déformation sphérique.

ϵ^d : Déformation déviatorique.

$\epsilon, \epsilon^e, \epsilon^p$: respectivement le tenseur de déformation total, élastique, plastique.

$\tilde{\epsilon}$ Déformation équivalente maximale atteinte.

ϵ_i^+ : Déformation principale dans la direction i .

a : Longueur de la fissure ou la demi-longueur de la fissure.

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

La conception des structures en béton consiste essentiellement à assurer un degré de sécurité acceptable permettant de réduire les risques relatifs aux défaillances, aux catastrophes et aux pertes de vie. Afin de mener à bien le calcul de ces structures, il est nécessaires de connaître la réponse du béton aux diverses sollicitations. En effet, les ouvrages en béton sont pleins de défauts dus à des pores, des vides et des fissures de retrait, qui peuvent engendrer des propagations de macro-fissures lorsque la structure est en service.

Les travaux déjà nombreux sur le comportement du béton s'accordent à mettre en évidence l'extrême complexité de ce matériau.

Le béton, parmi les matériaux quasi-fragiles a un comportement complexe difficile à représenter par une seule loi macroscopique homogène. Cette difficulté est liée notamment à la forte hétérogénéité du béton qui est un matériau composite constitué de granulats de différentes tailles, d'une matrice cimentaire et de cavités. A cela s'ajoute des micro fissures distribuées de manier aléatoire et présentes même à l'état dit vierge, c'est-à-dire avant toute sollicitation externe [4]. Selon la nature et l'intensité de la sollicitation, le béton se déforme de manier complexe en faisant intervenir une ou plusieurs combinaisons de mécanismes élémentaires : élasticité, glissement, frottement, fissuration, endommagement.

L'endommagement est un des mécanismes principaux qui traduit la simple fissure jusqu'à la ruine de l'ouvrage. Il affecte l'intégrité du matériau observable par une modification du fonctionnement de la structure. Le niveau d'endommagement dépend des efforts reçus par rapport à la résistance potentielle du matériau et évolue différemment selon la géométrie de l'ouvrage. Les structures de type poutre ou les éléments massifs de béton, par exemple, paraissent plus affectés par des pathologies de fissuration.

Depuis l'avènement du béton, leur comportement a été étudié en fonction de la composition du béton, de la résistance, de l'âge du matériau ou encore, de l'effet de vitesse du chargement. [4] Dans le béton durci la fissuration peut être causée par le retrait de séchage ou par les mouvements d'origine thermique qui surviennent aux jeunes âges et qui on été empêchés de développer librement.

Introduction générale

Objectifs du travail:

Les composants en béton armé, sont des éléments structuraux importants utilisés dans les constructions civiles et industrielles. Pour leur utilisation optimale, il est nécessaire d'étudier l'évolution de leur comportement jusqu'à la rupture. A cause de leur géométrie, l'étude du comportement est rendue plus difficile à cause des phénomènes suivants :

- Non linéarité de la réponse charge-déformation du béton.
- Difficulté de formuler les relations constitutives du béton sous des contraintes combinées.
- Fissuration progressive du matériau béton sous chargements.
- Comportement interactif entre le béton et l'acier qui forme le matériau composite.

Pour ces diverses raisons, il est nécessaire de faire appel aux méthodes numériques. Ces dernières ont permis aux ingénieurs de simuler avec fidélité le comportement non linéaire des structures jusqu'à leur ruine.

Rassembler plus d'information sur les Phénomène retrait et endommagement, et sont influence sure la propagation des fissures sur les construction en béton armé afin d'étudié les facteurs importants .

Dans ce contexte notre travail constitue de trois Chapitre :

- le premier chapitre, nous présentons une étude bibliographique sur la composition de béton et la résistance de béton.
- Le deuxième Chapitre, exposé l'influence d'Endommagement des structures en béton armé et phénomène de la fissuration.
- Troisième chapitre le phénomène de l'endommagement dû au retrait du béton armé en fonction de la Composition de béton et variation de température

CHAPITRE I

Comportement du matériau béton armé

-1Introduction

Pour aborder avec succès la modélisation du comportement jusqu'à rupture des panneaux plans en béton armé et déterminer leur capacité de charge, il est nécessaire de connaître les lois de comportement des matériaux béton et acier. Dans ce qui suit, on passera en revue l'ensemble des lois et des caractéristiques mécaniques de ces matériaux. On s'intéressera particulièrement aux différents comportements contraints - déformations sous tous les états de contraintes ainsi que la définition de la résistance sous contraintes généralisées. [1]

I.2 composition du béton:

I.2.1 Généralités:

Le béton est un matériau composite constitué d'une matrice en ciment et d'inclusions de granulats ou agrégats (sables, graviers, cailloux) dont la répartition et la géométrie ne sont pas connues a priori et présentent souvent une dispersion importante. A cette hétérogénéité de composition vient s'ajouter une hétérogénéité dite structurelle. Elle consiste en l'existence de défauts initiaux (microfissures) au sein de la microstructure. La plupart de ces défauts se situent à l'interface entre les granulats et la pâte de ciment, cette interface constituant le lien le plus faible du matériau. [1]

Celui-ci a pour rôle de se lier avec les gros granulats pour former un conglomérat solide. Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.

Le béton est né du besoin d'avoir un matériau de construction bon marché, malléable au moment de le mettre en place et résistant ensuite. La forme la plus ancienne du béton remonte à 7000 ans avant JC. Un matériau similaire était connu des égyptiens et des Romains, mais l'essor réel du béton tel qu'on le connaît aujourd'hui est dû à l'anglais Joseph Aspdin qui en 1824 fait breveter le ciment Portland. [2]

Le béton est un matériau, résiste bien à la compression mais particulièrement mal à la traction.

L'acier est un matériau qui résiste autant à la compression qu'à la traction mais énormément plus cher que le béton.

Dans une structure en béton armé, les aciers principaux sont situés dans les parties tendues de béton pour compenser la mauvaise résistance du béton en traction.

Les premiers ouvrages en béton armé utilisaient des barres d'acier doux lisses, ensuite les barres furent constituées d'acier haute adhérence comprenant des aspérités et ayant une meilleure résistance.

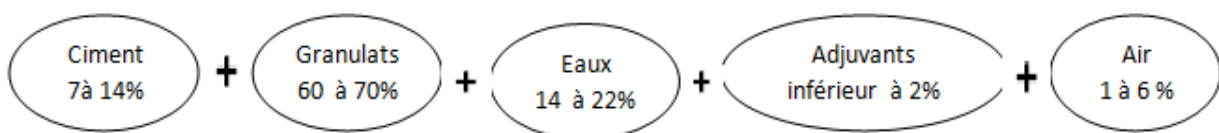
I-3 Le béton:

Le béton est un terme générique qui sert à désigner un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats (sable, gravillons) agglomérés par un liant.

Le liant peut être «hydraulique» (car il fait prise par hydratation ; ce liant est fréquemment nommé ciment) ; on obtient dans ce cas un béton de ciment fréquemment utilisé. On peut aussi utiliser un liant hydrocarboné (bitume), ce qui conduit à la fabrication du béton bitumineux. Le coulis est un mélange particulièrement fluide de ciment et d'eau. Enfin, quand les granulats utilisés avec le liant hydraulique se diminuent à des sables, on parle alors de mortier (sauf si on optimise la courbe granulaire du sable et dans ce cas on parle de béton de sable). Le béton frais associé à de l'acier permet d'obtenir le béton armé qui est un matériau de construction courant. [3

En bref le béton est un mélange d'agrégat (sable plus granulat) et de la pâte composée: de ciment, d'eau et d'adjuvant.

- pâte 30 à 40%
- Ciment portland 7% à 15% par volume
- Eau 14% à 21% par volume
- Agrégats 60% à 80%
- Gros granulats
- Granulats fins
- Adjuvants chimiques



Le béton est de nos jours le matériau le plus utilisé au monde, plus que tous les autres matériaux réunis. Le béton est un mélange précisément dosé de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants qui peut varier en fonction de ses utilisations.(Ciment ,Sable ou Granulat, Gravier, Eau et Adjuvants).

I-3-1 Le ciment:

Le ciment est un liant hydraulique : la réaction chimique entre la poudre de ciment et l'eau produit un minéral artificiel insoluble. Plus les grains de ciment sont fins, plus cette réaction (hydratation) s'opère rapidement. Le durcissement a lieu aussi bien à l'air que sous eau. Il s'agit d'un mélange, finement moulu de roche calcaire(craie) et de schiste (argile) ,homogénéisé, séché, décarbonaté puis fondu(1500°C) dans un four rotatif. Ensuite ce mélange est refroidi rapidement et enfin broyé. On obtient ainsi le clinker Portland.

Le clinker est finement broyé pour donner un ciment. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets, gros cylindres chargés de boulets d'acier et mis en rotation. Lors de cette étape, le gypse (3 à 5%), indispensable à la régulation de prise du ciment, est ajouté au clinker. On obtient alors le ciment.

Les matières premières (calcaire, argile) sont obtenues à partir de carrières naturelles à ciel ouvert. Elles sont extraites des parois rocheuses par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique. C'est la raison pour laquelle les cimenteries sont situées près de carrières de calcaire ou de craie. [2].

Cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Son emploi le plus habituel est sous forme de poudre utilisée avec de l'eau pour agréger du sable fin et des graviers (granulats) pour donner le béton. Le mot «ciment» peut désigner différents matériaux comme par exemple :

- Le plâtre
- La chaux commune,
- La pouzzolane naturelle
- Le ciment prompt,
- Le ciment Portland

❖ Rôle de ciment:

C'est le constituant qui va réagir chimiquement avec l'eau, devenir résistant, et lier tous les ingrédients. [4]

Fabrication du ciment courant, ou ciment Portland: [5]

Pour fabriquer du ciment Portland, on fait cuire à température très élevée (1450°C), dans un four rotatif, un mélange de pierre calcaire broyée et d'argile (ou de matériaux similaires). La pierre calcaire fournit la chaux, et l'argile fournit principalement la silice et l'alumine. Le produit obtenu à la sortie du four s'appelle clinker. Le ciment Portland est ensuite fabriqué en ajoutant au clinker pulvérisé (grosseur des particules varie à peu près entre 1 et 80µm) une faible quantité (5%) de gypse. La description sommaire de la fabrication du ciment est illustrée dans

la figure I-1.

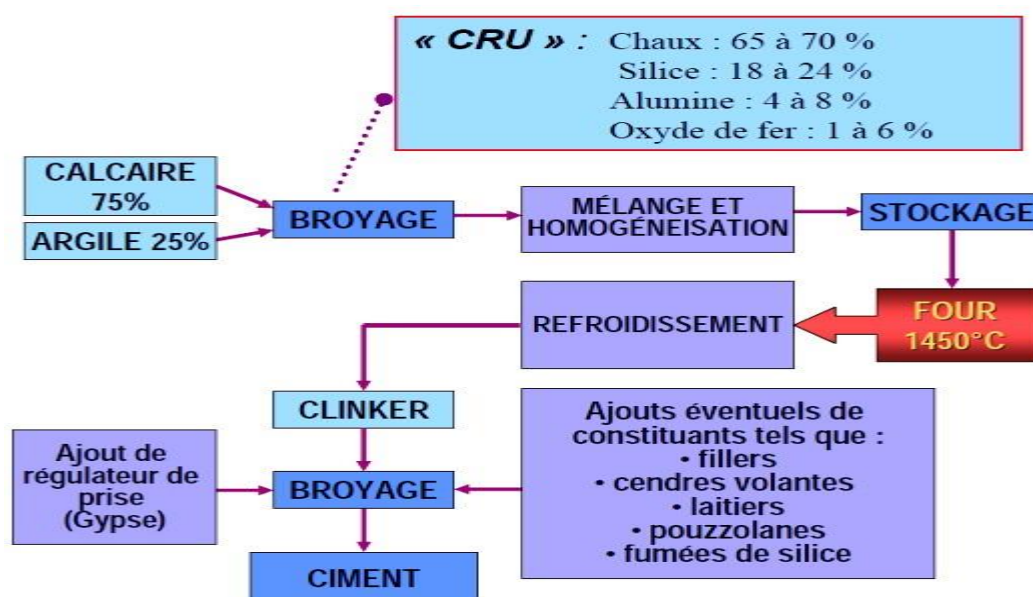


Figure I-1: les étapes principales fabrication du ciment[4]

La fabrication du ciment se distingue en cinq étapes principales :

- a) l'extraction
- b) la pré homogénéisation
- c) la cuisson
- d) le séchage et le broyage
- e) le refroidissement

Les différents ciments:

Les ciments peuvent être classés en cinq grandes familles et 27 variantes principales (voir la norme (en) EN-197-1-2000) pour plus de détails :

Désignations	Type de ciments	Teneur en clinker
CPA_CEM I	Ciment Portland	95 à 100‰
CPJ_CEM II /A	Ciment portland compose	80 à 94‰
CPJ_CEM II /B		65 à 79‰
CHF_CEM III/A	Ciment de haut fourneau	35 à 64‰
CHF_CEM III/B		20 à 34‰
CHF_CEM III/C		5 à 19‰
CPZ_CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90‰
CPJ_CEM IV/B		45 à 64‰
CLC_CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64‰
CLC_CEM V/B		20 à 39‰

Tableau I.1: Différents types de ciment [5]

- Ciment Portland (noté CEM I) (CPA).
- Ciment Portland composé (noté CEM II) (CPJ).
- Ciments de hauts fourneaux (noté CEM III) (CHF).
- Ciments pouzzolaniques (noté CEM IV) (CPZ).
- Ciments au laitier ainsi qu'aux cendres ou ciment composé (noté CEM V)
- Ciment blanc (différent des précédents par sa composition chimique et la méthode de fabrication).
- **I-3-2: Sable ou granulat : [5]**

Les granulats constituent une matière première indispensable au bâtiment et au génie civil, sans laquelle la réalisation des ouvrages serait aujourd'hui impossible dans l'état actuel des techniques de construction. Ils forment notamment le squelette des bétons hydrauliques,

l'ossature des couches de chaussées, et de leur qualité dépend en grande partie celle des logements, des ouvrages d'art et des routes.

Les granulats sont des matériaux granulaires de dimensions n'excédant pas 125 mm, aux quels s'ajoutent les enrochements de dimensions supérieures à 125 mm mais de masses inférieures ou égales à 15 t. Ils sont désignés par leur plus petite et plus grande dimensions d et D , l'intervalle d/D étant appelé classe granulaire. Cette désignation admet que les éléments puissent être retenus sur un tamis à mailles carrées d'ouverture D (tamis D) et que d'autres puissent passer au travers du tamis d , dans les limites normalisées permises.

Trois grandes familles de granulats sont ainsi définies:

- les sables, où $d = 0$ et $2 \leq D \leq 6,3mm$
- les gravillons, où $d \geq 1mm$ et $2 \leq D \leq 90mm$;
- les graves, où $d = 0$ et $2 \leq D \leq 90mm$

Les fines constituent la fraction granulaire passant au Travers du tamis de 0,063 mm.

Les granulats les plus couramment utilisés dans le bâtiment et le génie civil ont une masse volumique réelle comprise entre 2 et 3 Mg/m³. [5]

I-3-3:Les types des granulats:

On peut citer plusieurs types en fonction de plusieurs critères concernant le granulat lui-même :

Selon la masse volumique réelle ; Selon l'origine ; Selon la forme de leurs grains

Le granulat est désigné par le couple d/D avec

d: dimension inférieure du granulat

D: dimension supérieure du granulat

Familles	Dimensions	Caractéristiques
fillers	0/D	$D < 2\text{mm}$ avec au moins 85% de passant a 1.25mm et 70%de passant à 0.063 mm
Sables	0/D	$d = 0$ et $D \leq 4 \text{ mm}$
Graves	0/D	$D \geq 6.3 \text{ mm}$
Gravillons	d/D	$d \geq 2\text{mm}$ et $D \leq 63 \text{ mm}$
Ballasts	d/D	$d = 31.5 \text{ mm}$ et $D = 50$ ou 63 mm

Tableau I-2:Les types des granulats les plus utilisés [5]

Courbe granulométrique d'un granulat d/D

On exprime la granularité par un graphique (voir ci-dessus) dans lequel la courbe granulométrique indique les pourcentages en masse passant par les tamis successifs dont les trous sont de plus en plus petits (voir ci-dessous). [2]

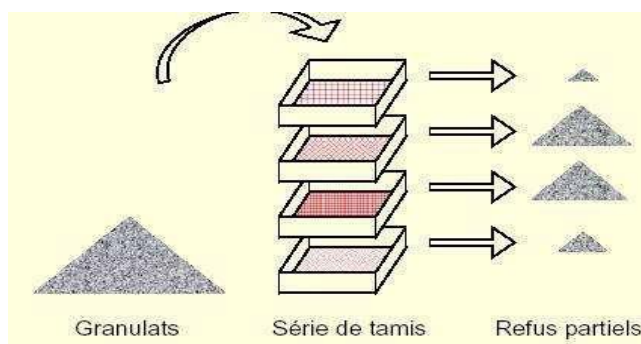


Figure I-3 : masse passant par les tamis[2]

Il existe différentes classes granulaires dont pour les plus fréquentes, les normes définissent des fuseaux à l'intérieur desquels les courbes granulométriques doivent être situées.

Exemples : [2]

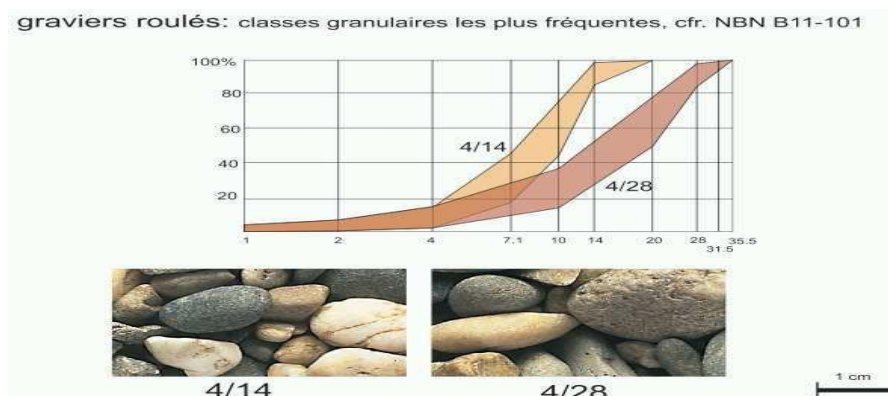
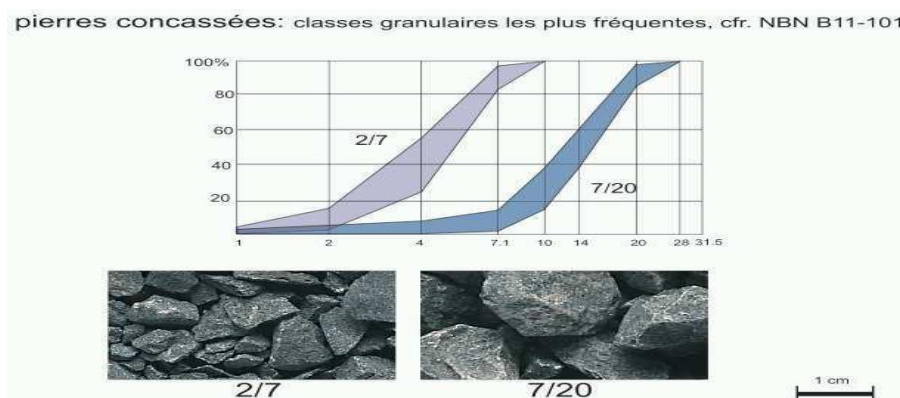


Figure I-4: graviers roulés classes des granulaires les plus fréquentes[2]



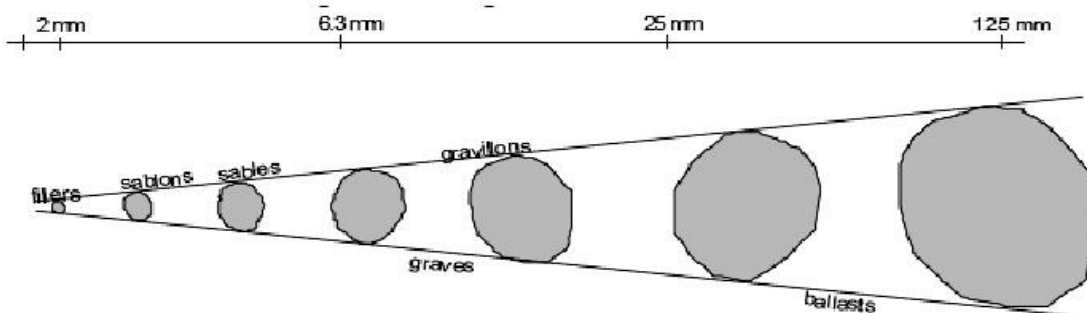
A l'aide de la courbe granulométrique et le fuseau, on peut évaluer la qualité d'une composition comme dans le schéma ci-dessous qui montre des exemples de granularités moins bonnes.

Classes granulaires : [6]

- Un granulat est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D
- Le premier désigne le diamètre minimum des grains d et le deuxième le diamètre maximum D.
- Lorsque d est inférieur à 0,5 mm, le granulat est désigné 0/D.
- Si un seul chiffre est donné, c'est celui du diamètre maximum D exprimé en mm.

Il existe cinq classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes de d et D des granulats rencontrés (Norme NFP18-101):

- Les fines 0/D avec D 0,08 mm,
- Les sables 0/D avec D 6,3 mm,
- Les gravillons d/D avec d 2 mm et D 31,5 mm,



- Les cailloux d/D avec d 20 mm et D 80mm,

- Les graves d/D avec d 6,3 mm et D 80 mm,

Le granulat est dit de classe d/D lorsqu'il satisfait aux conditions suivantes :

Le refus sur le tamis D est compris entre :

- 1 et 15% si $D > 1.56 d$,
- 1 et 20% si $D \leq 1.56 d$

Le tamisât au tamis d est compris entre :

- 1 et 15% si $D > 1.56 d$,
- 1 et 20% si $D \leq 1.56 d$

Le refus sur le tamis 1.56 D est nul,

Le tamisât au tamis 0.63 d $< 3\%$; toutefois pour D 5 mm,

cette limite est portée à 5% .

I-3-4 Caractéristiques des granulats :

Les caractéristiques intéressant un granulat varient en fonction de l'usage auquel ce granulat est destiné, mais aussi de l'origine et de la nature de ce granulat. Les normes spécifiques à chaque usage définissent les caractéristiques pour lesquelles une mesure ou une évaluation est nécessaire.

Par exemple la connaissance de la teneur en chlorure est importante pour des granulats destinés à la fabrication des bétons hydrauliques, sans intérêt pour les granulats destinés à la fabrication des bétons bitumineux.

I-3-5 Gravier :

Le gravier est composé de particules rocheuses lisses quand elles sont issues d'une rivière (c'est le gravier le plus recherché) ou concassées quand elles proviennent d'une carrière. Il faut impérativement que le gravier soit débarrassé de la boue et des saletés qu'il pourrait contenir avant de fabriquer le béton. Il existe différents calibres de gravier. Les plus gros calibres sont utilisés en général pour les fondations et le gros œuvre. La résistance du béton sera d'autant plus grande que vous mélangerez différents calibres de graviers.

Le rôle des granulats dans un mélange de béton est de permettre de produire un matériau ayant une résistance et une durabilité appropriées avec le moindre coût possible. La maniabilité (l'ouvrabilité) des bétons dépend grandement des caractéristiques des granulats dont les principales sont:

- la granulométrie, la texture de surface des granulats et la forme des particules

- la résistance mécanique (compression, traction et module)
- La densité relative, la masse volumique
- l'absorption, la porosité et la teneur en humidité
- la présence de matières nuisibles
- la résistance aux cycles de gel et dégel
- la résistance à l'abrasion et aux chocs

Types des graviers:

Un granulats, en fonction de sa nature et de son origine, peut être classé pour trois familles:

- **Naturel** : d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).

Ils proviennent de la désagrégation naturelle des roches (sous l'effet de l'eau, du gel, du vent) [7]

- **Recyclé** : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.

- **Artificiel** : d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.

Ils sont obtenus: par concassage et criblage en carrière de roches naturelles dures (sable concassé; gravier concassé). [7]

I -3-6 L'eau de gâchage:

Tout comme les autres composants du mélange, l'eau doit être propre. Le dosage doit faire preuve d'une attention particulière : trop d'eau dans le béton entraîne la naissance de fissures et une perte de résistance au moment du séchage.

L'eau permet au ciment de faire prise (c'est un des réactifs de la réaction d'hydratation), et de donner au béton une consistance (ouvrabilité) adaptée à l'ouvrage à réaliser. L'eau est un constituant très important du béton, car elle peut en influencer la qualité, en fonction de sa qualité et de sa quantité

Les ajouts d'eau non maîtrisés (sur chantier ou en centrale à béton) entraînent :

- 1) une diminution des performances mécaniques du béton

- 2) une augmentation de sa porosité concomitante avec une augmentation de ses propriétés de transfert
- 3) une diminution de sa durabilité
- 4) une augmentation des phénomènes de retrait
- 5) une diminution de la résistance aux cycles gel/dégel
- 6) des risques de ségrégation et de ressuage.

La résistance finale d'un béton dépend du rapport E/C (masse d'eau / masse de ciment) du mélange.

Le rapport E/C d'un béton courant varie entre 0.4 (qualité supérieure) et 0.6 (béton de fondation)

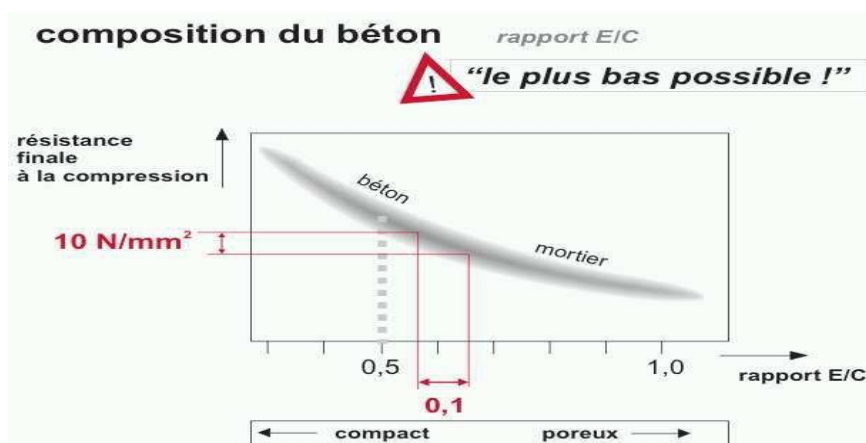


Figure.I-6: rapport E/C du béton [2]

❖ Rôle des différents éléments constituant le béton [2]

- **Ciment:** c'est le constituant qui va réagir chimiquement avec l'eau, devenir résistant, et lier tous les ingrédients.
- **L'eau:** c'est elle qui va hydrater le ciment et rendre le mélange malléable.
- **Les granulats:** ils vont former une disposition plus ou moins ordonnée qui va conférer au béton sa résistance. C'est le ciment hydraté qui va "coller" les granulats.
- **Le sable:** il permet de remplir les trous qui subsistent entre les gros granulats.
- **Les plastifiants:** ils augmentent l'« ouvrabilité » du béton (facilité avec laquelle on peut travailler le béton).

I-3-7 Les adjuvants chimiques :

Définition :

Les adjuvants sont des produits chimiques qui, incorporés dans les bétons lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieures à 5% du poids de ciment, provoquent des modifications des propriétés ou du comportement de ceux-ci.

Pour des raisons de commodité d'utilisation, la plupart des adjuvants se trouvent dans le commerce sous forme de liquides. Certains adjuvants existent en poudre, afin de réduire leur coût de transport (cas des chantiers à l'export). Dans ce cas il faut généralement les diluer avant l'emploi : la dispersion homogène d'une petite quantité de poudre dans un malaxeur de centrale à béton est en effet moins certaine que celle d'un liquide. Un adjuvant n'est pas un palliatif. Il n'a ni pour mission ni pour effet de faire un bon béton à partir d'un mauvais dosage ou d'une mise en œuvre réfectueuse. Ce n'est pas un produit capable de se substituer aux règles de la bonne technique.

I-3-7-1 Classification et utilisation: [8]

Un adjuvant a, en général, une action principale d'après laquelle il se trouve classé et défini, mais il peut présenter également certaines actions secondaires que l'on appelle généralement « effets secondaires ». Les normes européennes retiennent la classification suivante :

- * Plastifiants réducteurs d'eau.
- * Super plastifiants hautement réducteurs d'eau,
- * Rétenteurs d'eau.
- * Entraîneurs d'air.
- * Accélérateurs de prise.
- * Accélérateurs de durcissement.
- * Retardateurs de prise.
- * Hydrofuges.

Certains adjuvants peuvent avoir plusieurs de ces fonctions. On parle alors, en France, de fonction principale et de fonction secondaire. Exemple : plastifiant réducteur d'eau (ou super plastifiant hautement réducteur d'eau) et retardateur.

Il existe également d'autres adjuvants tels que notamment : les raidisseurs pour béton projeté, les adjuvants pour coulis d'injection, les adjuvants pour mortier stabilisé, les colorants, les

inhibiteurs de corrosion, les générateurs de gaz, etc. Certains d'entre-deux sont décrits et leur caractéristiques définies dans les normes spécifiques.

Plastifiants réducteurs d'eau :

Ce sont des produits qui viennent se fixer par adsorption à la surface du ciment. Ils provoquent une défloculation des grains et une lubrification de la pâte. Ce processus permet soit une amélioration de la maniabilité sans augmenter le dosage en eau, soit une réduction du rapport E/C, donc une augmentation des résistances mécaniques, sans modifier la maniabilité. Ils doivent, par rapport au béton témoin, assurer une résistance à la compression de 110 % minimum et permettre une réduction du dosage en eau d'au moins 5%.

On peut également jouer partiellement sur les deux paramètres pour augmenter les résistances mécaniques tout en améliorant la maniabilité.

Les premiers plastifiants étaient à base de lignosulfonates, sous-produits de l'industrie papetière après extraction de la cellulose du bois. Actuellement, certains lignosulfonates modifiés restent utilisés, essentiellement en raison de leur faible coût, mais des produits de synthèse sont également employés.

Les plastifiants se dosent généralement entre 0.3 et 0,5 % du poids de ciment et ils se caractérisent souvent par un effet secondaire « retardateur de prise » marqué lorsqu'on les utilise à un dosage plus élevé. [8]

Super plastifiant hautement réducteurs d'eau :

Cette désignation complexe, traduction de l'anglais Superplastifizers - High Range Water Reducer, se rapporte à des produits qu'en France on appelait auparavant « fluidifiants ».

Leur mode d'action est similaire à celui des plastifiants, mais il se produit avec une intensité bien plus importante. Par rapport au béton témoin fabriqué identiquement mais sans superplastifiant, à maniabilité égale, il doit permettre une réduction d'eau minimale de 12%, en fait ce pourcentage est généralement réduit de 15 à 25% suivant le dosage. Concernant les résistances à la compression elles doivent être de 140% à 1 jour et de 115% à 28 jours.

Ce nouveau superplastifiant compatible avec la quasi totalité des ciments, est mis en œuvre directement dans la bétonnière avec l'eau de gâchage, au moment du malaxage à un dosage d'environ 1 % du poids du ciment. [8]

Rétenteurs d'eau :

Ce sont des produits d'addition généralement en poudre qui ont pour fonction principale de réduire la tendance au ressuage des bétons. On utilise généralement des méthyl cellulose (Methocel) qui ont la propriété d'augmenter de volume en fixant l'eau libre du béton. Les rétenteurs d'eau sont utilisés pour améliorer la cohésion des bétons fluides dont le sable manque d'éléments fins ou à faible dosage en ciment. [8]

Entraîneurs d'air :

Ce sont des composés d'addition généralement à base de résines de synthèse : résine Vinsol, aryl alkyl sulfonâtes acides gras etc.

Les entraîneurs d'air se présentent sous forme de liquides, de sels solubles ou de poudres insolubles à ajouter au moment du malaxage. Ces adjuvants introduisent volontairement de l'air et agissent en stabilisant les bulles générées lors du malaxage, sous forme d'un très grand nombre de micro bulles, dont 80 % d'entre elles ont un diamètre inférieur à 100 microns, la plupart étant comprises entre quelques microns et quelques dizaines de microns. Ces micro- bulles ne doivent pas être confondues avec l'air occlus, constitué de bulles de tous diamètres généralement supérieurs à 1 mm, réparties aléatoirement dans le béton, qui se trouvent emprisonnées pendant la mise en place.

Ils améliorent essentiellement :

- la plasticité et l'ouvrabilité du béton, les bulles agissant comme autant de grains fins analogues à de petites billes souples et sans frottement,
- la résistance au gel du béton durci (antigelif): les très nombreuses petites bulles d'air disséminées dans la masse constituant en effet autant de petits vases d'expansion dans le réseau des canalicules internes pour l'eau interstitielle dont le volume augmente avant la prise en glace: cela évite la désagrégation du béton par gel de cette eau.

Différents paramètres influencent le pourcentage d'air entraîné :

- le dosage en ciment : plus il augmente, plus le % d'air diminue à dosage constant en adjuvant :
- la nature et surtout la finesse du ciment : plus le ciment a un Blaine élevé, plus le dosage en adjuvant doit être élevé :
- plus la granulométrie des graviers augmente plus le % d'air entraîné diminue. [8]

-Accélérateurs :

Ce sont des produits solubles dans l'eau et qui agissent chimiquement en augmentant la vitesse d'hydratation du ciment : cela entraîne un déclenchement plus rapide du phénomène de prise et s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus important. Les accélérateurs seront donc tout particulièrement employés pour les bétonnages par temps froids ou pour les travaux urgents.

On distingue :

- les accélérateurs de prise : alcalis. Carbonates et sulfates de soude ou de potasse, utilisés surtout par temps froid:

- les accélérateurs de durcissement : chlorures et carbonates, plus généralement employés afin de réduire certains délais pour décoffrer ou manutentionner les pièces.

En raison des risques de corrosion les produits à base de chlorure sont interdits pour certains travaux : béton précontraint, réservoirs, planchers chauffants, etc. Il y a lieu de noter que si les résistances initiales sont augmentées, les résistances à 28 jours peuvent être légèrement diminuées. [8]

Retardateurs :

Ils agissent chimiquement comme les accélérateurs en retardant plus ou moins longtemps l'hydratation et le début de prise du ciment. Parmi les produits retardateurs de prise on peut citer :

- les sucres et gluconates. les acides citriques et tartriques, l'oxyde de zinc, les phosphates alcalins.

- Les doses à utiliser sont en général très faibles (de l'ordre de 0.1 % en extrait sec) et les produits commerciaux sont dilués: il convient de veiller à une bonne répartition du produit dans la masse.

- Les retardateurs diminuent évidemment les résistances initiales mais ils augmentent souvent les résistances finales. [8]

I-4 Propriétés des bétons : [4]

Un béton est défini par les propriétés suivantes :

Masse volumique : elle varie entre 23 et 24kN/m³. La présence d'armatures dans le béton armé ou le béton précontraint conduit à prendre en compte une masse volumique de 25 kN/m³ (2 500 kg/m³) dans les calculs.

En plus de sa masse volumique, un béton est caractérisé par :

Propriétés mécaniques :

- ❖ a) **Résistance en compression :** La résistance en compression du béton, f_c , est obtenue sur la base d'essais d'écrasement d'échantillons cylindriques de béton de 150 x 300mm (ou 100 x 200 mm, dans ce cas prendre f_c) à 28 jours d'âge. Des diagrammes typiques contraintes-déformations du béton en compression sont montrés à la figure I-1. Un béton normal de qualité structurale a une résistance en compression f_c comprise entre 20 MPa (minimum) et 40 MPa. Des bétons a haute résistance ($f_c' > 40$ MPa) peuvent également être utilisés pour des projets spéciaux.

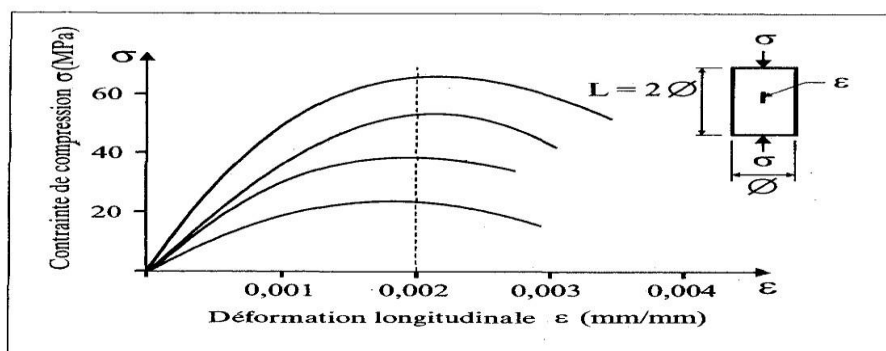


Figure. I-7 : Résistance du béton en compression [15]

- ❖ b) **Résistance en traction :** La résistance en traction peut être obtenue sur la base de trois types d'essai (figure. I-8) :

a) de traction directe, b) de flexion, c) brésilien ou de fendage.

A titre indicatif :

$$f_{sp} = 1,2 \text{ à } 1,6f_t \quad ; \quad f_r = 1,4 \text{ à } 2f_t \quad (\text{I-2-})$$

9-1-a)

Par ailleurs, il existe une bonne corrélation entre $\lambda\sqrt{f_c'}$ et f_r . Donne la relation suivante pour f_r :

$$f_r = 0,6\lambda\sqrt{f_c'} \quad (\text{I-2-})$$

9-1-b)

Ou $\lambda = 1,0$ pour un béton ordinaire et $\lambda = 0,75$ pour un béton léger. [4]

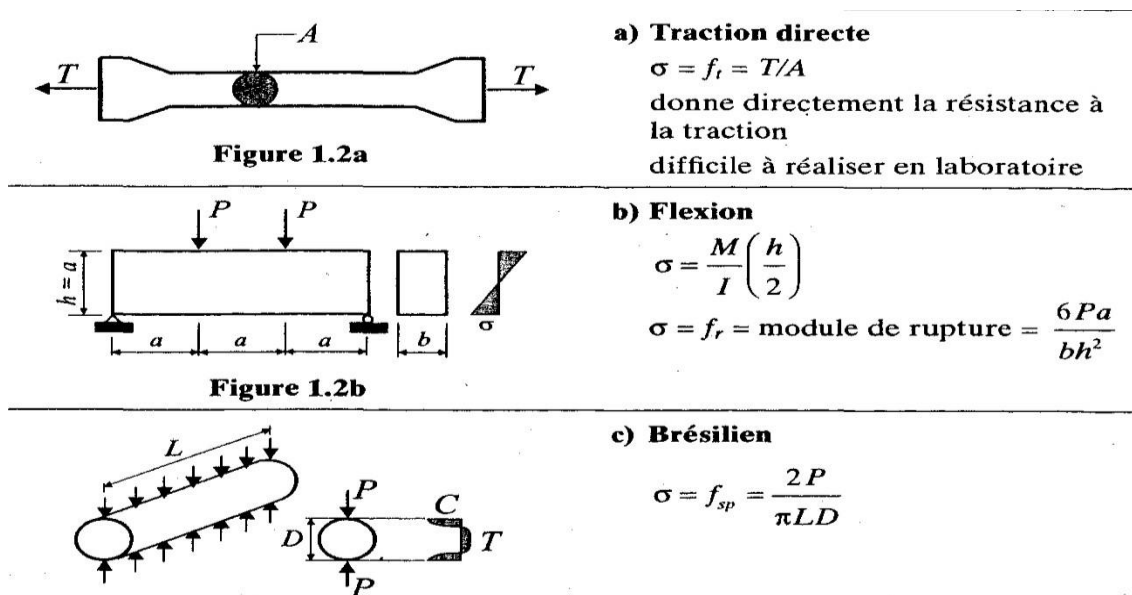


Figure . I-8 : Résistance du béton en traction [4]

Propriétés élastiques [4]

❖ **Module d'élasticité** : E_c le module d'élasticité, module sécant entre $\sigma_c = 0$ et $\sigma_c = 0,4 f_c'$ peut être estimé par :

$$E_c = [3300\sqrt{f'_c} + 6900] \left(\frac{\gamma_c}{23000} \right)^{1.5} ; 1500 \leq \gamma_c \leq 2500 \text{ kg/m}^3 \tag{I-3}$$

Pour un béton de résistance normale, $20 \text{ MPa} \leq f'_c \leq 40 \text{ MPa}$, E peut être estimé par l'équation simplifiée suivante:

$$E_c = 4500\sqrt{f'_c} \tag{I-4}$$

- ❖ **Déformations** : peuvent être occasionnées par l'action d'une charge instantanée ou l'action de charge pendant une longue durée correspondant au phénomènes de fluage ; cela entraine une déformation résiduelle permanente après un délai de plusieurs mois ou années [4]
- ❖ **Déformation ultime** : La déformation ultime en compression varie généralement entre 0,003 et 0,004. Pour fins de calcul, La norme limite la ϵ_{cu} à: $\epsilon_{cu} = 0,0035$
- ❖ **Coefficient de poisson ν** : le Coefficient de poisson relatif au béton non fissuré varie entre 0.15 et 0.20 pour une contrainte en compression f_c inférieur à $0.7f_c'$.

I-5. Propriété de changement volumétrique : [4]

- ❖ **Déformations dues au fluage** : Le fluage est un phénomène par lequel, sous l'effet de contraintes constantes, le béton subit des déformations qui augmentent avec le temps mais à un taux décroissant, la déformation due au fluage, peut être estimée, en fonction de la contrainte élastique instantanée.
- ❖ **La dilatation** : est due à une variation de température. La valeur unitaire varie entre 0.9 et $1.1 \cdot 10^{-5}$. Elle dépend de la qualité du béton, de la nature et de la grosseur des granulats. [4]

I-6. Classification du béton : [15]

Les bétons sont classés selon leur masse volumique. On distingue :

- ❖ Les bétons légers avec $\gamma_c < 1850 \text{ kg/m}^3$
- ❖ Les bétons semi-légers avec $1850 \text{ kg/m}^3 < \gamma_c < 2150 \text{ kg/m}^3$
- ❖ Les bétons ordinaires avec $2150 \text{ kg/m}^3 < \gamma_c < 2500 \text{ kg/m}^3$
- ❖ Les bétons lourds avec $2500 \text{ kg/m}^3 < \gamma_c$

Le béton courant peut aussi être classé en fonction de la nature des liants :

- ❖ Béton de ciment (le ciment).
- ❖ Béton silicate (la chaux).
- ❖ Béton de gypse (le gypse).
- ❖ Béton asphalte.

I-7 La mise en œuvre:

Suivent les ouvrages à réaliser, la mise en œuvre du béton est effectuée sur ou dans des coffrages ou des moules. Le béton est fabriqué sur place ou livré prêt à l'emploi depuis une centrale fixe. La mise en œuvre peut également se faire par projection. [4]

I-8 Les aciers :**Définition de l'acier :**

L'acier est un matériau constitué essentiellement de fer et d'un peu de carbone, qui sont extraits de matières premières naturelles, le carbone a eu un pourcentage très faible dans la composition de l'acier (généralement inférieur à 1%).

L'acier peut comporter aussi d'autres éléments comme le phosphore, soufre, silicium, manganèse, nickel, chrome, tungstène, ... etc

Utilisation et caractéristiques de l'acier [15]

Utilisés comme armatures interviennent sous forme de barres coupées à la longueur

Voulue ou de treillis soudé. Ils sont caractérisés par les critères suivant (tableau I.1) :

- ❖ Leur limite élastique conventionnelle E en MPa
- ❖ Leur nuance ; doux, mi-dur ou dur
- ❖ leur forme : lisse ou à haute adhérence

Nuance	acier doux lisse	acier a haute adhérence	teillis soudé fils lisses Φ		treillis soudé barres a haute adhérence
			>6	<6	
Désignation	fe E 215	fe E400	TSL 500	TSL 520	TSHA 500
	fe 235	fe E500			
Diameters des barres (mm) 6-8-10-12-14-16-20-25-32-40					

Tableau. I-3 : acier : nuances courantes utilisées pour le béton armé-Diamètres des barres [4]

Exemple :

Les barres à haute adhérence comportent des reliefs favorisant l'ancrage de l'armature dans le béton. Ces reliefs sont définis suivant trois classes conformément à la norme A 35,016-Armature pour béton :

- ❖ les armatures torsadées à froid, à verrous transversaux obliques en croissant (acier tor)
- ❖ Les armatures à empreintes,
- ❖ Les armatures à verrous transversaux obliques en croissant.

Les diamètres les plus couramment utilisés sont les suivants : 6, 8, 10, 14,16, 20, 25, 32, et 40mm.

Les barres peuvent être isolées ou groupées en paquet, à condition que la hauteur de paquet ne soit pas supérieure au double de sa largeur et que les paquets de plus de trois barres ne soient pas soumis à des sollicitations d'entraînement.

La liaison béton-acier. [15]

La liaison béton-acier doit être, telle que l'élément en béton armé puisse résister aux sollicitations auxquelles il et soumis. Ce la sous-entend que l'adhérence entre les deux matériaux

et parfaite. Elle dépend essentiellement de la surface périphérique et de la forme des armatures, de la rugosité de l'acier et de la qualité du béton. Une barre en acier à relief a une meilleure adhérence qu'une barre en acier lisse. L'efficacité d'une barre, du point de vue de l'adhérence, et caractérisée par un coefficient de scellement Ψ_s dont la valeur est ainsi définie :

$\Psi_s = 1$ pour les aciers lisses

$\Psi_s = 1,5$ pour les aciers HA

Adhérence entre le béton et les armatures [4]

Étant donné que le béton de structure est utilisé dans la majorité des cas avec des armatures, la résistance de liaison entre les deux matériaux est d'une importance considérable du point de vue du comportement structurel, ce qui inclut également la fissuration causée par le retrait et les effets thermique au jeune âge. La liaison provient essentiellement de la friction et de l'adhérence entre béton et acier et de l'effet mécanique dans le cas de barres d'acier crénelées. Le retrait du béton au contact des armatures peut également avoir une influence bénéfique sur cette liaison.

Dans une structure, l'adhérence dépend, non seulement des propriétés du béton, mais également d'autres facteurs. Ces facteurs incluent la géométrie des armatures et celle de la structure telle l'épaisseur de béton recouvrant les armatures. L'état de surface des armatures est également un facteur à considérer : la présence de rouille à la surface des armatures, en supposant que cette rouille soit intimement liée à l'acier sain, améliore l'adhérence des armatures lisses et ne modifie pas celle de l'armature améliorée (crénelées ou torsadées). Le traitement de surface par galvanisation ou époxy a une influence sur l'adhérence.

fabrication de l'acier

L'acier est généralement obtenu par une opération en deux phases :

❖ 1ère phase :

l'introduction et la combustion de minerai fer, de coke et de castine dans un haut-fourneau permet l'obtention de la fonte (matériau à plus de 1,7% de carbone).

❖ 2ème phase :

il est procédé à la conversion de la fonte liquide en acier, à une température de 1,500 °C environ, sous insufflation d'oxygène.

Les produits sidérurgiques

Les produits sidérurgiques employés en construction métalliques sont obtenus par laminage à chaud .leur dimensions et caractéristiques sont normalisées et répertoriés sur catalogues

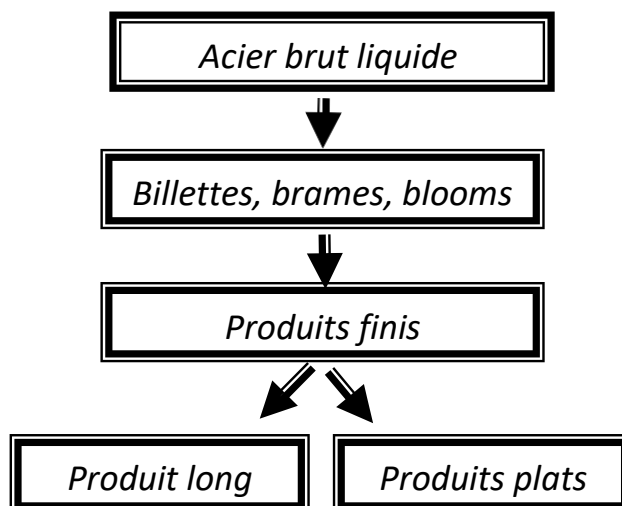


Figure .I-9: fabrication de l'acier

Propriété des aciers [15]

Pour la réalisation de notre structure on a utilisé des aciers de construction laminés a chaud.

La nuance d'acier utilisé est **E24** de qualité 2 et 3 dont :

- ❖ La limite élastique est de 2400kg/cm^2
- ❖ Module d'élasticité : $E = 2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$
- ❖ Coefficient de poisson : $\nu = 0,3$
- ❖ Masse volumique de l'acier : $\rho = 7,85 \times 10^6 \text{ kg/cm}^3$
- ❖ Module d'élasticité transversale : $G = 8,1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$

Coefficient de dilatation thermique linéaire : 11×10^{-6}

I-4 Les modèles constitutifs du béton et de l'acier :

Le béton et les armatures d'acier sont les composants principaux des structures en béton armé ou en béton précontraint rencontrées en génie civil. La modélisation numérique du comportement de ces structures nécessite l'étude de trois aspects: les modèles constitutifs du béton, les modèles de

comportement de l'acier et l'interaction entre le béton et l'acier. Dans cette partie, ces différents problèmes sont analysés.

I-9. Les modèles de comportement du béton:

De nombreux modèles de comportement du béton ont été proposés par différents auteurs dans la littérature. Les lois élastiques sont les plus simples. D'autres lois de comportement plus complexes prenant en compte des phénomènes comme la plasticité, la rupture, l'endommagement ont ensuite été successivement proposées. Aujourd'hui, l'étude des couplages entre l'endommagement et le comportement plastique des bétons fait l'objet de nombreuses recherches. Chacun de ces modèles présente des avantages et des inconvénients, ainsi que des champs d'application différents pour le calcul des structures en béton.

I-10 Comportement du béton

Comportement du béton selon la loi élastique :

Avec une loi de comportement élastique, le béton est considéré comme totalement élastique. Les non linéarités apparaissant dans les zones pré-pic et post-pic sont négligées (Figure 1.10a). La loi de comportement est formulée à partir de la loi de Hooke. Quelques auteurs considèrent néanmoins les non-linéarités dans la partie pré-pic, comme Ahmed & Shah (1982) ou bien utilisent la relation entre les incréments de la contrainte et la déformation Gerstle (1981)

(Figure 1.10). [14]

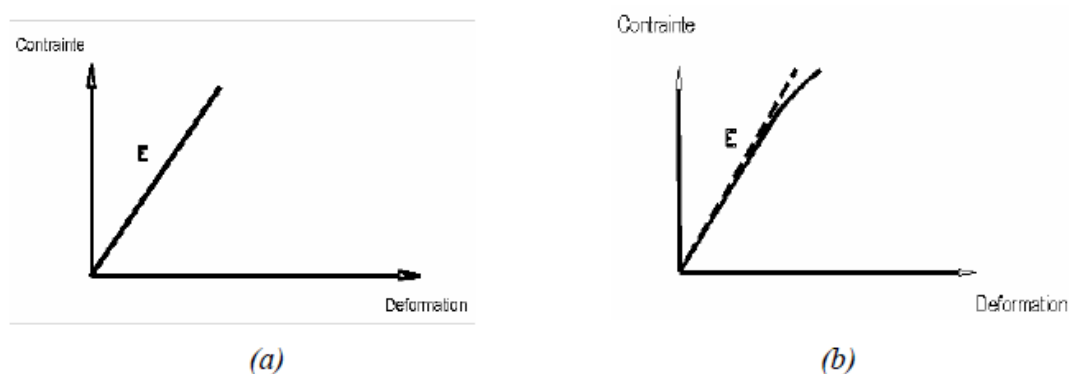


Figure1-10: loi élastique du béton : (a) Linéaire et (b) Non linéaire pré-pic

L'avantage de cette loi de comportement est sa simplicité, en particulier pour les modèles Elastiques linéaires. Cependant, les résultats numériques obtenus en considérant de telles lois de comportement ne permettent pas de répondre de manière satisfaisante aux exigences d'analyse des structures en béton, notamment dans le cas de charges importantes ou dans des analyses plus fines du comportement local d'une structure. Ainsi, dans la modélisation numérique, on peut obtenir des résultats même lorsque la charge dépasse la valeur critique. Les lois de comportement élastique ne s'adaptent donc pas au comportement réel du béton. Cependant, au niveau macroscopique ou bien pour des chargements modestes, les lois élastiques conviennent pour le calcul des valeurs de sollicitation, comme le moment ou l'effort tranchant au sein des Structures. La connaissance de ces efforts internes sont alors utilisés lors des vérifications de la résistance des structures en béton, en fonction des normes en vigueur.

Comportement du béton selon la loi de rupture:

Les approches d'élasticité linéaire de la rupture (LEFM-Linear Elastic Fracture Mechanics) s'adaptent bien à l'hypothèse de comportement parfaitement fragile du béton. Les paramètres de rupture et la condition critique de propagation des fissures sont alors décrits selon les principes de la mécanique de la rupture en tenant compte des fonctions géométriques obtenues à partir des essais dans le laboratoire. Kaplan (1961) et Glücklich (1963) ont introduit les formules analytiques de LEFM dans la modélisation du béton avec les facteurs d'intensité de contrainte K_I et les énergies de rupture G_f . Le béton est toujours considéré comme élastique et isotrope dans les zones hors des fissures (Figure I.11).

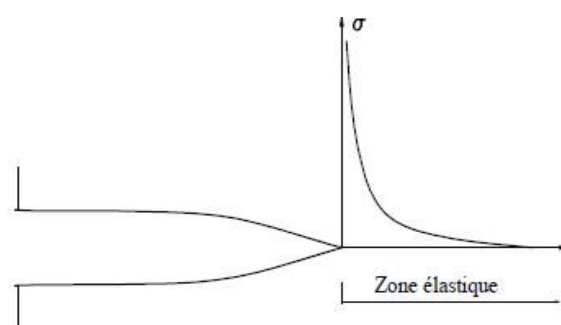


Figure I-11 : champ de contraintes selon LEFM (Singularité au fond de la)

Comportement du béton selon la loi élasto-plastique

La programmation par la méthode des éléments finis selon cette loi est relativement simple car le milieu de calcul est toujours continu. Le comportement en compression est bien décrit par les lois fondamentales ou modifiées à partir des modèles Mohr-Coulomb et Drucker-

Prager (Figure 1.12), tandis que le comportement en traction peut être modélisé avec une précision suffisante par une loi de rupture simple comme celle de Rankine

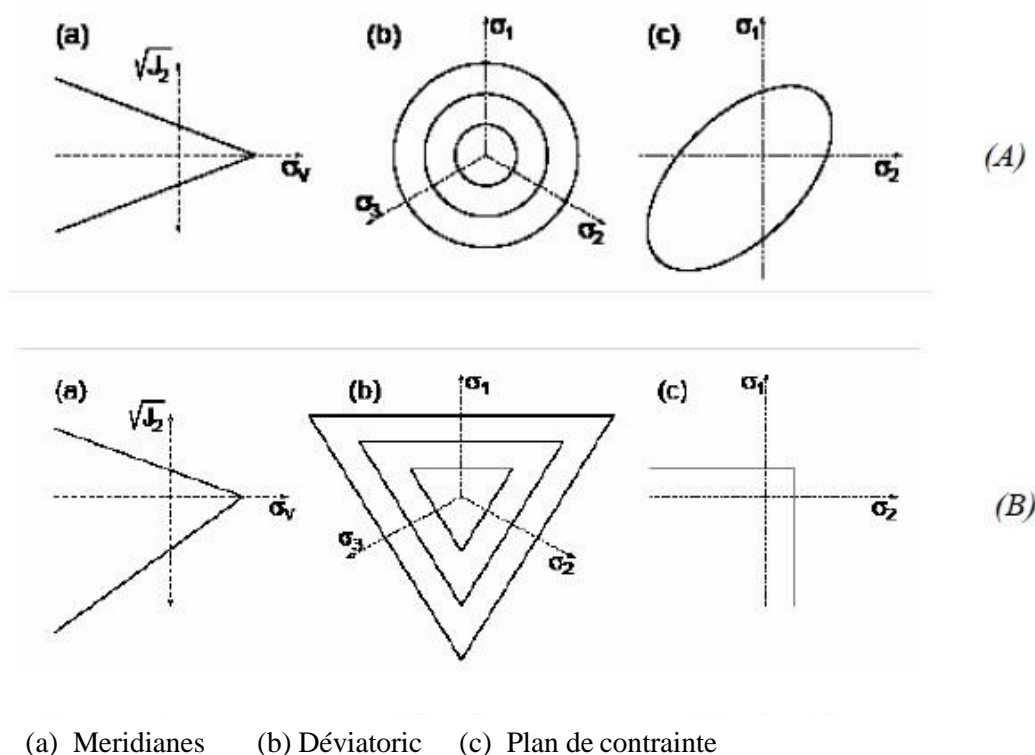


Figure : I-12 Loi plastique de Drucker-prager (A), Loi de rupture de Rankine (B)

Comportement du béton selon la loi de couplage endommagement-plasticité:

Les lois de comportement mixte (couplage) élasto-plastique-endommageable du béton ont fait récemment l'objet de plusieurs recherches dans le but de trouver une loi globale qui pourrait décrire d'une façon complète tous les aspects comportementaux réels du béton (Figure 1.16). Un tel modèle devrait ainsi pouvoir reproduire la dissymétrie, la fragilité, l'anisotropie, l'effet unilatéral du béton... Le comportement quasi-fragile du béton devrait ainsi être associé à la plasticité dans un modèle de comportement mixte avec deux parties de couplage comprenant un couplage d'état élasto-plastique et un couplage cinématique endommagement-plastique. Plusieurs modèles de couplage ont déjà proposés comme ceux de Lemaitre (1992), Salari (2004), Faria (1998), Jirasek & al (2006)... où le couplage endommagement-plastique peut être représenté sous forme implicite entre les variables internes (variable de plasticité et variable d'endommagement) en utilisant simultanément la surface plastique et la surface d'endommagement. La difficulté de cette méthode est le grand nombre de paramètres à

déterminer (jusqu'à 20, comprenant ceux de la partie plastique et ceux de la partie d'endommagement). La deuxième méthode utilise uniquement une fonction de charge comme celle de Lemaitre (1992), Lee & Fenves (1998),

Faria & al (1998), Lemaitre (2000)... pour contrôler le processus de dissipation de l'énergie. Cette fonction peut être le seuil d'endommagement ou bien le seuil de plasticité dépendant du chargement. Cette méthode ne décrit pas bien le comportement réel du béton mais est plus simple que les modèles présentés plus haut

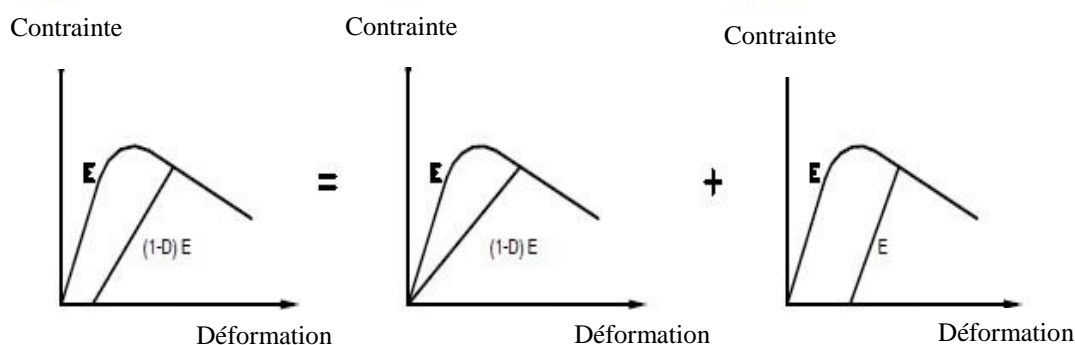


Figure I-13: Représentation de la loi de couplage du Béton

Pour illustrer phénoménologiquement le comportement mixte du béton, quelques auteurs ont utilisé des modèles purement théoriques (Simo & Ju (1987), Yazdani & Schreyer (1990), Luccioni (1996), Jefferson (2003)...) où la théorie de la mécanique de l'endommagement est utilisée pour modéliser le processus d'endommagement et la théorie de plasticité est utilisée pour considérer la déformation résiduelle et la dilatation du volume. Cette méthode est assez compliquée, car plusieurs paramètres comme les paramètres plastiques et les paramètres d'endommagement doivent être déterminés.

Les modèles mixtes sont l'objectif à atteindre dans le but de modéliser précisément le comportement réel du béton. Mais leur utilisation pratique est encore délicate compte tenu de leur grand nombre de paramètres et les difficultés qui existent à leur implémenter numériquement. Les modèles mixtes doivent donc encore être améliorés pour pouvoir s'appliquer largement dans la réalité, et dans plusieurs cas on préfère actuellement des modèles de comportement classique avec une surface de charge unique qui contrôle la dissipation de l'énergie.

I-11 Conclusion:

Ce chapitre a fait de quelque rappelle sur les généralités du béton et sont comportement et après avoir revu sommairement le comportement du béton sous différents états de sollicitation, on constate deux types de comportement selon type de contraint premièrement contraintes de tension il est caractérisé par une rupture brutale accompagnée des petites déformations en deuxième contraintes de compressions, il enregistre une rupture ductile. Contrairement au béton, l'acier s'écoule une fois que la contrainte limite élastique est dépassée.

CHAPITRE II

Endommagement des structures en béton armé

II-1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les matériaux composites et les modes d'endommagement sous chargements quasi-statique et dynamique. Afin de permettre le développement de ce type de matériau, nous devons être capables de garantir leur intégrité et leur résistance structurale. Une forte demande en méthodes de contrôle et d'évaluation non destructives existe. Nous nous focalisons, dans une seconde partie, sur les méthodes de contrôles et d'évaluation non destructives utilisées pour la détection des défauts. Pour terminer, nous étudierons les méthodes de contrôles qui permettent de faire un suivi de l'endommagement des structures composites en continu durant un essai.

Dans le milieu aéronautique, deux catégories d'endommagement peuvent apparaître :

les défauts créés lors de la fabrication du matériau et les endommagements provenant du chargement et de la sollicitation de la structure. Lors de cette étude, nous ne nous intéressons qu'à l'étude de l'endommagement sous sollicitations mécaniques.

En raison de la nature hétérogène de la structure des matériaux composites, les propriétés macroscopiques des composites stratifiés sont naturellement anisotropes . Que ce soles matériaux composites subissent divers types d'endommagements. Ces mécanismes d'endommagement typiques des stratifiés tels que la fissuration matricielle, la décohésion fibres-matrice, le délaminage et la rupture de fibres ont été largement étudiés dans la littérature, notamment par Payan ; Talreja ; Masmoudi (figure 1.2).it lors de chargements mécaniques quasi-statiques ou lors de chargements en fatigue. [09]

II.2 Modèles d'endommagement du béton :

La mécanique de l'endommagement est développée en se basant sur les principes fondamentaux des milieux continus (Lemaitre &Chaboche (1984)), avec l'objectif de représenter la perte de rigidité du matériau due à l'accumulation et à la propagation des microfissures sous l'action extérieure. L'endommagement du matériau est pris en compte via des lois de développement des variables d'état de l'état initial à l'état totalement endommagé. En général, le développement d'une loi d'endommagement selon l'approche thermodynamique se décompose en trois phases: + Définition des variables d'état caractérisant l'état d'endommagement du matériau. + Choix de la fonction de l'énergie libre (Gibbs ou Helmholtz) et en déduire la loi d'état. + Détermination du potentiel dissipé pour établir la loi de développement des variables choisies.[10]

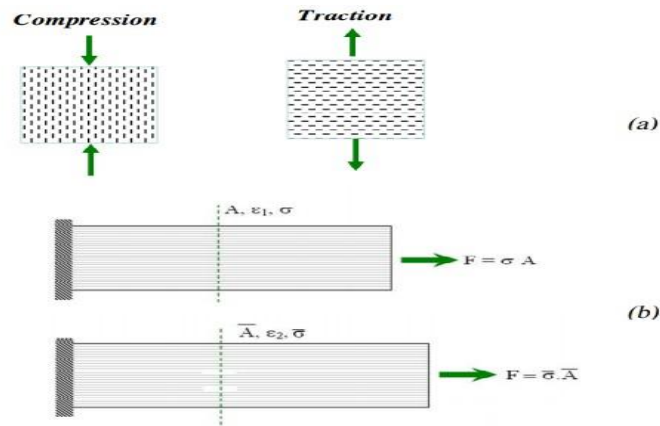


Figure II-1:
Endommagement du béton en compression, en traction (a) et la modélisation uniaxiale selon la mécanique de l'endommagement (b).[10]

L'endommagement du béton est situé dans les zones qui subissent les contraintes les plus importantes (zone de rupture FPZ), avant l'apparition et la propagation de macrofissures (Figure II.2.1). Le module d'élasticité du béton dans ces zones diminue fortement et tend à s'annuler lors de la rupture totale du matériau. Pour modéliser l'endommagement du béton, Mazars (1984) a introduit le variable d'endommagement D ($0 - 1$) représentant l'endommagement du béton de l'état intact à l'état totalement endommagé. Il y a plusieurs approches pour établir la loi d'endommagement comme l'approche thermodynamique, l'approche en contrainte effective, l'approche de déformation effective... L'approche en contrainte effective est largement utilisée par de nombreux chercheurs dans leurs modèles, (a) Compression Traction (b) 34 comme Mazars (1984), Mazars & Pijaudier-cabot (1989), Simo & Ju (1987), La Borderie (1991), Lemaitre & Chaboche (1992), Faria & al (1998) ou Jirasek (2004). La contrainte effective et la contrainte nominale sont introduites comme les variables de la théorie de l'endommagement: + Contrainte effective: $\sigma = E \varepsilon$. + Contrainte nominale: $\sigma = ED \varepsilon = \beta E \varepsilon = (1-D) E \varepsilon = (1-D) \sigma$ avec β la variable entière et D la variable d'endommagement variant de 0 à 1. La variable d'endommagement D peut être un scalaire pour les calculs simples (isotrope) ou du type tenseur (ordre 2, 4, 8...) pour les structures compliquées (anisotrope). La variable d'endommagement D peut être déterminée à partir d'essais mécaniques ou par des essais ultrasoniques au laboratoire: + A partir des essais mécaniques, l'endommagement est déterminé à partir de la courbe contrainte-déformation: $D = 1 - \frac{E_0 \varepsilon}{E \varepsilon} = (1.29)$ où: E_0 est le module d'élasticité initiale ; E est le module d'élasticité du matériau endommagé. + A partir de mesures au niveau microscopiques (ultrasonique, X-ray...), l'endommagement est calculé comme le rapport entre l'aire de la zone du matériau endommagé S_D sur l'aire totale S_T . $D = \frac{S_D}{S_T} = (1.30)$ [10]

II.2.1 Mécanique d'endommagement :

La mécanique de l'endommagement ne fait intervenir les microfissures qu'au travers d'un concept d'homogénéisation. En même temps, elle décrit leur évolution de façon macroscopique, tout en restant dans le cadre de la mécanique des milieux continus.

A partir des travaux de Kachanov en 1958, qui a introduit une variable d'endommagement pour décrire la détérioration des matériaux par son effet sur les caractéristiques élastiques, sous sollicitation unidimensionnelle, cette notion par la suite été généralisée sur la base de la thermodynamique des processus irréversible (Lemaître et Chaboche).

Dans Lemaître et Chaboche, l'endommagement est représenté comme la conséquence d'une diminution de la section utile d'un volume élémentaire représentatif (VER) du matériau suffisamment grand pour qu'il puisse être considéré comme homogène et suffisamment petit pour qu'il puisse être considéré comme un point matériel.

L'endommagement qui est décrit par une variable scalaire D (endommagement isotrope), représente la diminution de la section utile S_u par rapport à la section totale en un point de la structure et donc :

$$D = 1 - \frac{S_u}{S} + \frac{S - S_u}{S} = \frac{S_{S_{endo}}}{S} \quad (.1.1)$$

Et par conséquent la contrainte s'écrit :

$$\sigma = (1 - D) C : \varepsilon \quad (.1.2)$$

Avec C le tenseur d'élasticité du matériau sain, et sont les tenseurs des contraintes et des déformations de ce matériau.

La valeur D de la variable varie entre 0 pour le matériau non endommagé et lorsque celui-ci est complètement endommagé mais pour laquelle reste à postuler une loi d'évolution. Sur la base de cette théorie, de nombreux modèles ont été développés. Selon l'objectif à atteindre lors de la modélisation et lors de l'établissement des hypothèses. La mécanique de l'endommagement est appropriée pour représenter l'initiation de la fissuration à partir de microfissures mais aussi d'autres modes de ruine comme le fluage, par exemple. L'application des modèles continus décrivant le comportement de ce matériau lors de calculs par éléments finis se heurte en général à des difficultés de dépendance du maillage lors de la discrétisation. L'analyse devient de ce fait

inobjective. Un des procédés adoptés pour éviter cette difficulté consiste en l'utilisation d'approches dites non-locales [11]. Le concept de non-localité a permis d'ouvrir une nouvelle voie pour le développement de ces modèles.

II-2.1.1 Domaine de validité et d'emploi :

D'emblée il faut préciser ce que l'on entend par début et fin du processus d'endommagement, c'est-à-dire, en fait, l'échelle des phénomènes auxquels on s'intéresse.

Un matériau est vierge de tout endommagement s'il est dépourvu de fissures et de cavités à l'échelle microscopique ou, d'un point de vue plus pragmatique, si son comportement à la déformation est celui du matériau élaboré dans les meilleures conditions. La théorie de l'endommagement décrit donc l'évolution des phénomènes entre l'état vierge et l'amorçage de la fissure macroscopique. Cette évolution, qu'il n'est pas toujours aisé de distinguer du phénomène de déformation l'accompagnant le plus souvent: [04]

- L'endommagement plastique-ductile.
- L'endommagement viscoplastique fragile ou fluage.
- L'endommagement de fatigue ou de micro plasticité.
- L'endommagement macro fragile.

II-2.1.2 Variable d'endommagement:

La détérioration par création de défauts est paramétrée par une variable d'endommagement scalaire ou tensoriel D . En premier lieu, il nous faut définir la variable d'endommagement. La définition d'une variable d'endommagement est cruciale, ceci afin de pouvoir l'utiliser dans une loi de comportement. Cette variable doit représenter l'état de détérioration en l'occurrence la fissuration du matériau. Les variables très diverses ont été adoptées pour représenter l'état d'endommagement dans les différents travaux. La difficulté de sa définition repose sur le fait que l'endommagement n'est pas directement mesurable.

II-2.1.3 Définition :

Soit S l'aire d'une section d'un élément de volume repérée par sa normale \vec{n} . Dans cette section, les fissures et cavités qui constituent le dommage laissent des traces de formes diverses. Soit S_D l'aire totale de l'ensemble des traces des défauts corrigée des effets de concentrations de contraintes et d'interactions

On appelle D_n la mesure de mécanique de l'endommagement local relativement à la direction \vec{n} .

Par définition [12], on pose $D_n = \frac{S_d}{S}$

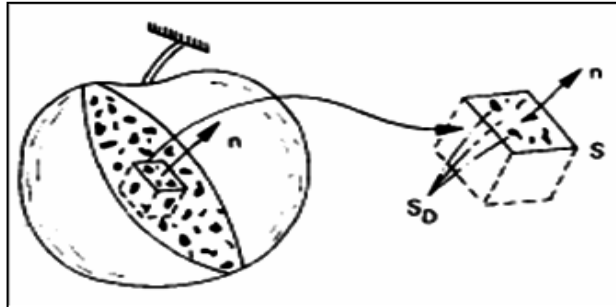


Figure II-2: Élément de surface. [04]

D'un point de vue physique de l'endommagement D_n est donc l'aire relative (corrigée) des fissures et cavités coupées par le plan normal à la \vec{n} .

D'un point de vue mathématique, en faisant tendre S vers 0, la variable D_n et la densité surfacique (corrigée) la discontinuités de la matière dans la plan \vec{n} . [04]

$D_n = 0$ Correspond à l'état non endommagé ou vierge. (Matériau sain)

$D_n = 1$ Correspond à l'élément de volume rompu en deux parties selon un plan normal à \vec{n} .

$0 < D_n < 1$ Caractérise l'état d'endommagement. RAMTANI [3] relie l'endommagement à la perte de la raideur en décrivant le paramètre d'endommagement par la fonction suivant :

$$D_n = \frac{E_0(\vec{n}) - E(\vec{n})}{E_0(\vec{n})}$$

Les approches d'endommagement comportent trois étapes :

- ✓ Choix des variables de l'endommagement pour caractériser l'état d'endommagement du matériau.
- ✓ Détermination des lois de comportement pour une étape d'endommagement donnée.
- ✓ Établissement de l'évolution d'endommagement choisi.

II-2.2 La théorie d'endommagement isotrope :

Un endommagement isotrope est constitué de fissures et cavités dont l'orientation est distribuée uniformément dans toutes les directions. Dans ce cas, la valeur de la variable D_n ne

dépend pas de l'orientation de la normale \vec{n} et le scalaire D caractérise complètement l'état de dommage. [15]

$$D_n = D \forall \vec{n}$$

II-2.2.1. Notion de contrainte effective :

La contrainte effective, $\check{\sigma}$, est la contrainte rapportée à la section qui résiste effectivement aux efforts. Pour le cas unidimensionnel, on a :

$$\check{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D}$$

Dans le cas tridimensionnel d'un endommagement isotrope, on écrit pour le tenseur de contrainte effective $\check{\sigma}$.

II-2.2.2. Principe d'équivalence en déformation : [12]

Cette théorie, introduit par J.L. Chaboche et J. Lemaître, s'applique à un matériau dont le comportement initial est quelconque. Tout comportement à la déformation unidimensionnel ou tridimensionnel d'un matériau endommagé est traduit par les lois de comportement du matériau vierge dans lesquelles on remplace la contrainte usuelle par la contrainte effective.

II-2.2.3. Endommagement critique à rupture :

On définit la valeur critique de l'endommagement D_{cr} qui correspond à la rupture par décohésion interatomique. [04] Si $\check{\sigma}$ est la contrainte unidimensionnelle de rupture σ_u la contrainte de rupture ultime usuelle, on a :

$$\check{\sigma}_u = \frac{\sigma_u}{1 - D_{cr}}$$

La physique du solide montre que $\check{\sigma}_u$ est de l'ordre de $E/50$ à $E/20$; comme pour les matériaux usuels σ_u est de l'ordre de $E/100$ à $E/250$, D_{cr} est de l'ordre de 0,5 à 0,9. Ceci autorisera à négliger devant 1 le terme $(1 - D_{cr}) x$, (avec $x \gg 1$) qui intervient souvent dans les calculs.

II-2.2.4. Évolution de la variable d'endommagement :

L'apparition de l'endommagement du béton commence par une phase élastique sous tout type de chargement (traction-compression, flexion). Cependant si on veut tenir compte plus précisément du phénomène réel et prendre en compte les orientations des micro défauts ou les directions privilégiées de leur propagation, il existe plusieurs mécanismes de microfissuration qui rendent l'endommagement fortement anisotrope et présente un caractère unilatéral marqué, suivant que les micro défauts sont ouverts ou fermés. [12]

Dans la pratique, l'endommagement n'est pas directement accessible aux mesures. Peu d'éléments permettent de distinguer un élément de volume endommagé d'un élément de volume vierge dont l'historique des sollicitations n'est pas connu.

La définition de l'endommagement qui est considéré est fondée sur le concept de la contrainte effective. Les mesures qui en découlent sont alors liées au couplage déformation-endommagement, c'est à dire à la modification des caractéristiques mécaniques des matériaux engendrée par l'endommagement.

Par ailleurs, les indicateurs utilisés peuvent traduire un endommagement global ou local de l'éprouvette selon l'échelle à laquelle ils sont évalués. L'endommagement est observable sur un volume de matériau qui doit être suffisamment grand par rapport à ses hétérogénéités pour pouvoir être analysé par la mécanique des milieux continus. Cette dimension est de l'ordre de 10cm pour le béton.

II-2.3. La théorie d'endommagement anisotropes :

La dégradation du béton sous chargement mécanique est un phénomène complexe, l'effet de la microfissuration puis la microfissuration peut être modélisée par l'endommagement accompagné de déformations anélastiques. En fonction des sollicitations, la fissuration prend une orientation privilégiée qui va créer de toute évidence de l'anisotropie.

La théorie présentée consiste à employer conjointement le tenseur d'endommagement D et une mesure scalaire d qui sera la trace du tenseur D , Ces deux variables fournissent respectivement l'orientation des défauts et leur densité. La formulation de l'endommagement anisotrope nécessite l'utilisation de tenseurs d'ordre élevé faisant intervenir plusieurs paramètres.

II-2.4. Critères d'endommagement : [5]

Lemaître présente quatre critères d'endommagement dans le cadre de l'isotrope :

II-2.4.1. Critère du taux de restitution de densité d'énergie élastique : est le plus simple et formellement justifié par la thermodynamique ; il fait intervenir seulement le coefficient de Poisson.

II-2.4.2. Critère à trois invariants : Ce critère est exprimé à partir de trois invariants élémentaires.

II-2.4.3. Critère non symétrique en déformation : Il a été développé pour le béton qui présente la caractéristique d'être considérablement plus résistant à l'endommagement en compression qu'en traction,

II-2.4.4. Critère de limite de fatigue : Ce critère est le plus complexe à cause du cas de fatigue.

II-2.4.5. Critère d'extension maximale (Critère de SAINT VENANT) :

"Les irréversibilités commencent en un point d'un solide lorsque la plus grande déformation devient égale à la déformation pour laquelle la limite élastique est atteinte en traction simple" :

$$\text{Sup} (\varepsilon_i^+) - \frac{\sigma_e}{E} = 0$$

Sa représentation dans le plan $\sigma_3 = 0$ (figure suivante) montre en effet qu'il représente la dissymétrie traction compression.

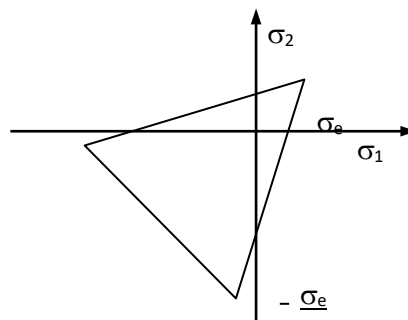


Figure. II-3 : Critère DE SAINT VENANT trace dans le plan $\sigma_3=0$. [12]

II-2.5 La mécanique de la rupture:

La mécanique de la rupture est l'ensemble des théories permettant de décrire le Comportement des structures, qui ont une discontinuité géométrique. Souvent cette discontinuité représentée par une ligne dans un milieu en deux dimensions est une surface (exemple S dans Fig.II.4) en 3D.

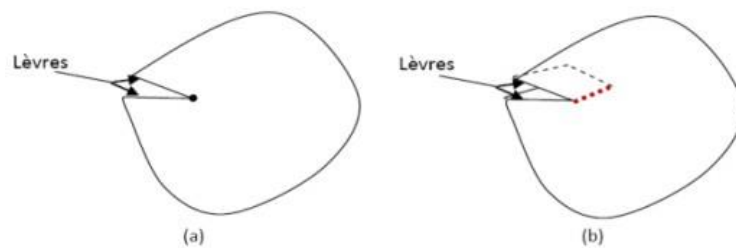


Fig.II.4. Fissure dans un milieu continu : a) en 2D, b) en 3D

II-3. Effets de la température sur le béton :

Nous avons vu qu'une augmentation de la température de durcissement accélère les réactions chimiques d'hydratation et affecte ainsi avantageusement la résistance au jeune âge du béton sans aucun effet néfaste sur la résistance ultérieure. Une température plus élevée pendant et après le contact initial entre le ciment et l'eau réduit la durée de la période dormante. De sorte que la structure globale de la pâte de ciment hydraté s'établit très tôt. Bien qu'une température plus élevée durant la mise en place et la prise augmente la résistance au très jeune âge, elle peut avoir un effet inverse sur la résistance après 7 jours. En effet, une hydratation initiale rapide peut conduire à la formation de produits d'hydratation présentant une structure physique moins compacte, probablement plus poreuse, de sorte qu'un pourcentage de pores restera non rempli. En se basant sur la règle du rapport gel/espace, cela conduira à une résistance plus faible comparée à celle d'une pâte de ciment moins poreuse, hydratée lentement, dans laquelle un rapport gel/espace élevé sera éventuellement atteint.

II-3.1. Propriétés thermiques du béton :

Les propriétés thermiques du béton sont importantes pour une multitude de raisons dont les principales sont données ci-dessous. La conductivité thermique et la diffusivité interviennent lors du développement des gradients de température, des déformations thermiques, du gauchissement et de la fissuration au très jeune âge du béton, ainsi que lors de l'isolation thermique d'un béton en service.[04]

❖ conductivité thermique :

La conductivité thermique mesure la capacité d'un matériau à conduire de la chaleur. Elle est définie comme le rapport du flux de chaleur au gradient de température. La conductivité thermique est mesurée en Jules par seconde par mètre carré de surface d'un corps pour différence de température de 1°C par mètre d'épaisseur de ce corps.

❖ Diffusivité thermique :

La diffusivité représente la vitesse à laquelle les changements de température peuvent avoir lieu dans une masse de béton ; elle représente donc un indice de la facilité avec laquelle un béton peut subir des changements de température.

❖ Chaleur spécifique :

La chaleur spécifique, qui représente la capacité d'un béton à emmagasiner de la chaleur, est peu affectée par la nature minéralogique des granulats, mais considérablement augmentée par un accroissement de la teneur en eau du béton. La chaleur spécifique augmente quand la température augmente et quand la masse volumique diminue. La chaleur spécifique du béton ordinaire se situe entre 840 et 1170 J/kg par°C et est déterminée par des méthodes élémentaires de physique.

Une autre propriété thermique importante du béton est son absorptivité thermique lorsque l'on considère les effets du feu. Elle est définie comme étant égale à $(K\rho c)^{1/2}$, où K est la conductivité thermique, ρ la masse volumique et c la chaleur spécifique. On a précisé que l'absorptivité thermique d'un béton de densité normale est égale à $2190 \text{ J/m}^2 \text{ s}^{1/2} \text{ par}^\circ\text{C}$. Pour du béton léger de masse volumique de 1450 Kg/m^3 , sa valeur est de $930 \text{ J/m}^2 \text{ s}^{1/2} \text{ par}^\circ\text{C}$.

II-3.1.1. Résistance du béton aux hautes températures et résistance au feu : [04]

Les rapports sur les essais pour établir l'effet d'une exposition à une température élevée, jusqu'à environ 600°C, donnent des résultats très variés. Les raisons en sont : des différences de l'état de contrainte et de l'état de humidité du béton au moment du chauffage, des différences dans la durée d'exposition à la température élevée et des différences dans les propriétés des granulats. Par conséquent, il est difficile de généraliser les observations faites et d'en tirer des conclusions globales. De plus la connaissance de la résistance du béton peut être nécessaire pour différentes conditions pratiques d'exposition : par exemple. Dans le cas d'un incendie, l'exposition à une

température élevée ne dure que quelques heures, mais le flux de chaleur est important de même que la masse de béton soumise à ce flux. Inversement, en coupant le béton avec des lances thermiques, l'exposition à une température élevée n'est que de quelques secondes et le flux de chaleur appliqué est très faible.

II-3.1.2. Comportement du béton au feu :

Bien que l'on ait retraité de la résistance au feu du béton à plusieurs occasions. Cependant, on peut dire que; en général, le béton a un bon comportement sur le plan de la résistance au feu; c'est-à-dire que le béton est non combustible; la durée d'exposition au feu durant laquelle il continue d'offrir de bonnes performances est relativement élevée et il ne dégage pas de fumée toxique. Les critères correspondants de performance sont :

La capacité à reprendre les charges, la résistance à la pénétration des flammes et la résistance à la transmission de la chaleur lorsque le béton est utilisé comme matériau protecteur pour l'acier. Une analyse générale de la résistance au feu du béton est décrite par **Smith**.

En pratique, on s'attend à ce que le béton de structure conserve sa capacité de solidité pendant le temps voulu, ce qui est tout à fait différent d'être résistant à la chaleur. En considérant le comportement du béton en tant que matériau. On doit noter que le feu introduit des gradients élevés de température et, en conséquence, les couches chaudes de surface ont tendance à se séparer du cœur plus froid du béton. La formation de fissures est favorisée aux joints, dans les parties du béton peu consolidées ou dans les plans des armatures; une fois les armatures exposées, elles véhiculent la chaleur et accélèrent l'action des températures élevées.

II-4 Les modèles de fissuration

II.4.1 Définition générale

Les modèles présentés dans cette partie considèrent que le béton est un matériau homogène puisque à l'échelle des applications numériques sont en général suffisamment élevée pour admettre cette hypothèse. Néanmoins, on peut noter l'existence de modèles d'éléments finis où la microstructure du béton est représentée par une matrice de la pâte (ciment), des inclusions (granulats) et éventuellement des microfissures initiales introduites dans la matrice autour des inclusions. La position des granulats est alors déterminée soit par une procédure aléatoire [Wang 1997], soit par une reconstruction tridimensionnelle en utilisant la technologie d'imagerie digitale

réelle [Nagai 1998]. Cette technologie est actuellement très récente et qu'elle a été prise en forte considération par les chercheurs. Ce domaine de recherche a eu le point de départ surtout avec les développements scientifiques connus après les rapprochements des mécaniciens et les médecins dans un cadre de recherche sous le nom de biomécanique. Dans le domaine de génie civil, ce type de modèle doit également inclure un modèle de fissuration pour le ciment et un modèle pour l'interface ciment-granulat. Cette supposition permet seulement d'étudier l'évolution de la microstructure du béton soumis à une sollicitation quelconque. Une autre façon de prendre en compte l'hétérogénéité du béton est de distribuer d'une manière aléatoire sur les éléments du maillage le module de Young et la résistance limite de traction du béton en fonction de leur valeur moyenne et de leur écart type obtenus expérimentalement [Rossi 1997]. En général, l'hétérogénéité du béton est rarement prise en compte de façon directe, la modélisation de la fissuration par éléments finis étant déjà relativement complexe à mettre en œuvre. La difficulté principale de la modélisation de la fissuration du béton par éléments finis est engendrée par la nature de la fissure elle-même. En effet, une fissure est une discontinuité géométrique qui divise le matériau ; alors que la méthode des éléments finis est une technique basée essentiellement sur la mécanique des milieux continus. Cette incompatibilité apparente entre le problème posé et l'outil de modélisation nécessite le développement de schémas spécifiques qui, tout en conservant la notion générale de continuité dans la solution, entraîne des changements drastiques dans le matériau à l'endroit de la fissure. Les travaux pionniers en matière de modélisation de fissuration ont été ceux de Ngo & Scordelis en 1967 qui ont introduit le concept de la fissuration discrète et ceux de Rashid en 1968 qui a introduit le concept de la fissuration répartie. La première approche modélise la fissure en insérant une discontinuité géométrique réelle dans le maillage et la seconde simule la fissuration en modifiant les propriétés du matériau à l'endroit de la fissure.[01].

II .4.2 Critère d'amorçage et de propagation de fissure:

Cette méthode est décrite pour la première fois par Lemaître et Chaboche. Les auteurs ont développé les trois modes de fissuration selon la direction de la sollicitation par rapport à celle de la fissuration. Ainsi, on distingue trois modes de fissuration suivants:

- Le mode I (mode d'ouverture) où les contraintes normales ouvrent la fissure.
- Les modes II (Mode de cisaillement plan) où les contraintes tangentielles ouvrent la fissure.

- Le mode III (mode de cisaillement anti plan) où les contraintes tangentielles ouvrent la fissure.

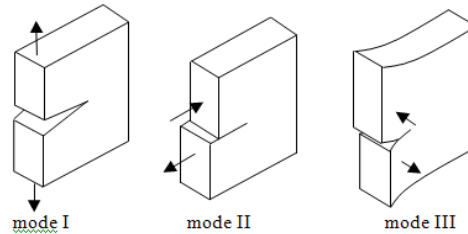


Fig. II.4: Les modes de sollicitation d'une fissure.

Ce mécanisme s'applique dans l'hypothèse d'un matériau élastique linéaire. La non linéarité de la partie croissante de la courbe uni axiale liant les contraintes aux déformations de traction peut être négligé.

La principale caractéristique du comportement du béton est probablement sa faible résistance limite en traction qui provoque une fissuration en tension à des niveaux de contrainte faibles comparés à la résistance limite en compression. Par conséquent, dans la majorité des modèles de fissuration, le béton non fissuré est considéré comme linéaire élastique isotrope en tension. En général, le critère de traction maximale ou le critère de Rankine est utilisé pour détecter l'apparition d'une fissure. L'amorçage d'une fissure s'effectue dans ce cas uniquement en mode I (découplage du comportement bidimensionnel est considéré dans ce cas). Ces hypothèses sont justifiées en l'absence de compression latérale significative [Kupfer 1969]. Pratiquement, les contraintes principales ainsi que leurs directions sont calculées en un point d'intégration et si une de ces contraintes, positive, excède une valeur limite alors une fissure perpendiculaire à la direction de cette contrainte apparaît au point considéré. Le critère de Rankine permet l'amorçage d'une fissure uniquement en mode I. Bien que l'utilisation de ce critère semble justifiée et que de ce fait celui-ci soit abondamment employé dans des modèles de fissuration, il peut paraître restrictif. C'est pourquoi, certains modèles utilisent, en plus du critère de Rankine, un critère d'ouverture de fissure en cisaillement [Rossi 1997] et d'autres emploient une enveloppe de rupture tridimensionnelle avec amorçage d'une fissure si le critère est transgressé avec au moins une contrainte principale de tension [Torrent et al 1987],[Gonzalez Vidosa et al 1991],[Kotsovos, Pavlovic, 1995]. [01].

Tous ces modèles conservent le critère de propagation précédent avec un plan de fissure qui se propage perpendiculairement à la contrainte principale maximale. Il existe également des

modèles où le critère d'amorçage de fissure et le critère de propagation de fissure dépendent tous les deux de l'état de contrainte au point considéré. Récemment, Weihe et al, ont proposé un critère bidimensionnel d'amorçage et de propagation de fissure applicable à tout type de matériau prenant en compte la rupture en mode I, mode II et mode mixte mais ils s'accordent sur le fait qu'une fissure apparaît en mode I si le matériau, tel le béton, est suffisamment fragile [Weihe et al 1998], [Kroplinet al 1997].

A partir de l'analyse prise sur les différents modes de fissuration mentionnés ci-dessus, la bibliographie du domaine a regroupé les modèles numériques développés en deux grandes catégories, à savoir la modélisation de la fissure discrète et la modélisation de la fissure répartie. [01].

II .4.3 Modèles de la fissure discrète:

Le concept de la fissuration discrète se distingue de tous les autres modèles de fissuration et d'endommagement du béton car, dans cette approche, une discontinuité géométrique réelle est introduite dans le maillage d'éléments finis à l'endroit de la fissure. Le premier modèle numérique du matériau composite béton-armé par éléments finis qui a introduit l'effet de la fissuration a été développé par Ngo et Scordelis 1967. Les auteurs ont effectué une analyse élastique linéaire des poutres en béton armé avec des modèles de fissure prédéfinies. Dans ce cadre, les fissures ont été modélisées en séparant les points nodaux du maillage ou de la discrétisation géométrique en éléments finis ayant un côté en commun et ainsi la création d'un modèle de fissure discrète (figure II.4.3).



Figure II.5 Modèle de la fissure discrète. [01]

Ce modèle possède des inconvénients majeurs ; avec le changement de la topologie et la redéfinition des points nodaux la largeur de la bande étroite de la matrice de rigidité sont détruites et ceci rend nécessairement des résultats d'informatique de grand effort ainsi que le manque de généralité dans l'orientation des fissures a rendu le modèle de la fissure discrète impopulaire. Pour pallier cette difficulté, l'approche a été affinée en utilisant des méthodes de

remaillage adaptatif de façon à ce que des nouveaux éléments soient introduits avec leurs côtés orientés dans la direction de la fissure [Ingraffea et al 1984], [Hellier et al 1987].

On peut noter également que l'approche de la fissure discrète ne semble pas avoir été développée en trois dimensions. De plus, cette technique semble plus performante si elle est appliquée à une classe de problèmes pour lesquels l'orientation de la fissure est connue par avance puisque les inconvénients liés à la dépendance vis à vis du maillage disparaissent d'eux-mêmes [Rots 1989a], [Rots 1991]. L'approche proposée par Ngo & Scordelis 1967 a donc été améliorée et les fissures discrètes sont à présent généralement modélisées par des éléments d'interface interdisant le recouvrement des faces de la fissure mais permettant leur ouverture et glissement relatifs [Ingraffea et al 1984], [Hellier et al 1987], [Rots 1989a], [Rots 1991]. Bien que la fissure soit ouverte, des contraintes normale et tangentielle peuvent être transmises à travers celle-ci du fait de la présence d'aspérités et sont fonction des déplacements relatifs normal et tangentiel de la fissure. Le concept de la fissuration discrète se présente comme étant l'approche qui reflète le mieux l'état d'endommagement final d'une structure en béton car elle se rapproche de notre conception naturelle de la fissuration. Pour une telle structure, une technique de remaillage adaptatif pour modéliser les fissures individuellement serait trop lourde à gérer et extrêmement chère en temps, de calcul, notamment en trois dimensions où cela semble être quasiment impossible à mettre en œuvre.

II .4.4 Modèles de la fissure répartie:

II .4 .4. 1 Principes générales:

Le besoin de modèle de fissure qui offre la génération automatique des fissures et de la généralité complète dans l'orientation de fissure, sans besoin de redéfinir la topologie d'élément fini, a mené la majorité d'investigateurs à adopter le modèle de fissure répartie. Le modèle de fissure répartie représente beaucoup de fissures finement espacées perpendiculaires à la direction d'effort principal, comme illustré sur la figure (II .4.4 .1).

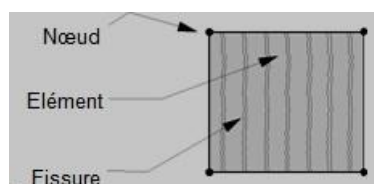


Figure II.6 : Modèle de la fissure répartie. [01].

Cette approximation du comportement de la fissuration du béton est tout à fait réaliste, puisque le comportement de la rupture du béton est très différent de celui des métaux. La rupture dans le béton est précédée par la microfissuration du matériau dans la zone de processus de rupture, qui se manifeste comme contrainte adoucissante. Cette zone est souvent très grande relativement à la coupe du membre dû à la grande taille de l'agrégat comme présenté sur la figure (2.6.a). Dans le membre d'acier une rupture est précédée par l'écoulement du matériau dans la zone de processus qui est concentrée près du bout de la fissure et a une taille relativement petite comme présenté sur la figure (II.4.4.1.b).

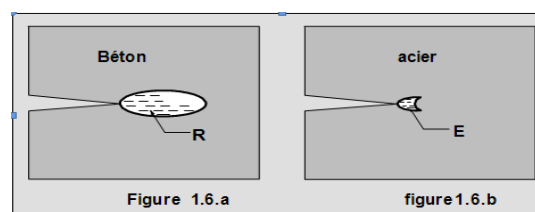


Figure II.7 .b: La taille relative de la zone processus de la fissure

Figure 1.6.a : Zone de Rupture (R) du béton

Figure 1.6.b : Zone d'Écoulement (E) de l'acier [01].

Le modèle de fissure répartie est d'abord employé pour la première fois par Rashid (1968). Ce dernier a modélisé le béton fissuré comme étant un matériau élastique orthotrope avec une réduction du module élastique dans la direction normale du plan de fissure. Avec cette approche les discontinuités locales de déplacement aux fissures sont réparties sur un certain secteur attaché dans l'élément fini et le comportement du béton fissuré peut être représenté par les relations moyennes de contrainte-déformation.

II .4.4.2 Concept du modèle de fissure répartie :

Le concept de la fissure répartie adapte la nature de la méthode de déplacement d'élément fini, puisque la continuité du champ de déplacement demeure intacte. Avant l'apparition des fissures les matériaux fragiles sont modélisés comme des matériaux élastiques linéaires et isotropes. Pour les problèmes bidimensionnels, la relation contraintes déformations s'écrit :

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_1 \\ \Delta\sigma_2 \\ \Delta\tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & \beta G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_1 \\ \Delta\varepsilon_2 \\ \Delta\gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

Lorsque la contrainte principale majeure atteint la résistance De traction du béton ou d'une façon générale, la combinaison des contraintes principales atteint le critère de rupture, une fissure s'initie perpendiculaire à la direction de la contrainte principale. Le comportement isotropique représenté par la relation contrainte-déformation est remplacé par une loi orthotrope :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & \beta G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

L'équation (2.2) peut avoir des difficultés prématurées de convergence. En plus, Le phénomène n'est pas bien représenté [Suidan et Schnobrich 1973], extrait [De Borst 2002]. Pour cette raison, le module réduit de cisaillement a été réinséré dans ce modèle. La relation contrainte-déformation du béton

fissuré devient :

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_1 \\ \Delta\sigma_2 \\ \Delta\tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & \beta G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_1 \\ \Delta\varepsilon_2 \\ \Delta\gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

L'utilisation du facteur de transfert de cisaillement η n'est pas uniquement pour résoudre la difficulté numérique relative à une matrice de rigidité singulière mais aussi pour améliorer la représentation du phénomène du béton fissuré dans une analyse par éléments finis. Il représente le phénomène d'engrènement. Plusieurs recherches adoptent une valeur constante à ce facteur ($\eta = 0.20$: une valeur est largement utilisée) mais pour des cas où les fissures sont capables de transférer des contraintes de cisaillement, il est nécessaire de prendre la valeur de η en fonction de la relation fissure-déformation. Khalfallah et al. ont développé une analyse numérique relative à la prise en compte du facteur de transfert de cisaillement à travers les lèvres du béton fissuré. Leur étude a conduit à une recommandation de la tenue en considération d'une valeur moyenne de l'ordre 0.40 à ce facteur de transfert de cisaillement. Cette déduction n'est pas basée sur une intuition mais l'analyse des résultats obtenus sur des poutres en béton armé de longueurs courantes. Enfin, l'analyse entreprise a conduit à limiter la valeur du coefficient de transfert de cisaillement. Récemment, l'expérience a montré que le béton n'est pas un matériau parfaitement fragile et qu'il présente une certaine contribution de comportement structural et il a aussi une

capacité de reprendre des efforts au de là de sa contrainte limite. Cette observation expérimentale a conduit à la substitution du modèle purement fragile du matériau par un matériau à comportement adoucissant en traction, dans lequel une branche descendante est introduite au modèle qui diminue graduellement la résistance en traction du matériau. [01].

Dans une représentation répartie, on peut modéliser ce phénomène en

insérant au facteur de réduction. * dans la matrice de rigidité sécante :

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_1 \\ \Delta\sigma_1 \\ \Delta\tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} u^* & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & \beta G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_1 \\ \Delta\varepsilon_2 \\ \Delta\gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

Le facteur de réduction μ^* dépend de la déformation normale à la fissure.

Une forme Plus raffinée est donné en ajoutant le coefficient Poisson ν .

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_1 \\ \Delta\sigma_1 \\ \Delta\tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u^* E}{1-u^* u^2} & \frac{u u^* E}{1-u^* u^2} & 0 \\ \frac{u^* E}{1-u^* u^2} & \frac{E}{1-u^* u^2} & 0 \\ 0 & 0 & \beta G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_1 \\ \Delta\varepsilon_2 \\ \Delta\gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.5)$$

Dans le contexte, le modèle de la fissure répartie peut être décomposé en deux représentations différentes à savoir : la modélisation de fissure fixe et celle de fissure rotationnelle. Dans le modèle de fissure fixe, une fissure se forme perpendiculairement à la direction principale de l'effort de traction quand ce dernier exc. de la résistance à la traction du béton et l'orientation de la fissure ne change pas pendant le prochain chargement. La facilité de formuler et d'implanter ce modèle a été mené à son utilisation commune dans les études têt [Hand et al 1973]; [Lin et Scordelis 1975]. Les études suivantes, cependant, ont prouvé que le modèle est associé aux probl. mes numériques provoques par la singularité de la matrice de rigidité des matériaux. D'ailleurs, le modèle de fissure a prévu par l'analyse des éléments finis montre souvent des déviations considérables de cela observé dans les expériences [Jain et Kennedy 1974]. Les probl. mes du modèle de fissure fixe peuvent être surmontés en présentant un module de cisaillement fissuré, qui élimine la plupart des difficultés numériques du modèle et améliore considérablement l'exactitude des prévisions de modèle de fissure. Les résultats ne semblent pas pour être très sensibles à la valeur du module de cisaillement fissuré [Vebo et Ghali 1977]; [Barzegar et Schnobrich 1986], aussi

longtemps la valeur qui est supérieure à zéro est employée, afin d'éliminer la singularité de la matrice matérielle de rigidité et de l'instabilité numérique associée. Quelques modèles récents emploient un module de cisaillement fissuré variable pour représenter le changement de la rigidité de cisaillement, en tant que l'effort principal du béton varie de traction à la compression [Balakrishnan et Murray 1988]; [Cervenka et al 1990]. De Borst et Nauta (1985) ; ont proposé un modèle dans lequel le taux de contrainte est additif décomposé en taux de contrainte de béton et taux de contrainte de fissure. Le dernier, est alternativement composé par plusieurs composantes de contrainte de fissure. Après la formulation de la relation, contrainte-déformation du béton bidimensionnel et la transformation de la direction de fissure aux coordonnées globales du système de la structure, d'une matrice matérielle avec sans accouplement entre la normale et l'effort de cisaillement sont construites. Malgré sa simplicité et facilité relatives d'application, cette approche toujours exige le choix d'un module de cisaillement fissuré de béton. Dans le modèle de fissure rotationnelle développé par Cop et al (1980) considèrent que la direction de la fissure n'est pas fixée et reste constante en sa direction pendant la fissuration en fonction du chargement. Plusieurs essais par Vecchio et Collins (1982) ont prouvé que l'orientation de la fissure change avec l'histoire de chargement et que la réponse du spécimen dépend du courant plutôt que de la direction originale de fissure.

Dans le modèle de fissure rotationnelle, la direction de fissure est maintenue perpendiculaire à la direction de la contrainte principale de traction et, par conséquent, aucune contrainte de cisaillement ne se produit dans la fissure plane. Ceci élimine le besoin du module de cisaillement fissuré. Un inconvénient de cette approche est la difficulté de corréler les résultats analytiques avec la recherche expérimentale de la mécanique de rupture, qui est en désaccord avec le concept de la fissure rotationnelle. Ce modèle, néanmoins, a été employé avec succès dans des études analytiques des structures en béton armé dont le but est d'étudier le comportement structural global, plutôt que les effets locaux à proximité d'une fissure [Gupta et Akbar 1983]; [Adeghe et Collins 1986]. [01].

II.4.5 Autres modèles:

Tous les modèles présentés dans ce chapitre pourraient également être qualifiés d'approches réparties dans le sens où la discontinuité induite par la fissure est modélisée par un modèle continu (modèle de fissure répartie). Ces modèles n'ayant pas été développés et programmés dans le cadre de cette thèse mais leurs présentations, ici, ont pour objet d'exposer les principes de ces modèles d'une part et de rapprocher les idées fondamentales en vue de donner un aperçu

comparatif entre les modèles existant. Il fallait de dire qu'actuellement que le champ de la modélisation mécanique des matériaux de structure recense plus de 50 modèles numériques.

II.4.5.1 Les modèles basés sur la théorie de l'endommagement:

Le modèle d'élasticité couplé à l'endommagement est présenté pour la première fois par Bazant et Kim (1979). Ils ont couplé la théorie de l'élasticité à un mécanisme de fissuration basé sur la théorie de Dougill (1976). Le principe de la mécanique d'endommagement sert à modéliser les effets de microfissures d'un matériau sur son comportement mécanique. Cette modélisation est bien adaptée à la description des non linéarités survenant dans le béton ou dans les matériaux types connus comme des matériaux fragiles. Les développements des modèles basés sur la théorie d'endommagement nécessitent aussi la définition de la règle d'endommagement qui caractérise le taux d'endommagement matériel et son orientation. Le modèle proposé par Lemaitre (1986) est considéré parmi les premiers modèles utilisant la théorie d'endommagement isotrope. Ce modèle est basé sur la définition de la contrainte effective, stipulant que la contrainte réelle s'applique sur la partie de matière encore résistante, est supérieure à la contrainte macroscopique (figure 2.7). Cette notion s'exprime souvent par le biais du principe d'équivalence en déformation. La réduction de contrainte est due principalement à la microfissuration du béton, la contrainte effective s'écrit donc:

$$\sigma^- = \frac{\sigma}{1-D} \quad (2.6)$$

Où σ^- est la contrainte effective, D est un scalaire positif mesurant l'endommagement matériel. L'expression d'endommagement unidimensionnelles donnée par :

$$D = 1 - \frac{E^*}{E} \quad (2.7)$$

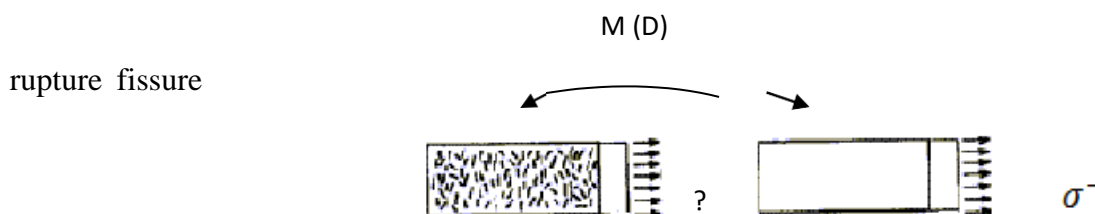


Figure II.4.5.1 : Principe d'équivalence de déformation (d'après Jus 1989)[01].

E et E^* sont respectivement le module d'élasticité du matériau sain et endommagé.

La loi d'élasticité aux problèmes unidimensionnels s'écrit :

$$D = (1 - D)E_s$$

L'endommagement D influe directement sur la rigidité sécante du matériau ; $D = 0$ pour un matériau vierge et $D = 1$ pour un matériau complètement rompu. En outre, la variable d'endommagement peut être tensorielle tenant en compte de l'anisotropie induite par la fissuration [Benouniche 1979], [Pijaudier-cabot1985], [Ramtani 1990], [Bary 1996], [Dragon et Halm 1998], [Raguneau1999], [Scotta et Hanganu 2001]. La mécanique continue de l'endommagement traite la micro fissuration progressive en réduisant la raideur avec un paramètre multiplicatif et, dans ce sens, cette approche est similaire au modèle de la fissuration diffuse [Bazant1988c], [Saouridis et Mazars 1989], [Saouridis et Mazars 1992], [Al-Gadhib et autres 1998]. Si la variable d'endommagement est un scalaire alors, le caractère anisotrope de la fissuration n'est pas pris en compte dans la modélisation correspondante. Par ailleurs, dans le modèle de la fissuration répartie, le concept d'endommagement est considéré inséparable de la largeur de la bande de fissure ou d'un critère d'énergie de rupture.

Contrairement aux modèles de fissuration répartie, le modèle basé sur l'endommagement scalaire ne présente pas de verrouillage des contraintes car toutes les composantes des contraintes tendent vers zéro lorsque la fissure est largement ouverte. En se basant sur cette observation et sur le fait que le verrouillage des contraintes pour le modèle réparti à fissures tournantes apparaît seulement à une phase tardive du processus d'endommagement, Jirasek et Zimmermann ont proposé un modèle combiné de fissuration diffuse tournante avec transition à un endommagement scalaire [Jirasek et Zimmermann 1997], [Jirasek et Zimmermann 1998a]. Le modèle démarre avec une approche qui capture l'anisotropie induite par la fissuration et bascule à une formulation d'endommagement scalaire lorsque l'ouverture de la fissure atteint une valeur critique pour laquelle les problèmes inhérents au modèle de la fissure tournante apparaissent (verrouillage des contraintes, instabilité matérielle). [01].

II.4.5.2 Le modèle micro-plan:

Le modèle micro-plan est né de l'interprétation du comportement macroscopique complexe de métaux polycristallins comme l'interaction de plans de glissement distincts qui sont dus à la structure moléculaire interne du matériau. Bazant et autres. Ont ensuite transféré cette perception de milieu non homogène microscopiquement au contexte du modèle micro-plan [Bazant et Ozbolt 1990], [Ozbolt et Bazant 1992], [Ozbolt et Bazant 1996]. Dans ce modèle, les propriétés du matériau sont caractérisées séparément en un nombre fini de micro-plans, plans d'orientation différente à l'intérieur du matériau. Le comportement macroscopique du matériau

est une réponse intégrale de tous les micro-plans. Pour chaque micro-plan, les relations liant les contraintes aux déformations, incluant les relations d'adoucissement, sont définies par des fonctions exponentielles ou polynomiales. [01].

II.4.5.6 Les modèles avec discontinuités ancrées dans les éléments:

Le verrouillage des contraintes observé avec les modèles diffus de fissuration, notamment celui observé avec le modèle à fissures tournantes, peut être évité en améliorant la représentation cinématique de la rupture fortement localisée. Des techniques basées sur cette idée ont été présentées sous des noms différents, comme par exemple les éléments avec bandes d'adoucissement interne (InnerSoftening Bands) [Olofsson et al 1994], [Ohlsson et Olofsson 1997] ou les éléments avec fissures ancrées (element withem bedded cracks), dont une revue bibliographique détaillée et complète sur le sujet a été effectuée par Jirasek [Jirasek 1998c]. On peut noter cependant que ce type d'élément a été développé en deux dimensions uniquement et principalement avec des éléments finis triangulaires. [01].

II.4.5.7 Les modèles basés sur une méthode sans maillage:

Les méthodes sans maillage ont été développées en vue de simplifier certains problèmes traités avec la méthode des éléments finis, notamment ceux associés à la croissance de surfaces existant dans la propagation de fissures. En effet, l'utilisation de certains modèles de fissuration nécessite à des maillages très fins en leur discrétisation pour capturer correctement l'endommagement ou de techniques de remaillage adaptatif, comme c'est le cas pour le modèle de la fissuration discrète. [01].

Malgré les récents développements connus dans le domaine informatique conduisant à faciliter la tâche numérique et l'apparition de meilleurs automatismes performants, de telles méthodes restent onéreuses en temps de calcul. Pour pallier ces difficultés, Belytschko et al ont développé une méthode sans maillage, appelée méthode de Galerkin sans éléments [Belytschko et al 1994], qu'ils ont appliquée avec succès à la croissance de fissures [Belytschko et al 1995a], [Belytschko et Tabbara 1996]. Néanmoins les capacités de compréhension et la maturité des progiciels basés sur une méthode d'éléments finis sont difficiles à reproduire, notamment pour l'étude de propagation de fissures dans une structure complexe. C'est pourquoi Belytschko et autres. Ont proposé de combiner la méthode des éléments finis avec celle sans maillage appliquée uniquement à des domaines de la structure où ses avantages sont bénéfiques [Belytschko 1995b]. Cette méthode offre des perspectives intéressantes mais elle n'a pas encore été développée en trois dimensions. [01].

II .5 CONCLUSION:

Le béton, comme le témoigne cette discussion, est un matériau très complexe. Pour les modèles continus une fissure peut être considérée comme une zone endommagée fortement localisée. L'apparition et la localisation des zones endommagées dans un solide S élastique, endommagé devrait permettre de suivre le développement des fissures sans connaître a priori leur emplacement. La continuité des champs de déplacement et de déformation alors que les fissures sont des discontinuités géométriques est un problème principal pour ce type.

CHAPITRE III

Le retrait du Béton

III. Le retrait :**III.1 Introduction:**

La durabilité des ouvrages en béton armé ou précontraint est fortement dépendante de la qualité du béton, et en particulier de la zone d'enrobage. C'est en effet au travers de la porosité que peuvent migrer des agents agressifs (sulfates, chlorures, CO₂, etc.) susceptibles d'interagir avec les constituants du ciment et de provoquer l'apparition de désordres. Néanmoins, la compacité des bétons ne peut, à elle seule, être garante de la bonne tenue dans le temps. En effet, la manifestation de phénomènes de fissuration ouverte dans la zone d'enrobage peut augmenter les propriétés de transfert des bétons, aussi compacts soient-ils, et ainsi nuire. leur durabilité. Dans cette optique, la maîtrise de la fissuration précoce des bétons, liée aux phénomènes de retrait, apparait essentielle.

Le retrait du béton est une déformation volumique de celui-ci sous l'action de phénomènes physico-chimiques liés à l'hydratation de la pâte de ciment et au séchage. Etant donné que le taux d'humidité relative du béton coulé s'élève initialement à 100 % et que le milieu ambiant est généralement caractérisé par une humidité relative plus faible, le retrait du béton est souvent assimilé à une réduction de volume.

Ce phénomène est d'autant plus important qu'il est responsable de nombreuses pathologies sur les ouvrages en béton lorsque cette déformation est entravée. On parle alors de retrait empêché et le concepteur aura pour tâche de maîtriser celui-ci pour éviter toute fissuration ou déformation excessive préjudiciable à la durabilité et aux performances de l'ouvrage (stabilité, étanchéité, etc.).

Comme nous le verrons dans cet article, l'entrepreneur pourra, lui aussi, collaborer pour pallier, dans une certaine mesure, ce défaut souvent considéré comme le talon d'Achille d'un matériau de référence. [13]

III.2 Types des retraits:

Types de retrait peuvent être. L'origine de l'apparition de fissures sur la surface des parements On peut identifier cinq formes de retrait. retrait plastique, retrait de dessiccation, le retrait thermique, le retrait de carbonatation et le retrait endogène.

III-2.1 Le retrait plastique : [13]

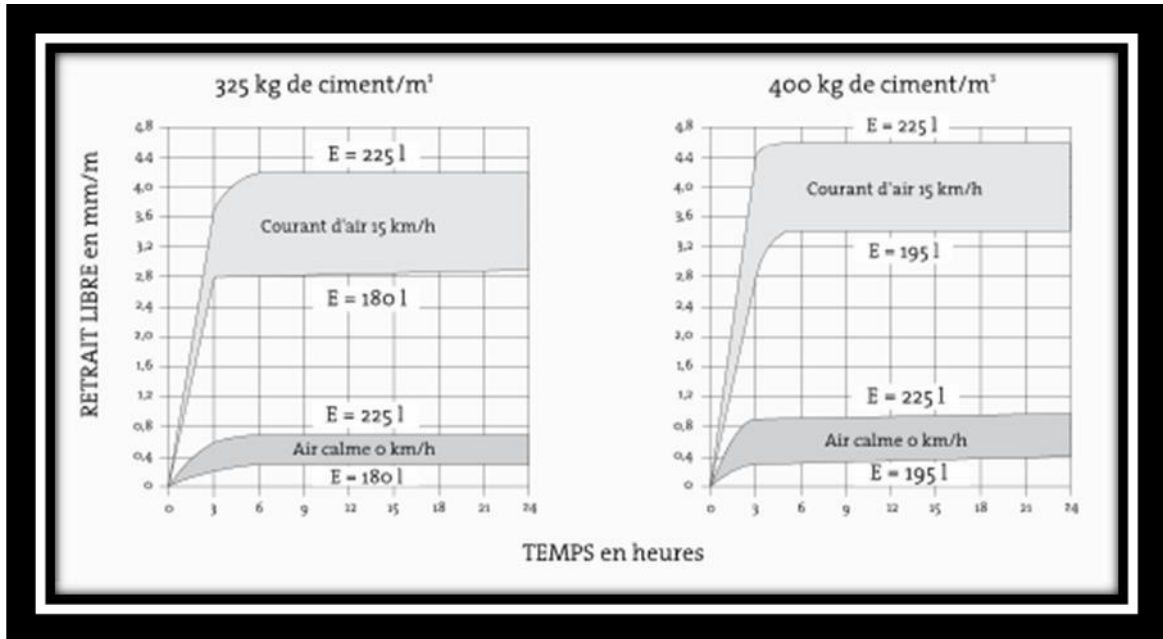
L'importance du retrait dans les structures en béton armé est essentiellement rattachée à la fissuration. La contraction ou l'accourcissement d'une pièce provoque des tensions internes qui tendent s'opposer au changement de dimension. Cette opposition au changement de dimension

est due à des obstacles internes tels que les agrégats, les armatures et le retrait non uniforme dans l'élément de béton (plus important près des surfaces que vers l'intérieur où il peut être négatif, c'est à dire gonflement). Les contraintes de traction qui résultent de ces obstacles et de ces gradients de déformation peuvent atteindre la résistance du béton à la traction et donc causent la fissuration du béton.

Le retrait en phase plastique du béton résulte d'un séchage rapide du mélange non encore durci, principalement en surface, sous l'effet du vent ou de l'ensoleillement ou encore sous l'effet de succion d'une couche inférieure sèche. La différence de température entre l'air et le béton joue également un rôle important :

il est évident que le retrait dessiccation provoque une diminution de volume considérable (0,2 à 5 mm/m : retrait libre – voir fig. II 03.01) plastique n'est pas uniquement à craindre en période de forte chaleur mais aussi en hiver. Cette pouvant être jusqu'à 10 fois supérieure au retrait du béton en phase de durcissement (retrait hydraulique). [13]

fig. III.1– Retraits plastiques libres développés sous courants d'air de vitesse variable. Il s'agit dans ces diagrammes de retraits libres mesurés sur de petites éprouvettes. Dans la pratique, il y a lieu de considérer non les valeurs absolues mais les rapports entre valeurs figurant sur ces diagrammes. En effet, il ne faut pas s'imaginer qu'une dalle de béton soumise à un vent de 15 km/h se fissurera au point que la somme des ouvertures des fissures réparties sur 1m donnera 4 mm ! Par friction sur son coffrage, par fluage plastique, le béton frais s'adaptera plus ou moins à son nouveau volume mais le risque de fissuration et/ ou l'ouverture des fissures seront accrus dans les proportions relevées sur ces diagrammes [13]



La fig. III.1 (fissures D et E) démontre clairement que surtout les bétons durcissant à l'extérieur doivent être protégés contre le retrait plastique mais attention, les revêtements de sols intérieurs peuvent également être exposés au vent (courant d'air !). [16]

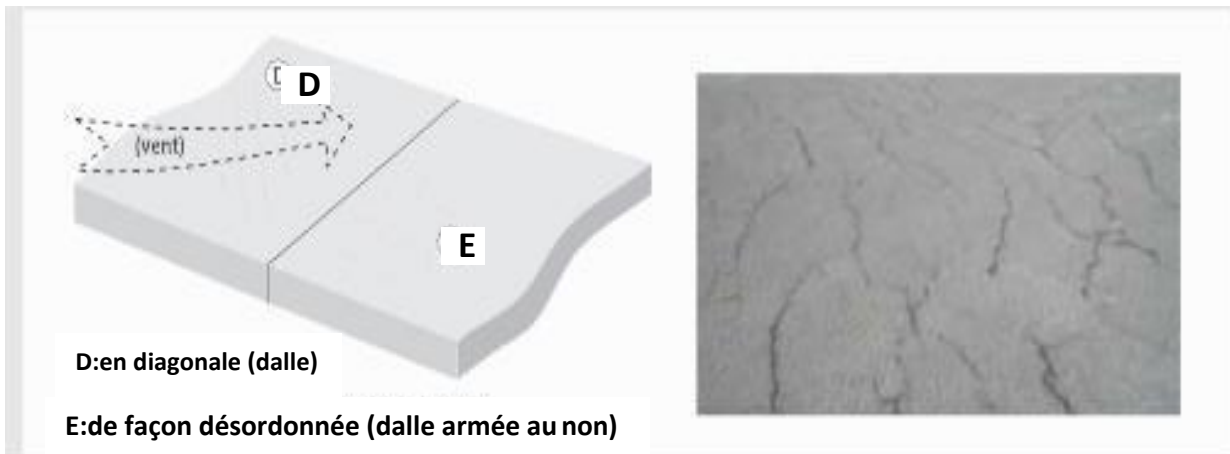


Fig. III.2 -Fissures dues au retrait plastique[16]

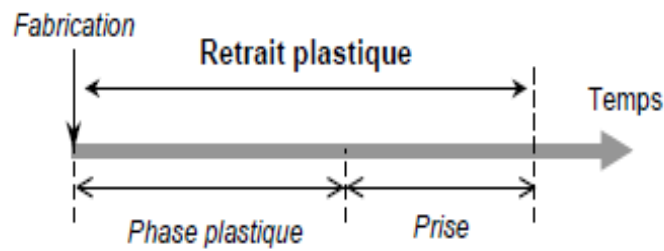


Fig. III.3: Définition de retrait plastique [5]

La fissuration due au retrait plastique est la manifestation visible d'une dessiccation prématurée du béton. Les effets non visibles sont bien plus graves encore pour la qualité du béton. En effet, un défaut de protection contre la dessiccation entraîne :

- une surface de moins bonne qualité résistant mal à l'abrasion (poudroisement de surface, farinage)
- une porosité plus forte du béton de peau et donc une réduction des performances du béton (e.a. moins bonne résistance au gel en présence de sels de dévers glaçage).

Les fissures, chemins privilégiés de pénétration des agents agressifs, non seulement diminuent la capacité d'une structure à supporter la charge admissible, mais elles peuvent aussi affecter sa durabilité et nuire à sa bonne apparence. La conception d'ouvrage durable passe donc nécessairement par une maîtrise des déformations libres, et de leurs éventuels effets mécaniques.

La fissuration peut être évitée seulement si la contrainte induite par la déformation due au retrait libre, diminuée par le fluage, demeure à tout moment inférieure à la résistance en traction du béton. Ainsi, l'âge a un double effet d'une part, il conduit à augmenter la résistance du béton, ce qui a pour effet de réduire le risque de fissuration, mais, d'autre part, le module d'élasticité augmente aussi de sorte que la contrainte induite par un retrait donné devient plus importante. Un béton suffisamment mûri subit moins de retrait. [13]

Les fissures de retrait plastique se produisent à la surface du béton peu de temps après sa mise en place ou lorsqu'il est encore plastique. Elles sont plutôt discontinues et ne s'étendent pas forcément d'un bord à l'autre de la surface exposée, parallèles les unes aux autres et perpendiculaires à la direction du vent.

Des fissures de ce type conservent leur forme originale une fois que le béton durci. On peut voir apparaître ce phénomène chaque fois que :

- Le béton est trop chaud.
- La température extérieure est trop chaude.
- La surface du béton est exposée à un vent sec et au soleil chaud.

Si la vitesse d'évaporation de l'eau présente dans le béton est trop grande avant que l'on ne commence à mûrir le béton normalement, la surface de béton peut se dessécher suffisamment pour faire apparaître des fissures de retrait.

Donc, plus on ajoute d'eau dans le béton lors de la mise en place, plus le volume d'évaporation de l'eau sera élevé, ce qui en résulte une augmentation des fissures de retrait.

Le retrait dû au séchage étant une propriété inévitable du béton, on se sert de joints de retrait pour éviter la formation de fissures inesthétiques.

Les joints de retrait n'empêchent pas la formation de fissures de retrait, mais ils les contrôlent. Ainsi l'utilisation d'armatures à section plus faible, réparties uniformément sur l'élément, permet d'augmenter l'extensibilité du béton donc son comportement à la traction et d'avoir une fissuration plus fine.

Les fissures causées par le retrait plastique apparaissent surtout sur les surfaces horizontales et peuvent être largement éliminées en prenant certaines précautions, elles peuvent apparaître en n'importe quel temps chaque fois que la surface du béton se dessèche très rapidement par évaporation. De telles fissures apparaissent lorsque l'eau de surface s'évapore plus rapidement que celle qui monte à la surface durant le processus naturel de ressuage. Ceci a pour effet de créer très vite un retrait dû au séchage et des contraintes de tension en surface qui entraînent l'apparition de petites fissures irrégulière.

III-2.2 Le retrait endogène :

Le béton étant soumis à différentes conditions lors de son hydratation, d'autres formes de retrait peuvent se manifester. Lorsque le béton a un faible rapport E/C et qu'il est sous condition scellé (aucun apport d'eau), un retrait additionnel (retrait endogène) se manifeste. Les recherches concernant le retrait endogène sont très récentes étant donné qu'on s'intéresse à ce type de retrait que depuis l'arrivée des bétons à haute performance (BHP). Afin de bien comprendre pourquoi le retrait endogène est plus important pour les bétons ayant un faible rapport E/C, il faut définir le retrait endogène ainsi qu'identifier les mécanismes impliqués.

Le premier à observer le retrait endogène est Lynam, qui en 1934, lui a donné la définition suivante : retrait qui n'est pas causé par des causes thermiques, par des contraintes externes ou par la perte d'humidité dans l'environnement. Depuis ce temps, plusieurs chercheurs ont étudié le retrait endogène afin d'obtenir une définition plus complète. Le retrait endogène est maintenant défini comme la diminution de volume apparent du béton lorsqu'il est sous condition scellée et en régime isotherme (sans variation de température). Le retrait endogène peut également être appelé retrait externe. [13]

Auto-dessiccation :

Lorsque le béton est sous condition scellée, aucun apport d'eau de l'extérieur n'est possible. Le phénomène d'auto-dessiccation est une conséquence directe de la contraction.

Le Chatelier et il est principalement responsable du retrait endogène. Lors de l'hydratation du ciment, il y a création de vides. Sous conditions scellées, il y a ainsi une diminution de l'humidité relative à l'intérieur des pores du béton et d'importantes tensions capillaires sont induites. Cette perte d'humidité relative est définie comme l'auto-dessiccation. Comme dans le cas d'un séchage de l'eau vers l'extérieur, il en résulte une contraction du béton que l'on appelle le retrait endogène.

Dans le cas où le béton est sous condition non scellée et qu'une source d'eau externe est disponible, le mécanisme d'auto-dessiccation ne se produit pas. Lorsqu'il est possible à l'eau de pénétrer la porosité de toute la masse de béton, les vides qui sont créés lors de l'hydratation du ciment sont comblés par l'eau externe. Il n'y a donc pas de tensions capillaires qui se créent et le retrait endogène est évité.

Le retrait endogène trouve son origine dans une auto-dessiccation c'est-à-dire une consommation interne de l'eau lors de l'hydratation du ciment. En effet, tout élément en béton, qui n'est pas immergé sous eau, a tendance à se rétracter au cours du temps, même s'il est isolé du milieu extérieur afin d'éviter sa dessiccation.

Les hypothèses pour expliquer ce retrait sont les suivantes :

- le volume des hydrates formés est plus petit que le volume initial d'eau et de ciment ; ce phénomène porte le nom de contraction Le Chatelier : il s'agit du retrait chimique ;
- dès le début de la prise, cette diminution de volume n'est plus libre, elle est gênée par le squelette minéral naissant. Or, l'hydratation du ciment progresse. Il en résulte un phénomène physico-chimique couplé à des effets capillaires dus à la consommation de l'eau des pores.

Pendant les premières heures de l'hydratation du ciment (depuis le contact eau-ciment jusqu'au début de prise), les effets capillaires sont considérés comme négligeables. Au cours de cette phase, le retrait endogène correspond majoritairement à du retrait chimique.

Le retrait endogène est faible mais peut être non négligeable lorsqu'il s'ajoute aux autres formes de retrait. De plus, si ce retrait est empêché ou même simplement gêné dès le début de la prise (support rigide continu, reprise de bétonnage), il constitue souvent une composante non négligeable de la fissuration précoce.

La cinétique d'évolution du retrait endogène suit assez fidèlement celle de l'évolution des résistances mécaniques : très rapide dans les premiers jours, son avancement est de 80 à 90 % à 28 jours. Ce retrait peut en général être considéré comme uniforme dans le volume de la pièce, du moins à l'intérieur d'une zone correspondant à une même opération de bétonnage, car les gradients d'humidité au sein de la structure sont relativement faibles en raison de la faible perméabilité du béton. [13]

- **Mécanismes du retrait endogène :**

Pendant l'évolution d'hydratation ils découlent de la dessiccation le retrait endogène et le retrait exogène c'est-à-dire suite à une diminution de la pression de vapeur d'eau d'équilibre qui provoque les mêmes effets mécaniques. Le retrait endogène peut être expliqué par trois mécanismes :

- a) variation de la dépression capillaire,
- b) variation de la tension superficielle et
- c) variation de la pression de disjonction.[5]

III.2.3 Retrait thermique:

Le retrait c'est un phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise du ciment, on peut l'assimiler à l'effet d'un abaissement de température entraînant un raccourcissement. On a indiqué au chapitre I § 4.1.8 les valeurs moyennes en mm/m que nous rappelons ci-après: [6]

- En France on peut prendre en moyenne: $\frac{\Delta l}{l} = 2 \times 10^{-4}$ à 3×10^{-4} suivant les régions.
- Dans les régions très humides: $\frac{\Delta l}{l} = 1,5 \times 10^{-4}$ à 2×10^{-4}
- Dans les régions très sèches (Sahara): $\frac{\Delta l}{l} = 5 \times 10^{-4}$ [6]

La réaction d'hydratation peut devenir fortement exothermique et provoquer de forts gradients de température. Du fait de l'exothermie, la température s'élève par rapport à la température initiale et durant le refroidissement, le béton subit un retrait thermique.

En cas de déformations libres, ces gradients engendrent des fissures de peau, par contre lorsque les déformations sont empêchées des contraintes de traction accompagnent le refroidissement d'où le risque d'apparition de fissures traversantes si celles-ci dépassent la résistance à la traction du matériau. La majorité des contraintes développées au jeune âge sont liées aux effets thermiques [13]

III.2.4 Le retrait de dessiccation: [13]

Est lié au séchage qui se manifeste avant, pendant et après la prise du béton. Dans des conditions courantes, il est de l'ordre de 1 mm/m. La fissuration qui en résulte est due à la dépression capillaire qui se produit lorsque des ménisques d'eau se forment dans les pores capillaires du béton frais. Ce retrait, qui est donc consécutif à l'évaporation de l'eau, peut se manifester quelques minutes après la mise en œuvre du béton, et se poursuivre quelques semaines après. Il est piloté

par la cinétique de dessiccation. L'eau qui s'évapore d'un béton conservé dans de l'air non saturé provoque du retrait, dit de séchage. Une partie de ce mouvement est irréversible et doit être distinguée de celui réversible dû à une conservation où alternant des conditions de séchage et d'humidité.

On indique les valeurs moyennes de retrait en mm/m ci-après:

- dans les régions très humides " $L/L=1.5 \times 10^{-4}$ à 2×10^{-4} .
- dans les régions très sèches (Sahara) " $L/L=5 \times 10^{-4}$.

III.2.5 Le retrait de carbonatation: [13]

En outre, la réaction de la pâte de ciment hydraté avec le gaz carbonique de l'air en présence d'humidité cause une contraction que l'on appelle le retrait de carbonatation.

Quand certaines de ces formes, ou toutes ces formes de retrait se développent dans un béton Simultanément ou séquentiellement, on parle alors de retrait total.

III.3-Mesure de retrait :

La mesure du retrait sur béton n'est pas normalisée. On peut accéder aux déformations de retrait sur des éprouvettes en béton.

Le retrait mesuré sur béton est plus faible que celui mesuré sur mortier normal pour deux raisons principal:

- le volume de pâte dans un béton est généralement beaucoup plus faible que dans un mortier : De l'ordre de 30% pour un béton contre plus de 40% pour le mortier normal. Or c'est la pâte qui se rétracte et non le squelette granulaire qui, au contraire, s'oppose au retrait.

-D'autre part, par définition, les dimensions des granulats d'un béton sont plus importantes que celles du sable utilisé dans un mortier. Or ce sont les plus gros grains du granulat qui sont déterminants dans la limitation du retrait. Plus le granulat n'est gros et mieux il limite les effets du retrait comme le schématise la (figure III.4).

-Rapport gravier / sable (G/S) :

Le rapport (G/S) correspond à celui des volumes absolus du gravier sur sable.

La coupure entre sable et gravier se fait au tamis de module 38(5mm).

Pour G/S 2.2 (valeurs les plus courantes) l'influence de G/S est faible. Mais, la résistance augmente sensiblement pour des valeurs élevées de G/S surtout pour les bétons fermes. Le tableau présente une récapitulation des qualités principales des bétons en fonction de leurs G/S.

La tendance actuelle est de ne pas dépasser des valeurs de G/S entre 1.5 à 1.6 ; c'est un léger sacrifice de la résistance au profit de l'ouvrabilité.

Concernant l'influence sur le retrait du béton, l'ouvrage montre que l'utilisation de gros granulats diminue le retrait comme ce qui est indiqué sur la figure suivant : [5]

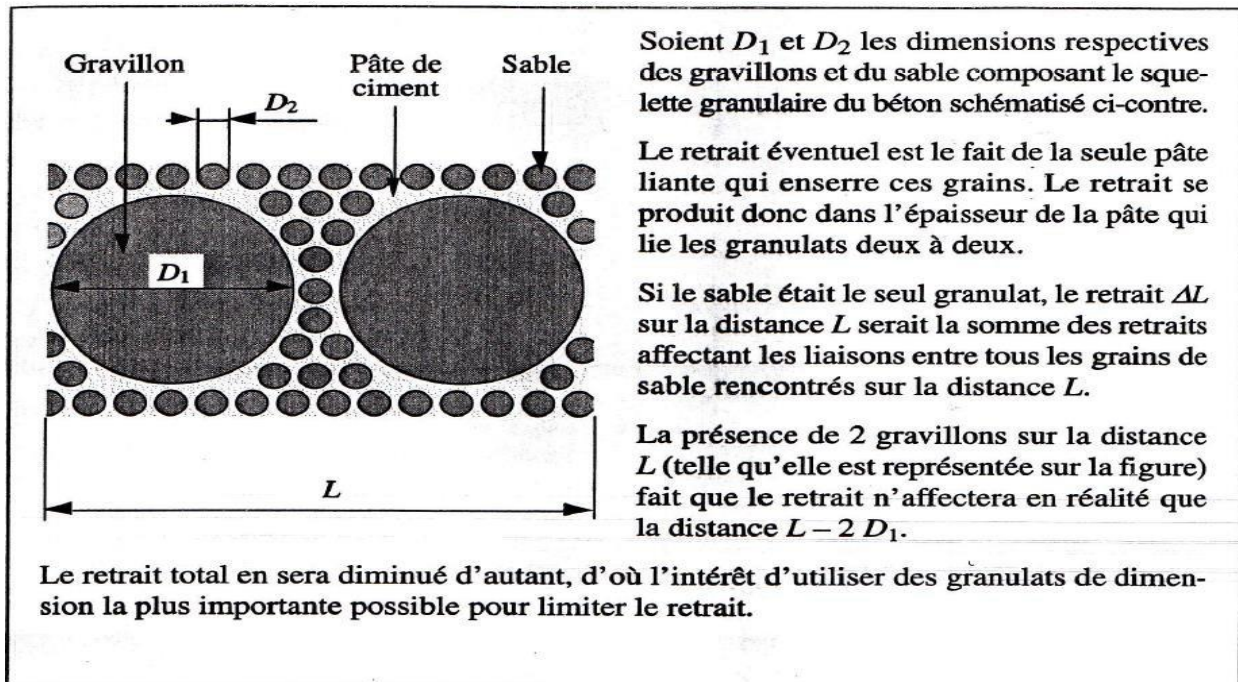


Fig.III.4. Influence de la dimension de granulat sur le retrait[5]

Pour limiter le retrait, il conviendra donc de limiter le volume de pâte et d'utiliser les granulats les plus gros possible, compatibles avec le ferrailage et le coffrage auquel le béton est destiné. [5]

D'autre part, les dimensions des pièces en béton sont beaucoup plus importantes que celles des éprouvettes mortier normal ce qui modifie la cinétique du retrait exogène; on sait que le séchage d'un élément est d'autant plus long que son rayon moyen h_0 , est important; le retrait du au départ d'eau en sera donc d'autant plus ralenti. La figure II.8 montre l'évolution du retrait moyen de 5 éléments pour prendre en compte le rayon moyen du moule h_0 . De ces courbes il ressort que la vitesse du retrait est considérablement influencée par la distance que l'eau doit parcourir pour atteindre les bords libres de l'élément.[5]

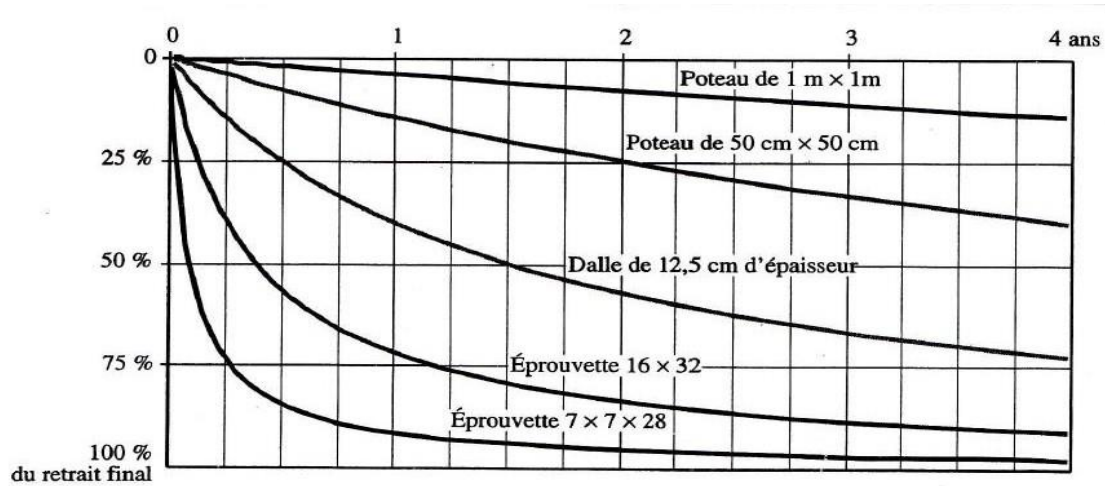


Figure III.5: évolution du retrait en fonction du rayon moyen des éléments considérés [5]

Dans ces conditions parler de retrait moyen masque la réalité du phénomène de retrait qui n'est pas homogène à l'intérieur d'un même élément : plus rapide sur les bords qui sèchent plus vite qu'au cœur qui, dans les pièces très massives, peut mettre siècle avant d'être asséché.

Ce retrait différentiel conduit généralement à une fissuration des zones superficielles dont le retrait différentiel conduit généralement à une fissuration des zones superficielles dont le retrait est empêché par le cœur qui connaît de moindres variations dimensionnelles.

Une fissuration de ce type (indiquée sur la figure III.6) ne dure que le temps (plus ou moins long suivant la dimension de la pièce) nécessaire pour que l'hygrométrie du cœur se rapproche de celle de sa peau: ces fissures tendent à refermer avec l'âge. Mais le retrait du cœur restera inférieur à celui de la peau, car le départ d'eau du cœur se produit après celui qu'a connu la peau, donc à un moment où les qualités mécaniques du matériau sont supérieures et sa déformabilité moindre.

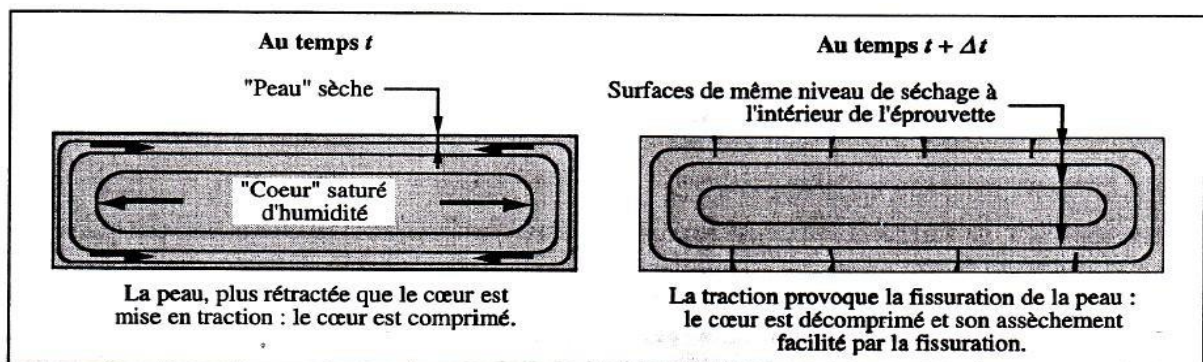


Figure III.6: fissuration superficielle provoquée par le retrait différentiel [5]

III.4 Les conséquences du retrait :

Dans tous les cas, la conséquence essentielle du retrait est l'apparition de phénomènes de fissuration pouvant diminuer la durabilité des structures en béton armé ou précontraint, et/ou limiter leur capacité portante, notamment dans le cas de manifestation dans la masse. Cette fissuration peut conduire à limiter l'adhérence entre un matériau rapporté en surface (revêtement par exemple) et le support en béton.

Les conséquences de la fissuration sur la durabilité des structures en béton sont dues à l'augmentation de la cinétique de pénétration des agents agressifs présents dans le milieu environnant, au travers des fissures ouvertes sur les parements. Ainsi l'impact que peut avoir une fissuration ouverte de surface sur un voile en béton armé affecté par un phénomène de retrait plastique. En dehors de la fissure, la profondeur de carbonatation, liée à la diffusion du CO₂ atmosphérique dans le béton, est limitée à quelques millimètres sur les deux faces, et aucun désordre n'est observé. En revanche, le phénomène de carbonatation est accéléré le long des fissures traversantes, entraînant ainsi la corrosion des armatures recoupées par les fissures.

III.5 Contrôler le retrait :

Dans la mesure où la fissuration de retrait est due à des mécanismes différents en fonction du type de retrait, les mesures préventives à considérer sont différentes. Il convient donc, en premier, d'identifier le ou les types de retraits susceptibles de se manifester pour un ouvrage donné. La limitation des effets liés au retrait de ressuage peut être obtenue en optimisant la formulation des bétons, en terme de dosages en ciment, de dosage en éléments fins et de dimension maximale des granulats, ainsi qu'en maîtrisant la quantité d'eau de gâchage afin de limiter le ressuage. Dans cette optique, l'utilisation d'adjuvants réducteurs d'eau, ainsi qu'une étude soignée des plans de ferrailage et de la géométrie des pièces, constituent des solutions préventives indispensables.

La prévention des effets liés au retrait plastique est obtenue en limitant la dessiccation du béton, c'est-à-dire l'évaporation de l'eau avant et pendant le durcissement. Dans cette optique, la mise en place d'une cure du béton, dans le cas où les risques d'évaporation sont optimaux (températures ambiantes élevées, vent), permet de réduire la dessiccation. Les procédés de cure peuvent correspondre à une humidification régulière du parement, à la mise en place d'une feuille de polyane, ou encore à l'utilisation de produits de cure. La maîtrise de l'humidité des granulats et des coffrages, l'utilisation de fibres, ainsi que l'utilisation de quantités d'eau de gâchage peu

élevées (emploi d'adjuvants réducteurs d'eau) permettent aussi de réduire la fissuration associée au retrait plastique.

La limitation des effets liés au retrait thermique peut être obtenue en utilisant des ciments à faible chaleur d'hydratation, tels que définis par la norme NF EN 197-3. Une protection de la surface des parements afin de limiter les risques de dessiccation accentués par l'élévation de la température de la masse du béton, constitue une mesure préventive complémentaire efficace.

Enfin, la fissuration due au retrait d'auto-dessiccation peut être limitée en prenant en compte, dans le calcul, les contraintes engendrées, et en les maîtrisant par l'ajout d'armatures passives ou de précontrainte. [13]

Lorsqu'une fissuration de retrait est avérée sur un ouvrage, il est essentiel de vérifier que le phénomène est stabilisé, sous peine de réaliser des réparations peu durables. La réparation des désordres liés au retrait, lorsqu'elle est possible, correspond à un colmatage des fissures à l'aide de produits spécifiques dont certains peuvent présenter une élasticité permettant de reprendre, dans une certaine mesure, les déformations liées à la poursuite du phénomène s'il n'est pas complètement stabilisé. [13]

III.6 Relation entre le retrait et le fluage :

Étant donné que le retrait et le fluage de dessiccation se produisent toujours simultanément, ces deux phénomènes ne sont pas totalement indépendants l'un de l'autre. Plusieurs théories ont été avancées afin d'expliquer le lien existant entre ceux-ci. Selon Kovler [1995], il est probable que le même processus soit en partie responsable pour les deux phénomènes.[5]

III.8-Les causes du retrait et leur Remèdes :

Cause et constatations	Remèdes
Le retrait avant prise est causé par l'évaporation d'une partie d'eau que contient le béton se trouve étiré dans sa masse	Il s'agit de s'opposer au départ brutal de l'eau par : -la protection contre la dessiccation -l'utilisation d'adjuvants ou de produits de cure
Après la prise il se produit : Le retrait thermique du au retour du béton à la température ambiant après dissipation de la chaleur de prise du ciment on constate une lingère diminution de longueur	Il faut éviter de surdoser en ciment, les ciments de type 20 accusent moins de retrait que ceux de type 30 de durcissement plus rapide
Le retrait hydraulique est dû à une diminution de volume résultant de l'hydratation et du durcissement de la pâte de ciment. le retrait croit avec la finesse de ciment et le dosage	Le béton aura d'autant moins de retrait qu'il sera plus compact ; ce qui dépend de la répartition granulaire, car un excès d'éléments fins favorise le retrait ainsi que les impuretés (argiles, limons)

Tableau III. 1:Les causes principales de retrait avec les remèdes favorable [5]

III.9 Conclusion:

Lorsque l'on comprend bien la nature des différents types de retrait qui peuvent se développer dans un béton et le mécanisme de leur développement dans diverses circonstances, on peut planifier la mise en application de mesures adéquates pour minimiser les conséquences néfastes du retrait. Par le passé, quand les bétons avaient des rapports eau/ciment élevés, les conséquences d'un mauvais mûrissement n'étaient pas trop catastrophiques, sauf dans des cas extrêmes. Cependant, avec l'utilisation croissante des bétons à hautes performances, qui peuvent être très rapidement (en moins de 24 h) le siège d'un phénomène de retrait endogène très sérieux, il est absolument essentiel de contrôler le retrait global du béton par un traitement à l'eau adéquat.

Conclusion générale

Dans le premier chapitre, du mémoire nous avons présenté une description générale du matériau béton pour donner une idée sur la complexité du béton et sa forte hétérogénéité qui est due à ses caractéristiques intrinsèques, et précisément les phénomènes influant sur le béton qui engendrent une détérioration plus ou moins progressive et caractéristique de l'acier.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de l'endommagement et ses paramètres essentiels comme la contrainte effective et le variable d'endommagement, autre on fait une synthèse sur les critères et les phénomènes qui influent et créer ce phénomène d'endommagement comme la Fissuration et la rupture....., et les modes présentant les différents cas d'endommagement,

En fin, Ajoutons d'après notre recherche bibliographique que le phénomène du retrait, avec l'endommagement fait l'objet des plusieurs recherches récentes.

Références bibliographique

Références bibliographique

- ◆ [1] **Mr. HAMMAR Rabah:** (Etude de la réponse des éléments bidimensionnels en béton armé sous l'action des charges monotones en tenant compte de l'effet d'engrènement et de la densité du maillage) UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI OUZOU 2010/2011.
- ◆ [2] http://www.gramme.be/unite9/beton/Documents/1_Composition_du_beton.pdf
- ◆ [3] https://ena.etsmtl.ca/pluginfile.php/125475/mod_resource/content/1/Cours-B%C3%A9tonETS.pdf
- ◆ [4] **F. Hafidi, F. Safouni, F. Fardji,** « Endommagement des structures en béton armé dû au retrait par temps chaud ». Mémoire de licence, Université Africain d'ADRAR ,2013.
- ◆ [5] **M-Biga Et F-Safouni** « influence des dimensions des granulats sur le retrait du béton» Mémoire de master II, Université Africain d'ADRAR ,2015
- ◆ [6] **Jean Festa et Georges Dreux** « nouveau guide du béton et de ses constituants »
- ◆ [7] **H.RENAUD** constructeur-batiment-technologie-tome-1-h-design
- ◆ [8] **M.Foudou** « Le bétonnage par temps chaud » Mémoire de master II, Université Africain d'ADRAR ,2015.
- ◆ [9] **Mr M. Victor Alfonso Munoz Cuartas** . « identification de mécanismes d'endommagement de stratifiés carbone-époxyde par couplage de l'émission acoustique et de la thermographie infrarouge » **Université De toulouse**
- ◆ [10] **Mr Tran The Truyen** . « Contribution à l'étude du comportement mécanique et hydromécanique du béton » **Université De Liege.**
- ◆ [11] **Mr Rahmani Abdallah Yacine** . « CONTRIBUTION A LA MODELISATION DE LA FISSURATION DANS LES STRUCTURES EN BETON PAR LA METHODE X-FEM » Mémoire pour l'obtention du diplôme de magistère » **Université Abou Bakr Belkaid- Tlemcen**
- ◆ [12]:**M.Boulal, S.Barouki et I.Moukadem,** "Endommagement de béton comparaison entre deux modèles" ,Mémoire de fin d'étude licence, Université Africain d'Adrar 2012.
- ◆ [13]http://www.ifsttar.fr/collections/BLPCpdfs/blpc_215_41-51.pdf
- ◆ [14]: **Tran The Truyen** « Contribution à l'étude du comportement mécanique et hydromécanique du béton» Université de liege 2009
- ◆ [15]: **Omar Chaallal,** "structures en béton armé" , Presses de l'université du québec,2009; p 3-9
- ◆ [16] **Technologie** , « limiter la fissuration :condition indispensable à la durabilité des bétons»