



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



Mémoire

MASTER II ACADEMIQUE

Domaine : Sciences Appliquées

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Maintenance industrielle

Présenté par:

BEDJERA Adel

TLILI Mohamed Kamel

Thème

**ETUDE PAR ELEMENTS FINIS DE LA PROPAGATION
D'UNE FISSURE DANS UNE PLAQUE EN POLYETHYLENE**

Soutenu le : 17/06/2021

Devant le jury composé de :

- | | | |
|---|-----|-----------------------|
| - Président Mr.boukhatem mourad | MCA | Université de Ouargla |
| - Examineur Mr.mebarki abdelyamine | MCB | Université de Ouargla |
| - Encadreur Mr.Bennouna Mohammed Salah | MCA | Université de Ouargla |

Année universitaire : 2020 - 2021



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciements

*En premier temps, je remercie dieu
Allah tout puissant de m'avoir accordé le
Courage pour accomplir ce modeste
travail*

*je remercie mon Rapporteur Docteur
benouna mohammed salah qui m'a proposé ce
sujet et qui m'a bien guidé tout le long
de ce travail.*

*Enfin je remercie tous les enseignants
du département de génie mécanique de
l'université de kasdi merbah de ouargla*





Dédicaces



Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut... Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, L'amour, le respect, la reconnaissance...

Aussi, c'est tout simplement

À MES CHERS PARENTS

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

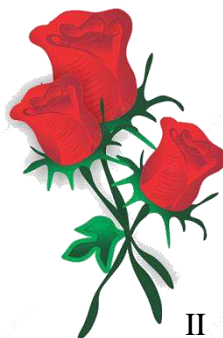
Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.

Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorde santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive

A MES CHERS ET ADORABLES FRERES ET SOEURS.

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

BEDJERA Adel





Dédicaces

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut... Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, L'amour, le respect, la reconnaissance...

Aussi, c'est tout simplement

À MES CHERS PARENTS

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.

Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorde santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

A MES CHERS ET ADORABLES FRERES ET SOEURS

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

TLILI Mohamed Kamel

Liste des figures

Liste des Figures

CHAPITRE I :Généralité sur le polyéthylène

Figure I.1 : Formule développée de l'éthylène[1].....	5
Figure I.2 : Molécule de polyéthylène [1]	6
Figure I.3 : Procédé de fabrication de polyéthylène [2].....	6
Figure I.4 : Formule semi développée du polyéthylène [2].	7
Figure I.5: Structure d'un catalyseur de type Ziegler Natta [3].....	8
Figure I.6: Procédé Basse Pression : catalyse de Ziegler Natta [3].....	8
Figure I.7: Mécanisme de polymérisation par catalyse Ziegler Natta.....	9
Figure I.8: Granulés de PEHD [2].	9
Figure I.9: Granulés de PEBD [2].	10
Figure I.10: Différentes formes de polyéthylène [5].....	11
Figure I.11 : PEHD mise en forme : tube pour distribution d'eau [9]	14
Figure I.12 : Image microscopique de PEHD recyclé [2].	15
Figure I.13: Schéma de cycle de vie de produits et de déchets	15
Figure I.14 : Logos du recyclage signalent le type de plastique [9].	16

Chapitre II :Éléments de Mécanique de la rupture

Figure (II-1): les trois modes de rupture [03].....	24
Figure (II-2): défaut elliptique dans une plaque infinie. [02- 03]	25
Figure (II-3) : Modèle d'Irwin [03].	27
Figure(II-4) : Modèle de Dugdale-Barenblatt [03].....	28
Figure(II-5) : Fissure chargée en mode I par une paire de forces F appliquée sur les lèvres a la distance x du centre de la fissure [03].....	28

chapitre III : Etude de la propagation d'une fissure par la méthode des éléments finis dans une plaque en PE

Fig. III.1. Courbe contrainte déformation de polyéthylène	34
Fig.III.2. géométrie de la plaque.....	34
Fig. III.3. Conditions aux limites.	35
Fig. III.4. Maillage utilisé.....	36
Fig. III.5. Résultats de la simulation pour une fissure de	37
Plaque fissurée avant déformation Plaque fissurée après déformation	37
Fig. III.6. Valeur de K1.....	37
Fig. III.7. Valeur de K2.....	38

Liste des figures

Fig. III.8. Valeur de K3.....	38
Fig. III.9. Valeur de K4.....	39
Fig. III. 10. Evolution du FIC en fonction de l'inclinaison de la fissure	40
Fig. III.11. Conditions aux limites	40
Fig. III.12Maillage utilisé.....	41
Fig. III.13. Résultats de la simulation.....	41
Fig. III. 14 Evolution d'énergie en fonction de la longueur de fissure.....	42
Fig. III. 15 Evolution de la force en fonction de la longueur de fissure.....	42
Fig. III. 16 Evolution du stress en fonction de la distance du chemin	43

Liste des tableaux

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Valeurs de MRS et S pour différentes matières de PE	11
Tableau I.2: Prescription sur la matière de base (PEHD)	13
Tableau (II-1)[03]	20
Tableau (II-2)[03].....	21
Tableau (II-3): Valeur critique et seuil de K.....	30
Tableau III.1 caractéristiques du matériau étudié.....	33
Tableau III.2 différentes valeurs de KI déterminées par éléments finis	39

Abréviations

a : Longueur de fissure (mm)
 E : Module d' Young (MGP)
 E_0 : Module d' Young initial(MGP)
 ν : Coefficient de poisson
 d : Section endommagée
 F : Le potentiel des dissipations
 S : Les modules de souplesse
 G : L'énergie de Griffith
 G_c : L'énergie de Griffith critique
 ε : Déformation plastique
 Y : Force thermodynamique
 Y_i : Force thermodynamique interne
 Φ : Energie de Gibbs
 T : Température($^{\circ}C$)
MRS :Minimum Requièrè Streng
 σ : Contrainte appliquée (MGP)
 σ_E : La limite d'élasticité du matériau (MGP)
 σ_R : Contrainte à rupture
KI : La ténacité en mode I(MGP)
 K_{Ic} : La ténacité critique (MGP)
 K_{Ic} : La ténacité critique en mode I (MGP)
F.I.C : Facteur d'intensité de contrainte(MGP)
CAE: Complete Abacus environment
CTOD: Crack tip opening displacement
MLR : Mécanique linéaire de la rupture
FEM : Méthode des éléments finis
X-FEM : Méthode des éléments finis étendue
 $N_i(x)$: Fonctions d'interpolations
 Ω_e : Domaine éléments
 N_{α} : La fonction de forme vectorielle
 H_p : La hauteur (mm)
 $b = W_p$: La largeur (mm)

Résumé :

La modélisation des structures fracturées avec l'éléments finis standard est limitée en termes de propagation des fissures. Le travail proposé dans le cadre de cette thèse consiste en une présentation de progression suivie d'une application numérique de la méthode FEM et FEM-X. Pour étudier ces fissures se produisant au niveau de ces plaques, nous avons pris un exemple comme montre dans la thèse et nous avons mène une démarche d'analyse de la fissure propagée par un programme appelé abacos , ou il s'agit Dun programme utilise par l'ordinateur et c'est un programme sophistique qui étudie la changement de l'état physique de divers corps solides et analyse la propagation des fissures sur la surface et a effectué un processus pour analyser la propagation de la fissure. Démontrer l'efficacité de FEM et FEM-X .Nous avons obtenu un ensemble de résultats, partant de la convergence relative de la valeur du facteur d'intensité de contrainte à l'effet de la force sur la déformation de cette pièce..

Mots clés : Éléments finis MEF ,Éléments finis Entendus XFEM ,Fissuration.

Abstract:

The modeling of fractured structures with the standard finites elements is limited in terms of crack propagation. The proposed work in the context of this thesis consists of a progression presentation followed by a numerical application of the FEM and FEM-X method. To study these cracks occurring at the level of these plates, we took an example as shown in the thesis, and we carried out an analyze process of the crack propagated py a program called abacus where it is of a program used py the computer and it is a sophisticated program that studies the change in the physical state of various solids paddies and analyzes the propagation of cracks on the surface . and performed a process to analyze the crack propagation. To demonstrate the effectiveness of FEM and FEM-X We have obtained a set of results , from the relative convergence of the value of the stress intensity factor to the effect of the force on the deformation of this part.

Keywords: MEF Finites Element , XFE Extend de finite Elements , Cracking

ملخص :

إن نمذجة الهياكل المشققة بواسطة العناصر المحدودة القياسية محدودة من حيث انتشار الشقوق . يتكون العمل المقترح في سياق هذه الأطروحة من عرض لتطور هته الشقوق متبوعا بتطبيق عددي لطريقة FEM وFEM-X ولدراسة

Résumé

هذه التثقیقات التي تحدث علي مستوي هذه الصفائح قمنا بأخذ مثال كما هوا موضح في الأطروحة وقمنا بإجراء عملية لتحليل انتشار التثقیق بواسطة برنامج يدعي اباكوس حيث هوا عبارة عن برنامج يستخدم بواسطة الحاسوب و هوا برنامج متطور يدرس تغير الحالة الجسمية للأجسام الصلبة وذلك من أجل إظهار فعالية طريقة FEM و FEM-X. و قمنا بتحصيل مجموعة من النتائج بداية من تقارب النسبي في قيمة عامل شدة الإجهاد إلي تأثير القوة علي تشوه هته القطعة.

الكلمات الدالة : عنصر محدد MEF , العناصر الممتدة XMEF , تكسير

Sommaire

Sommaire

Remerciements	I
Dédicaces	II
Dédicaces	III
Liste des Figures	IV
Liste des Tableaux	VI
Abréviations	VII
Résumé	VIII
Introduction Générale	1

CHAPITRE I :Généralité sur le polyéthylène

Introduction	5
I.1 Processus de fabrication du polyéthylène	5
I.1.1 Distillation	6
I.1.2 Vapocraquage	6
I.1.3 Polymérisation	7
I.1.3.1 Le procédé « haute pression »	7
I.1.3.2 Les procédés « basse pression » (procédés Ziegler Natta)	8
I.1.3.3 Procédés moyenne densité	9
I.1.4 Granulation	9
I.2 Structure et classification de polyéthylène.....	10
I.3 Propriétés du polyéthylène.....	12
I.3.1 Propriétés caractéristiques du polyéthylène	12
I.4 Les avantages et les inconvénients du polyéthylène	13
I.4.1 Les avantage.....	13
I.4.2 Les inconvénients.....	13
I.5 Utilisation	14
I.6 Recyclage et régénération de polyéthylène	14
I.6.1 Ecologique et économie du recyclage	16
I.6.2 Logos du recyclage (anneau de Möbius).....	16
Conclusion.....	16
Référence Bibliographique (chapitre I) :	17

Chapitre II :Éléments de Mécanique de la rupture

II.1.Généralités	19
------------------------	----

Sommaire

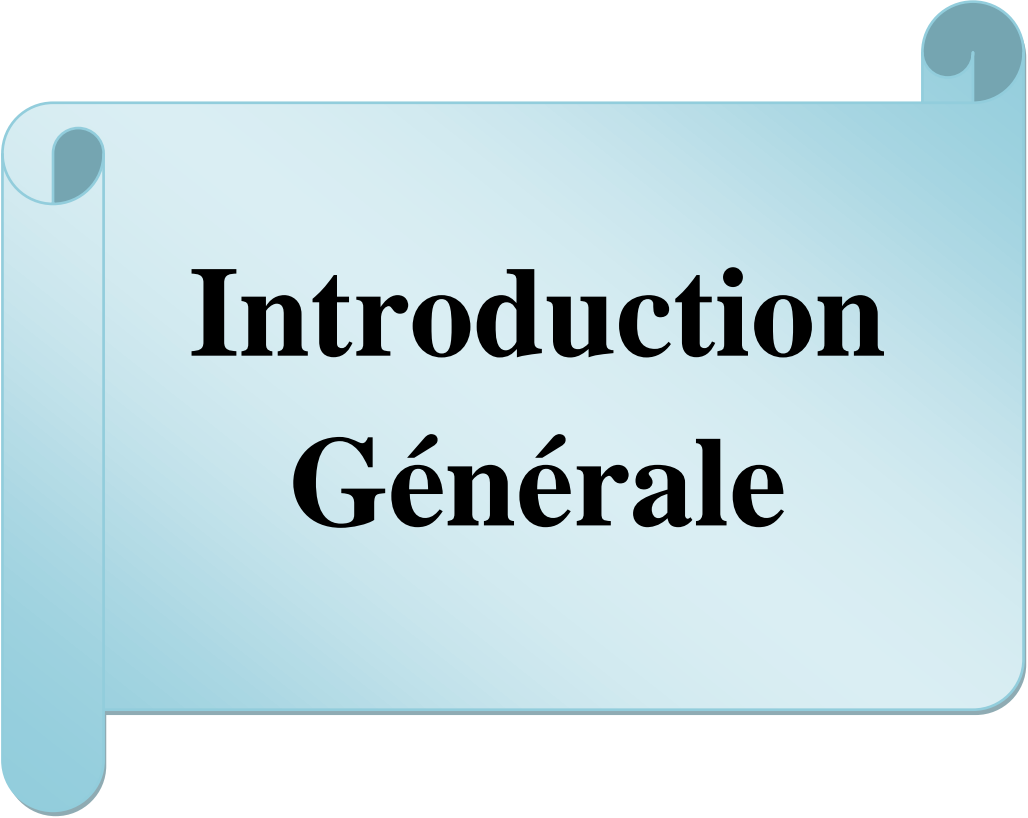
II.2. Introduction à la mécanique linéaire de la rupture	19
II.3. Notion de la mécanique de la rupture	20
II.3.1. Rappels d'élasticité plane	20
II.3.2. Notions de mécanique de la rupture en élasticité linéaire.....	21
II.3.2.1. Taux d'énergie disponible G.....	22
II.3.2.2. Facteur d'intensité des contraintes K	23
II.3.2.3. Concentration des contraintes près d'un défaut.....	25
II.3.3. Zone plastique en tête de fissure.....	26
II.3.3.1. Première approche (approche d'Irwin).....	26
II.3.3.2. Deuxième approche (approche de Dugdale-Barenblatt).....	27
Référence Bibliographique (chapitre II)	31

chapitre III : Etude de la propagation d'une fissure par la méthode des éléments finis dans une plaque en PE

Introduction	33
III.1. Matériau utilisé	33
III.2. Méthode du contour plot	35
III.2.1. Calcul manuel du facteur d'intensité de contrainte	35
III.2.2. Détermination du facteur d'intensité de contrainte (FIC) par la méthode des éléments finis	35
III.3. Cas d'une fissure horizontale située de la plaque	35
III.3.1. Condition aux limites	35
III.3.2. Maillage.....	36
III.3.3. Résultats et discussions	37
III.4. Méthode étendue XFEM	40
III.4.1. Cas d'une fissure de la plaque	40
III.4.1.1. Condition aux limites	40
III.4.1.2. Maillage.....	41
III.4.2. Résultats et discussions	41
III.4.2.1. Evolution d'énergie	42
III.4.2.2. Evolution de la force	42
III.4.2.3. LIGNES DE STRESS	43

Sommaire

Conclusion.....	43
Référence Bibliographique (chapitre III).....	44
Conclusion générale.....	46



Introduction Générale

Introduction générale

L'apparition d'une fissure peut avoir des conséquences désastreuses pour Ainsi, le comportement général des structures modifie considérablement les voies de contraintes.

Une analyse complète ne peut pas être traitée sur un modèle d'éléments finis, ce qui serait dans l'ordre Plusieurs millions d'inconnues, des calculs détaillés sont effectués dans les zones fracturées et Inclus dans un ensemble approximatif général du châssis.

En fait, selon les besoins, Un ensemble de modèles et de comptes de série. Conditions spécifiques pour les distorsions Les différentes grossesses à traiter sont prélevées à la périphérie de la zone correspondante De la forme générale et déplacez-la vers la forme la plus précise. Cette technologie de zoom structurel N'intègre pas complètement l'aspect multi-domaine causé par un site Anomalies dans la région rompue.

Malgré les progrès réalisés dans les réseaux automatiques, Opérations de ligature et de finition de la méthode classique des éléments finis (FEM Ou FEM; Méthode des éléments finis) reste une tâche ardue pour un ingénieur État de l'analyse des fissures.

Le calcul des structures avec fracturation est maintenant en place Il a été fondamentalement revisité par la méthode des éléments finis étendus (désignée par l'abréviation X- FEM. Méthode des éléments finis étendue) basée sur le concept de division d'unité [1]. à Enrichissant la cinétique du milieu continu, ces méthodes permettent d'ajouter Interruptions dans le champ de déplacement avec un nombre de degrés relativement petit Liberté.

Le principal avantage, dans ce cas, est que la grille n'a pas besoin d'être un match Pour l'ingénierie des fissures. Ces méthodes nécessitent généralement un nouveau lavage des pointes. De la fissure qui change la structure du problème à résoudre.

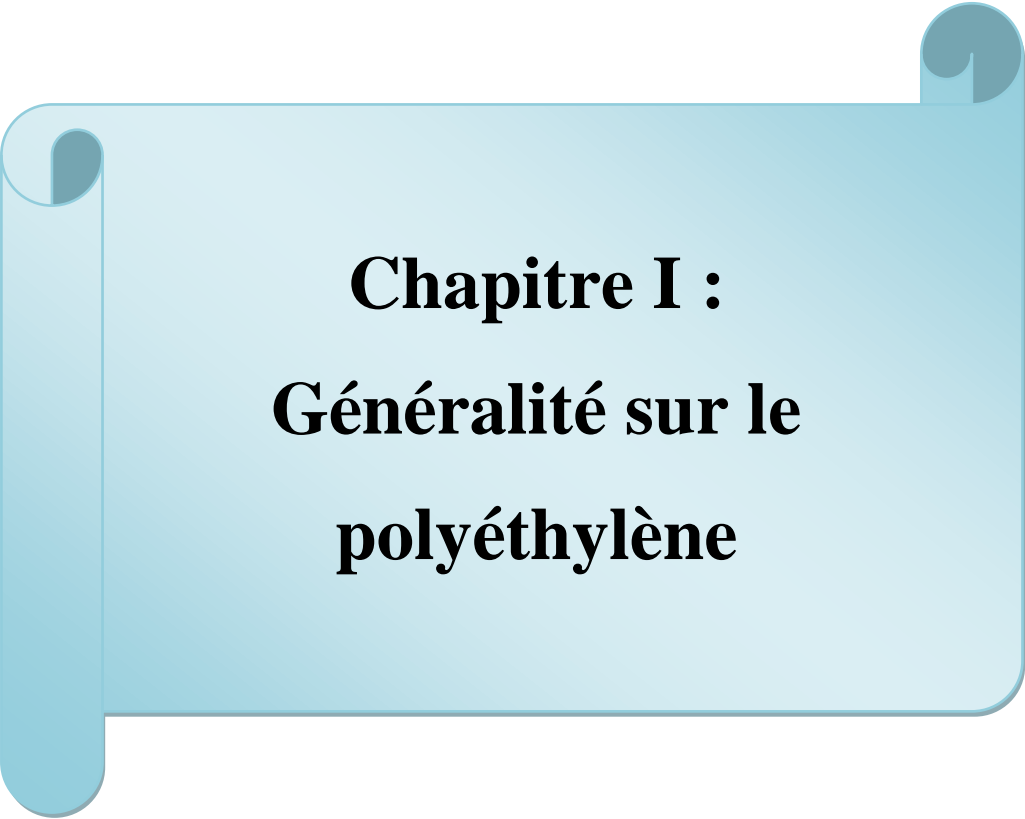
Par conséquent, les problèmes Conditionnement continu. Enfin, la méthode X-FEM nous donne l'avantage de la représentation Résolvez correctement le point de fissure unique et simplifiez considérablement les opérations Pour l'entrelacement et le reformatage de la méthode des éléments finis standard.

C'est la raison, Partant de ces avantages, on suggère de traiter cette méthode (X-FEM). Le but de ce travail Il s'agit d'une proposition de présentation pour l'analyse dans la méthode des éléments finis Extended X- FEM est basé sur une structure isotrope, en réponse au problème de l'analyse locale de Structures qui incluent des fentes et permettent d'afficher les limites d'une méthode Éléments finis standard avant X-FEM.

Introduction Générale

Ce manuscrit est organisé en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à une discussion approfondie et détaillée du matériau à étudier, qui est le polyéthylène. Le deuxième chapitre traite de la mécanique de la rupture.

Règles et lois Dans le troisième chapitre, nous présentons l'étude de la propagation des fissures par la méthode des éléments finis et présente Rapport d'une série de tests pour démontrer l'efficacité des approches X-FEM et FEM dans l'analyse.



Chapitre I :
Généralité sur le
polyéthylène

Introduction

Le polyéthylène est une matière thermoplastique du groupe polymère semi cristallin, il est issu de la polymérisation de l'éthylène (C_2H_4) gazeux (figure I.1), produit en laboratoire par déshydratation de l'alcool, ou industriellement par craquage thermique (des gaz naturels, ou des fractions d'huiles légères) [1]. Son emploi le plus fréquent est sous forme des granulats utilisés pour la fabrication des sacs plastiques, des bouteilles d'emballage et des tubes plastiques.

Il en existe de nombreux types mais ceux-ci sont généralement classés dans deux grandes familles qui se définissent en fonction de leur masse volumique :

- polyéthylènes basse densité ou PEBD : $0,92 \text{ g/cm}^3 < \rho < 0,94 \text{ g/cm}^3$.
- polyéthylènes haute densité ou PEHD : $0,95 \text{ g/cm}^3 < \rho < 0,97 \text{ g/cm}^3$.

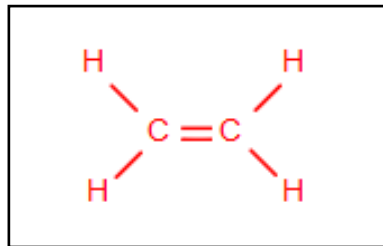


Figure I.1 : Formule développée de l'éthylène[1]

I.1 Processus de fabrication du polyéthylène

Un polyéthylène (figure I.2), est un produit provenant de la distillation d'un pétrole brut dans une colonne de fractionnement, avec du craquage en présence de vapeur d'eau, qui donne un certain nombre de produits de bas en haut de la colonne. Parmi ces produits on a l'éthylène, avec la polymérisation de ce produit on obtient le polyéthylène tel qu'illustré en figure I.3.

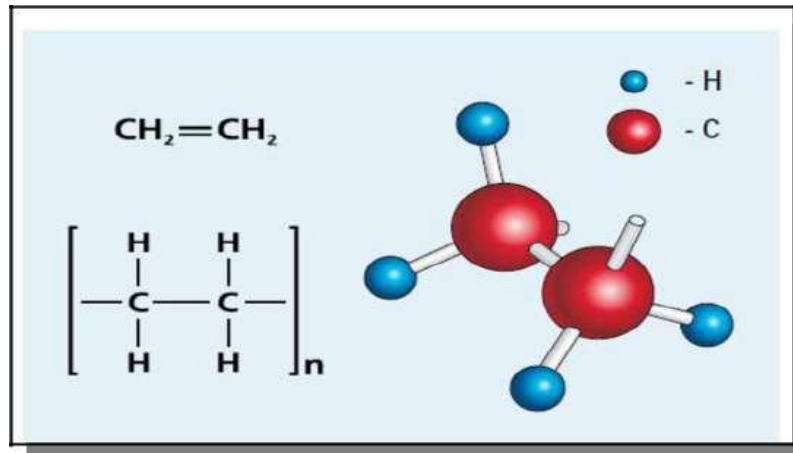


Figure I.2 : Molécule de polyéthylène [1]

I.1.1 Distillation

Le pétrole brut chauffé à 400 °C et introduit dans une colonne de fractionnement dans laquelle les produits se condensent à différents niveaux en fonction de leur densité, en bas les bitumes, en haut les gaz. La « coupe » NAPHTA qui nous intéresse se condense à 160 °C entre le kérosène et l'essence. C'est un liquide incolore [2].

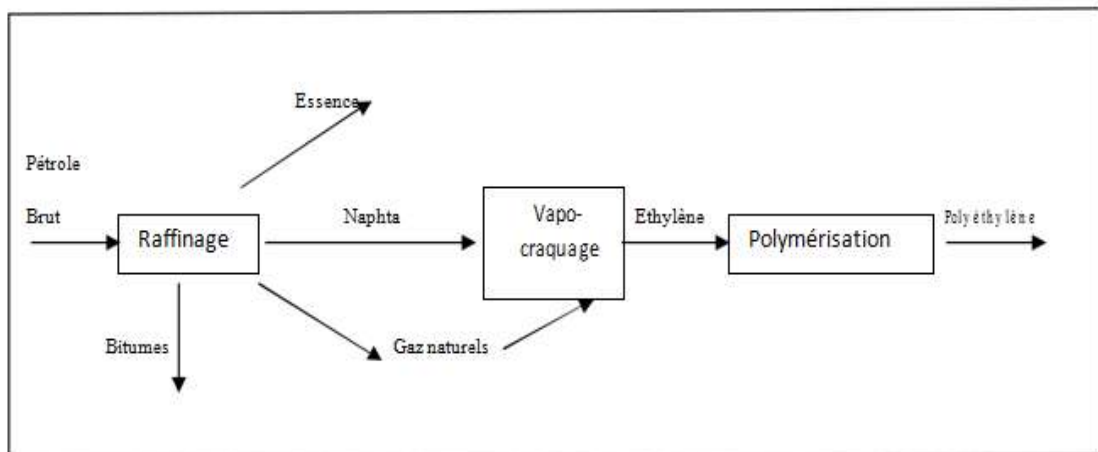


Figure I.3 : Procédé de fabrication de polyéthylène [2].

I.1.2 Vapocraquage

C'est un second fractionnement, en présence de vapeur d'eau, à 825 °C, qui donne un certain nombre de produits de bas en haut de la tour :

- Essence aromatiques (le nylon, des explosives, le tergal... etc.)
- Butadiène (base de certains caoutchoucs)
- Propylène (PPE, peinture, vernis...etc.)
- Ethylène (PVC, PE, Polystyrène) [2].

I.1.3 Polymérisation

Dans la macromolécule suivanteAAAAA AA..... = $[A]_n$ l'unité constitutive est A ; elle est formée d'un groupe d'atomes qui se répète. La plupart des macromolécules se présentent sous forme de « fils long et souples ». Les réactions chimiques permettant de passer d'un monomère A à la macromolécule $[A]_n$ s'appellent polymérisation. Ainsi, l'éthylène $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ (monomère) conduit par polymérisation par ouverture de la double liaison au polyéthylène (polymère) $[\text{CH}_2\text{CH}_2]_n$ (figure I.4). La macromolécule peut comporter jusqu'à 50 000 atomes de carbone, et pour de nombreux polymères commerciaux la masse molaire peut atteindre $1\,000\,000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

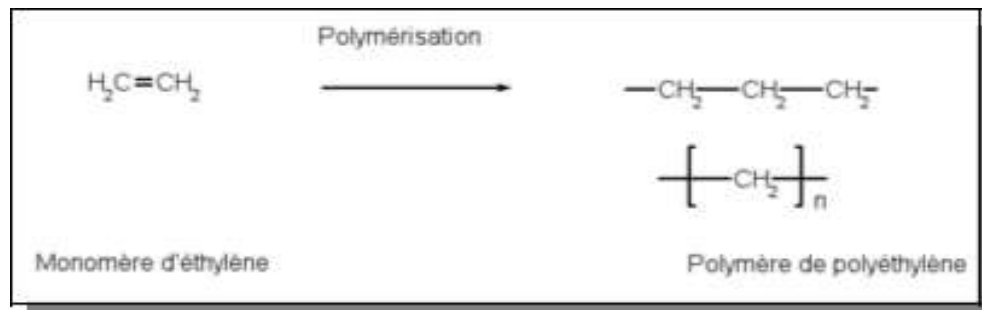


Figure I.4 : Formule semi développée du polyéthylène [2].

Des procédés entièrement différents sont utilisés pour la synthèse du polyéthylène lors de la polymérisation :

I.1.3.1 Le procédé « haute pression »

Est historiquement le plus ancien (1933), ce procédé en masse ou en émulsion nécessite de comprimer l'éthylène gazeux à plus de 1000 bars et à une température de 150 à 200 °C.

Ces procédés conduisent à un polyéthylène radicalaire comportant des ramifications difficilement cristallisables, soit linéaire, ce qui améliore la tenue mécanique, en particulier la résistance à la déchirure. Il est nommé **Polyéthylène Base Densité (PEBD)** [3].

I.1.3.2 Les procédés « basse pression » (procédés Ziegler Natta)

Un mécanisme probable est proposé en figure I.7. Il est basé sur l'utilisation de catalyseurs (l'exemple le plus typique pour la synthèse de PEHD, présenté en Figure I.5). Et nécessitent des pressions faibles de 40 à 60 bars et à température de 60 à 120 °C [4]. Ils permettent d'obtenir des chaînes macromoléculaires linéaires plus facilement cristallisables. Le PE plus cristallin que PEBD, donc plus dense, est appelé **Polyéthylène Haute Densité (PEHD)** [3].

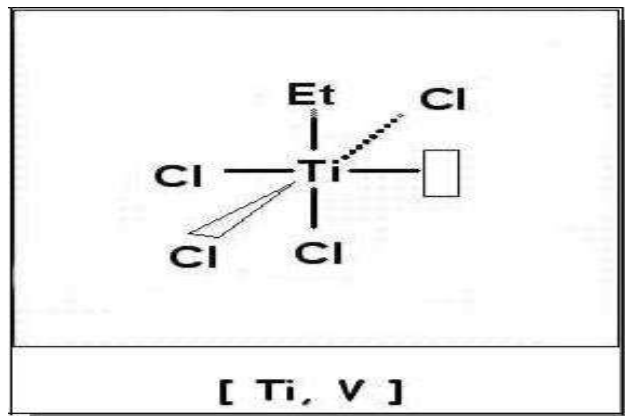


Figure I.5: Structure d'un catalyseur de type Ziegler Natta [3].

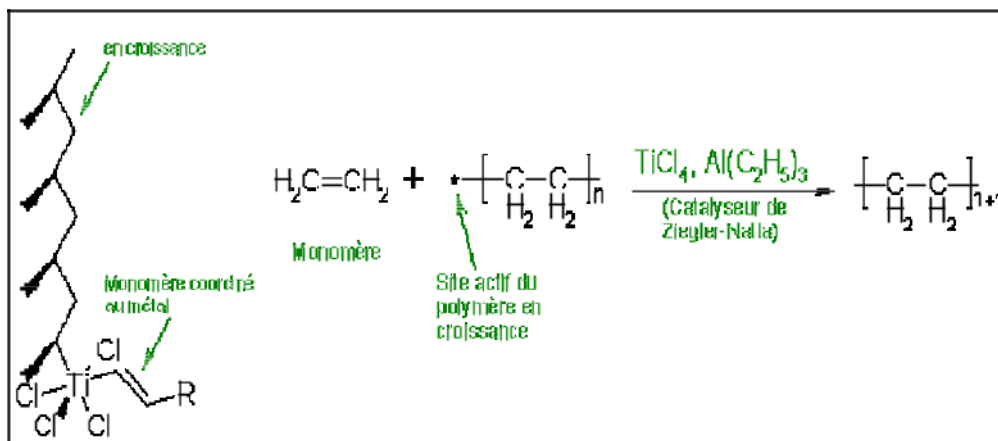


Figure I.6: Procédé Basse Pression : catalyse de Ziegler Natta [3].

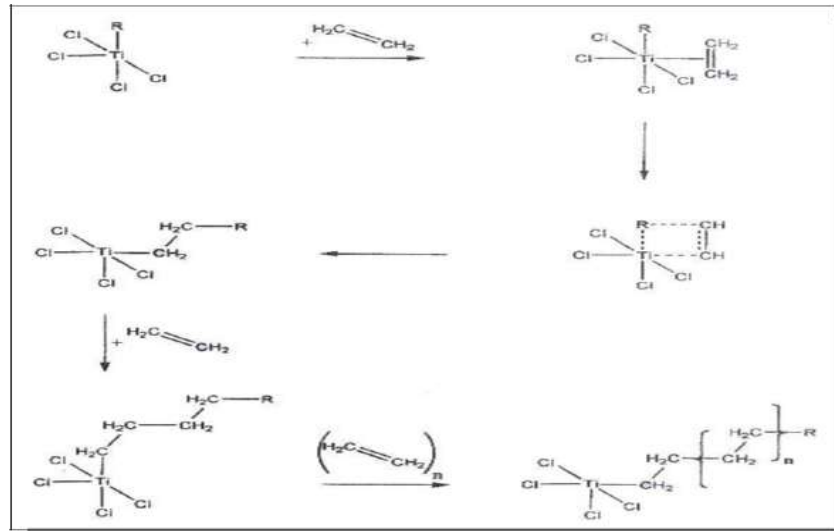


Figure I.7: Mécanisme de polymérisation par catalyse Ziegler Natta [17]

I.1.3.3 Procédés moyenne densité

Réalisé soit par mélange des deux précédents, soit par polymérisation directe [4].

I.1.4 Granulation

Cette poudre est différents produits destinés à améliorer les performances du matériau (stabilisants, plastifiants) et de colorant. Le mélange est chauffé dans une granulatrice qui fabrique les granulés. (figure I.8 et I.9) [2].



Figure I.8: Granulés de PEHD [2].



Figure I.9: Granulés de PEBD [2].

I.2 Structure et classification de polyéthylène

Les polyéthylènes peuvent être [5] :

linéaires ou branchés (ou ramifiés), classés selon :

- leur densité qui dépend du nombre et de la longueur des ramifications présentes sur les chaînes moléculaires :
 - ✓ PETBD, polyéthylène à très basse densité.
 - ✓ PEBDL, polyéthylène à base densité linéaire.
 - ✓ PEBD, polyéthylène base densité.
 - ✓ PEMD, polyéthylène moyenne densité.
 - ✓ PEHD, polyéthylène haute densité.
- leur masse molaire :
 - ✓ polyéthylène à masse molaire très basse.
 - ✓ polyéthylène à masse molaire élevée.
 - ✓ PEUHPM, polyéthylène à masse molaire très élevée.
 - ✓ réticulés : PER, polyéthylène réticulé. Presque tous les PER sont faits à partir.

De polyéthylène à haute densité (HDPE) :

- PERHD, polyéthylène réticulé à haute densité.

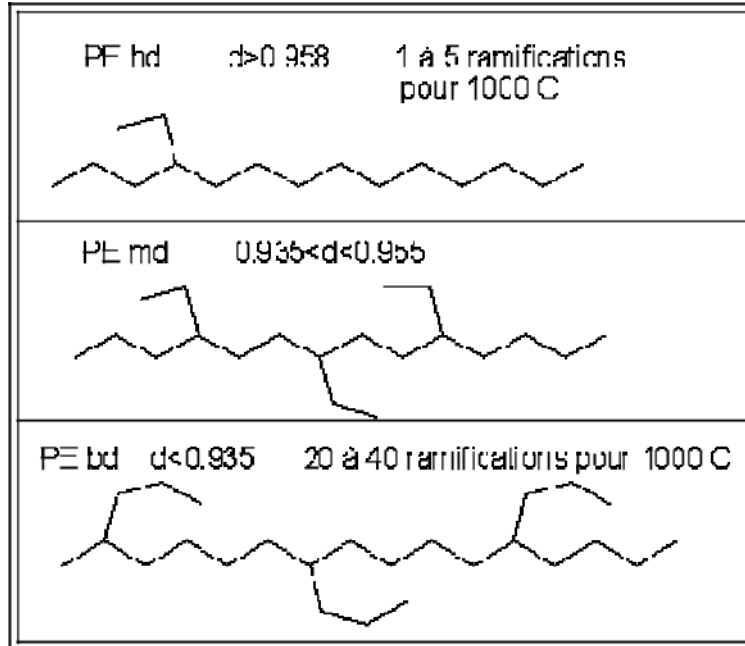


Figure I.10: Différentes formes de polyéthylène [5]

Plus de ça, les différentes gammes de polyéthylène sont classées selon leur résistance à long terme (MRS Minimum RequièreStreng) (tableau I.1).

Tableau I.1 : Valeurs de MRS et S pour différentes matières de PE [6]

Désignation de PE	Classification suivant ISO	Contrainte minimale requise MRS en MPa	Résistance hydrostatique à long terme à 20 °c S en MPa
PEHD 3ème génération	PE 100	10,0	8,0
PEHD 2ème génération	PE 80	8,0	6,3
PEHD 1ème génération	PE 63	6,3	5,0
PEBD	PE 40	4	3,2
PEBD	PE 32	3,2	2,5

Aussi, la masse molaire M d'une macromolécule est égale au produit de la masse M0 du Motif élémentaire par le degré de polymérisation DP :

$$M = M_0 \cdot DP \dots\dots\dots (I.1)$$

Lorsque l'échantillon polymère est polymoléculaire, on le caractérise par son degré de polymérisation moyen en nombre nDP , égal au rapport du nombre de motifs élémentaires au nombre total de macromolécules de toutes tailles, contenues dans cet échantillon. S'il existe I espèces de macromolécules, chacune est caractérisée par :

- son degré de polymérisation DP_i
- sa masse molaire M_0DP_i
- le nombre N_i de macromolécules qui le constituent

I.3 Propriétés du polyéthylène

Le polyéthylène est un polymère thermoplastique, translucide, chimiquement inerte (il est plus résistant aux oxydants forts que le polypropylène), facile à manier et résistant au froid.

Le PEBD est plus ramifié que le PEHD, ce qui signifie que les chaînes s'assemblent moins bien entre elles. Les forces intermoléculaires de type Van Der Waals sont donc plus faibles. Il en résulte un taux de cristallinité moindre, une plus faible densité, une malléabilité et une résistance aux chocs plus élevées. En revanche, le PEHD est plus rigide [7].

Aussi, Sa température de transition vitreuse est très basse (voisine de 110 °C) et son point de fusion peut selon les grades atteindre à 140 °C, mais sa résistance mécanique fléchit nettement dès 75 à 90 °C. Contrairement au polypropylène, la température d'utilisation ne peut excéder le point d'ébullition de l'eau. Sa nature par affinité explique sa grande inertie chimique [5].

I.3.1 Propriétés caractéristiques du polyéthylène

- Température maximale d'emploi : 105 °C
- Température de fragilisation : 50°C
- Aptitude à la microonde : oui
- Couleur : translucide ou blanc naturel
- Très bonne résistance chimique aux acides, aux alcools aliphatiques, aux aldéhydes, aux hydrocarbures aliphatiques et aromatiques
- Faible résistance aux agents oxydants
- Poly féline semi cristalline
- Bonne flexibilité
- Il est régénéré et recyclé sous forme de granulés.

Tableau I.2: Prescription sur la matière de base (PEHD)

Caractéristiques	Méthodes	Paramètre sd'essai	Unités demesure	Valeursmesur ées
densité de référence	EN ISO 1183	23 °C	kg/m ³	> 930
indice de fluidité.	EN ISO 1183	190 °C 5 kg.	g/10min	< 1,6
Résistance à la Pression				
interne 165h (64 mPa)	EN ISO 1167	80 °C	bar	Pas de défaillance
Résistance à la Pression				
interne 1.000h (62,8 mPa)	EN ISO 1167	80 °C	bar	Pas de défaillance

I.4 Les avantages et les inconvénients du polyéthylène [8]

I.4.1 Les avantage

- mise en œuvre aisée
- excellentes propriétés d'isolation électrique
- résistance aux chocs
- grande inertie chimique
- qualité alimentaire

I.4.2 Les inconvénients

- perte du caractère perméable des PE que ce soit à l'eau, mais aussi à l'air et aux hydrocarbures.
- sensibilité aux UV en présence d'oxygène
- sensibilité à la fissure sous contrainte
- mauvaise tenue à la chaleur
- collage difficile
- retrait important

I.5 Utilisation

Le polyéthylène est un polymère de synthèse très employé. Il compose notamment la moitié des emballages plastiques (films à usage alimentaire, agricole, sacs plastiques ...), et tubes plastique (figure I.11).



Figure I.11 : PEHD mise en forme : tube pour distribution d'eau [9]

Lorsque le sac se froisse facilement sous la main, avec un bruit craquant, un touché « mécanique », et revient plus ou moins spontanément à sa forme d'origine, il s'agit du PEHD (PE haute densité).

Lorsque le touché est plus « gras », que le plastique se froisse sans bruit, se perce facilement avec le doigt, il s'agit du PEBD (PE basse densité).

Les principales applications du PEHD sont des produits rigides : flacons, bouteilles, jerricans, réservoirs de carburant d'automobiles, etc.

Les principales applications du PEBD sont des produits souples : sacs, films, sachets, sacs poubelles, récipients souples, etc.

I.6 Recyclage et régénération de polyéthylène

Au cours de ces dernières années, le recyclage et la réutilisation des produits usés en PE ont pris de plus en plus d'importance. Avec sa structure chimique simple, le PE prime sur la plupart des autres matériaux grâce à son aptitude à la régénération simple (figure I.12).

En matière revalorisation (recyclage), l'industrie est constamment à la recherche de nouvelles méthodes permettant d'intégrer dans le cycle énergétique les produits usés en matière synthétique de façon aussi écologique que possible [2].



Figure I.12 : Image microscopique de PEHD recyclé [2].

Actuellement, on distingue deux types de réutilisation du PE :

Le Recyclage matériel : le PE usé est collecté par l'industrie du PE, puis transformé en granulés servant de base à la fabrication de nouveaux produits en PE.

Le recyclage thermique : il repose sur la valorisation énergétique des déchets en matière synthétique [2].

La figure I.13 est expliquée le cycle de vie d'une matière recyclé

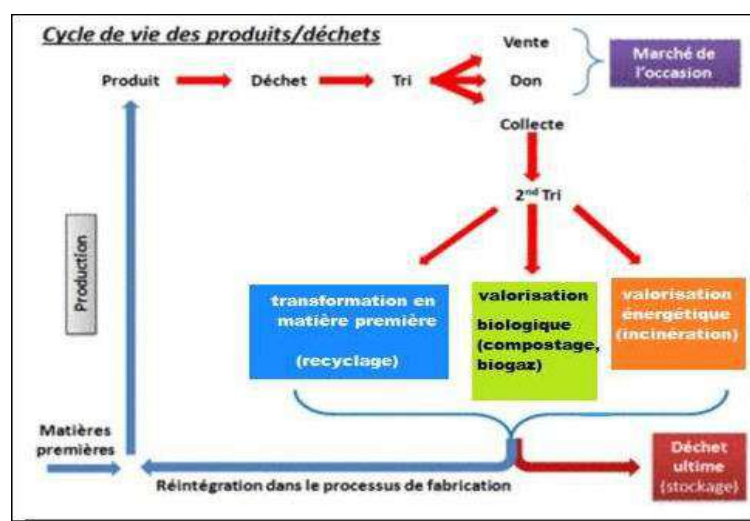


Figure I.13: Schéma de cycle de vie de produits et de déchets[9]

I.6.1 Ecologique et économie du recyclage

Le problème de l'incinération des plastiques, produits à base d'hydrocarbures fossiles, est l'émission de CO₂ et de fumées polluantes qui doivent à leur tour faire l'objet d'un retraitement.

Aussi, Une tonne de PE recyclé représente 0,61 tonne de pétrole brut et 0,2 tonne de gaz naturel et 10,96 MWh soit 2,29 tonnes d'équivalent CO₂ évitées.

Pour le PEHD, cela représente 0,51 tonne de pétrole brut et 0,31 tonne de gaz naturel et 7,98 MWh soit 1,53 tonne d'équivalent CO₂ évitée.

Au total, 21% des emballages plastiques sont recyclés [9].

I.6.2 Logos du recyclage (anneau de Möbius)

Vous avez sûrement déjà remarqué ces logos sur le recyclage, que l'on retrouve sur les emballages de vos produits. Quelle est leur signification ? (figure I.14).

Le plus important est l'anneau de « Möbius », qui symbolise un cycle sans fin de recyclage. Sa présence indique que le produit est recyclable. Parfois, un pourcentage figure en son centre, il signifie que le produit contient déjà ce pourcentage de matériaux recyclé [9].

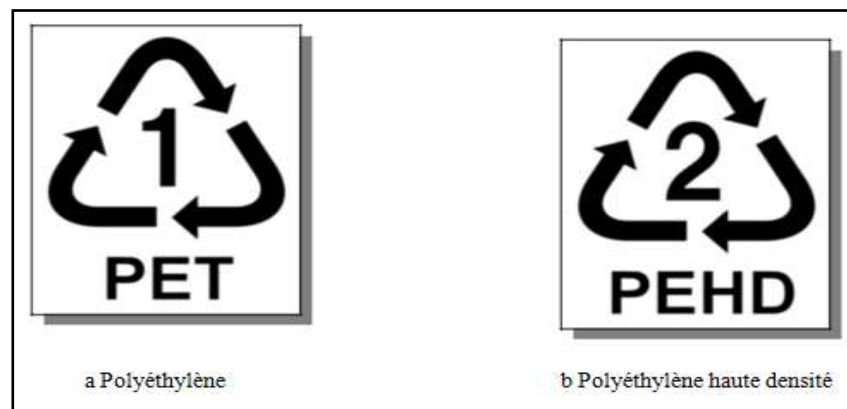


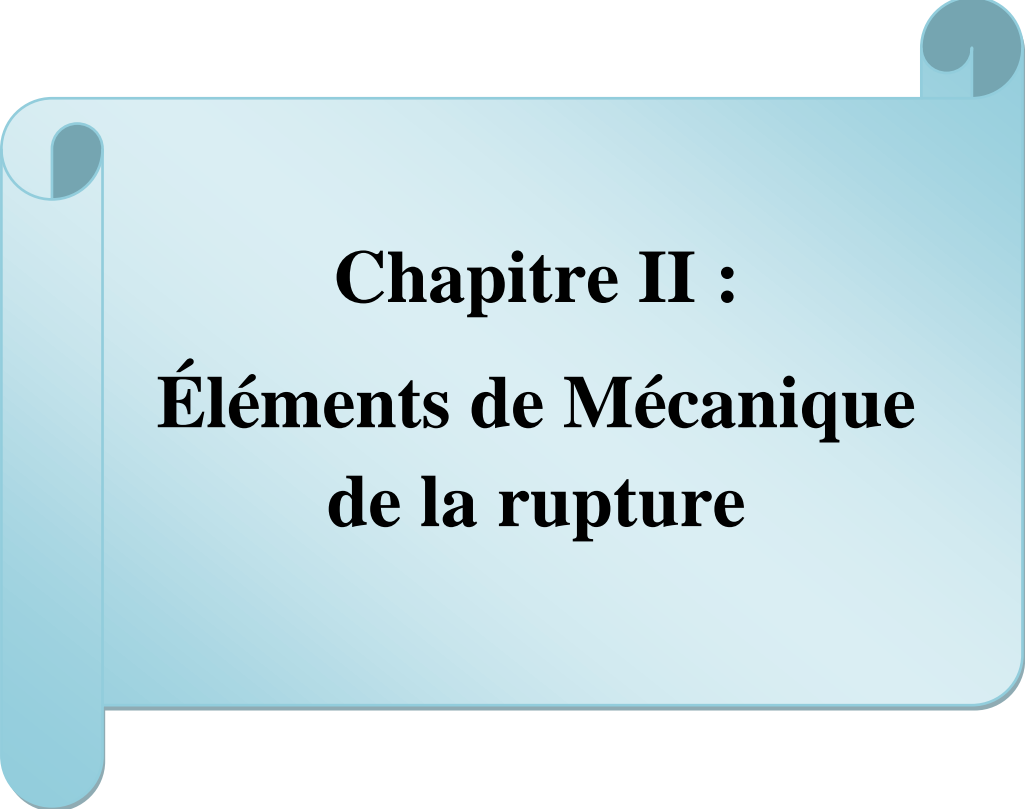
Figure I.14 : Logos du recyclage signalent le type de plastique [9].

Conclusion

Le polyéthylène est incontestablement le type de polymère le plus répandu dans l'industrie des produits plastiques pour une très grande gamme d'utilisation grâce à leurs caractéristiques. Par conséquent, il a une structure simple, ce qui en fait un très bon candidat pour le recyclage, ce qui justifie qu'on cherche l'effet de sa régénération.

Référence Bibliographique (chapitre I) :

- [1]-D.CM Miles,J.H.Briston.Technologie des polymères. Éditions Du noud, paris, 1968p.133-155
- [2]-Groupe Ali axis dos serte chmique . Usine Glyn wed. France,2010
- [3]J.P. Trotin gnon ,J. Ver du ,A. Dobra czynski, M. Piperade. «Matières plastiques: structures propriétés,miseencœuvre,normalisation».EditionNathan,paris,1996,P.13-14
- [4]-Maurice Reyne «les plastique sdansl’emballage.Polymères technologie de mise enforme recyclage».Edition Hermès, paris, 1991, P. 185.
- [5]- James. Mark , Physical Properties of Polymer Handbook, Springer,2007,2emeedution.,p.1076
- [6]-Le Groupe CHIALI , société de production des tubes plastiques, catalogue technique. Algérie 2012
- [7]-Charles E. Wilkes ,James W. Summers et Charles Anthony Daniels, PVC Hand book,Munich,HanserVerlag,2005,p.14
- [8]Nathalie Schultze,(2èmeAnnéeDUTChimie),Comparaison entre les polyéthylène saute et basse densité PEHD et PEBD, Mars 2000
- [9]Grégoire Macqueron , Recyclage et traitement des déchets .France , 26/11/2009.Page7-12



Chapitre II :
Éléments de Mécanique
de la rupture

II.1.Généralités

La séparation en deux parties disjointes d'un corps se produit à la suite de la propagation d'une fissure, qui a vu le développement de microcavités, de microfissures puis de l'amorçage, sous l'action de sollicitations mécaniques, thermiques, chimiques [01-02]. Lorsqu'un matériau est sollicité jusqu'à rupture, les essais montrent que la contrainte de rupture σ_r est une grandeur présentant de fortes fluctuations pouvant même dépasser la décade pour certains matériaux et que le mode de ruine dépend de la nature du matériau [02].

La rupture peut intervenir brutalement quasi sans déformation préalable pour les matériaux qualifiés de fragiles, tandis qu'elle n'intervient qu'après une étape de grande déformation permanente pour les matériaux qualifiés de ductiles. Nous savons maintenant que les matériaux fragiles rompent brutalement au delà d'une certaine tension, tandis que les matériaux ductiles s'écoulent plastiquement sous cisaillement avant de rompre. [01-02]

Le mode de rupture dépend par ailleurs de l'état de contrainte, en particulier de la triaxialité des contraintes (rapport du premier sur le second invariant). Un matériau qui présente beaucoup de plasticité développera en général des ruptures ductiles, mais pourra être sujet à la rupture fragile. Un matériau sans plasticité (céramiques, métaux à très basses températures, certaines résines) présentera toujours des ruptures fragiles. Donc si la plasticité est absente ou reste très confinée, les théories qui permettent de traiter le problème considèrent le matériau comme élastique partout : c'est la *mécanique linéaire de la rupture*.

II.2.Introduction à la mécanique linéaire de la rupture

La mécanique de la rupture a pour objet essentiel l'étude des fissures macroscopiques : Elle s'applique lorsqu'il existe dans le matériau des discontinuités qui viennent modifier l'état de contrainte, déformation et déplacement, si bien que l'homogénéisation du milieu n'a plus de sens [01]. Ainsi il a fallu attendre le milieu du siècle pour disposer des outils et concepts théoriques pour décrire le phénomène physique associé à la présence d'une fissure macroscopique [03].

Les notions de la mécanique linéaire de la rupture et le facteur d'intensité de contrainte sont donnés par Griffith et Irwin [03]. Les dates principales qui marquent le développement de la mécanique de la rupture sont 1920, lorsque Griffith montre que la rupture d'un milieu élastique-fragile peut être caractérisée par une variable globale, qui sera appelée plus tard le taux de restitution d'énergie, et 1956, lorsque, à partir de l'étude des singularités du champ de contrainte, Irwin introduit la notion de facteur d'intensité des contraintes.

Les années 1960-1980 sont celles de l'essor puis de la maturité de la mécanique de la rupture, avec en particulier les développements numériques et le traitement des problèmes non linéaires [01].

II.3. Notion de la mécanique de la rupture

II.3.1. Rappels d'élasticité plane

- loi de Hooke

Les équations de comportement (ou loi de Hooke) peuvent être exprimées soit en utilisant le couple des constantes élastiques (E, ν) (E = module d'Young, ν = coefficient de Poisson) soit (μ, λ), (μ = module de cisaillement et λ = coefficient de Lamé). Ces constantes sont reliées entre elles par les formules [03] :

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}$$

et $\Rightarrow \frac{\nu}{E} = \frac{\lambda}{2\mu(3\lambda+2\mu)}$ (II.1)

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad E = \mu \frac{3\lambda+2\mu}{\lambda+\mu}$$

Les deux expressions de la loi de HOOK utilisant ces deux couples de constantes sont :

$$\varepsilon = \frac{1+\nu}{E} \bar{\sigma} - \frac{\nu}{E} (\text{trace } \sigma) \bar{I} \quad \text{ou} \quad \bar{\sigma} = 2\mu\varepsilon + \frac{\lambda}{3\lambda+2\mu} (\text{trace } \bar{\sigma}) \bar{I} \quad \text{(II.2)}$$

a)– Etat de contraintes planes : ($\sigma_x = \sigma_y$ et $\sigma_z = 0$)

Ce tableau représente un ensemble de lois relatives à Etat de contraintes planes.

$\varepsilon_x = \frac{1+\nu}{E} \sigma_x - \frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y)$	$\varepsilon_x = \frac{1}{2\mu} \sigma_x - \frac{\lambda}{(3\lambda+2\mu)} (\sigma_x + \sigma_y)$
$\varepsilon_y = \frac{1+\nu}{E} \sigma_y - \frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y)$	$\varepsilon_y = \frac{1}{2\mu} \sigma_y - \frac{\lambda}{(3\lambda+2\mu)} (\sigma_x + \sigma_y)$
$\varepsilon_{xy} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{xy}$	$\varepsilon_{xy} = \frac{1+\nu}{2\mu} \sigma_{xy}$

Tableau (II-1)[03]

b) Etat de déformations planes ($\epsilon_{xy} = \epsilon_{yz}$ et $\epsilon_z = 0$)

Ce tableau représente un ensemble de lois relatives à l'état de déformations planes.

$\epsilon_x = \frac{1+U}{E} [\sigma_x - U(\sigma_x + \sigma_y)]$	$\epsilon_x = \frac{1}{2\mu} \sigma_x - \frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)} (\sigma_x + \sigma_y)$
$\epsilon_y = \frac{1+U}{E} [\sigma_y - U(\sigma_x + \sigma_y)]$	$\epsilon_y = \frac{1}{2\mu} \sigma_y - \frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)} (\sigma_x + \sigma_y)$
$\epsilon_{xy} = \frac{1+U}{E} \sigma_{xy}$	$\epsilon_{xy} = \frac{1+U}{2\mu} \sigma_{xy}$

Tableau (II-2)[03]

Remarque :

On passe des relations (II.1) à (II.2) en remplaçant λ par $\lambda^* = \frac{2\lambda\mu}{\lambda+2\mu}$ et μ inchangé,

En effet :
$$\frac{\lambda^*}{2(\lambda^*+\mu)} = \frac{\lambda}{3\lambda+2\mu} \quad (II.3)$$

On peut donc écrire la loi de HOOK pour les deux états sous la forme :

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{2\mu} \sigma_x - \frac{\lambda^*}{2(\lambda^*+\mu)} (\sigma_x + \sigma_y) \\ \epsilon_y &= \frac{1}{2\mu} \sigma_y - \frac{\lambda^*}{2(\lambda^*+\mu)} (\sigma_x + \sigma_y) \end{aligned} \quad (II.4)$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2\mu} \sigma_{xy}$$

Avec : $\lambda^* = \lambda$ en déformations planes

$$\lambda^* = \frac{2\lambda\mu}{\lambda+2\mu} \text{ en contraction planes}$$

Le passage de (II.1) à (II.2) peut aussi se faire, avec les variables E et ν , en remplaçant :

$$V \text{ par } V' = \frac{\lambda^*}{2(\lambda^*+\mu)} = \frac{\lambda}{3\lambda+2\mu} \text{ soit : } V' = \frac{V}{1+V}$$

$$E' \text{ par } E^* = \mu \frac{3\lambda^*+2\mu}{\lambda^*+\mu} \text{ soit : } E^* = \frac{E(1+2V)}{(1+V)^2} \text{ et } \frac{1+V^*}{E^*} = \frac{1+V}{E}$$

II.3.2. Notions de mécanique de la rupture en élasticité linéaire

Nous allons principalement traiter de la rupture fragile au sens macroscopique d'un matériau, c'est à dire une rupture intervenant sans plastification macroscopique notable, ce qui n'exclut pas une plastification microscopique en tête de fissure.

Le modèle de rupture fragile suppose que le matériau est homogène et isotrope à comportement élastique linéaire jusqu'à rupture [02].

II.3.2.1. Taux d'énergie disponible G

Le lien quantitatif entre la rupture et la taille de défaut a été proposé par Griffith en 1920. Le modèle de Griffith, basé sur un critère énergétique, a prédit correctement la relation entre la résistance du corps élastique - fragile et la taille du défaut. Irwin a ensuite développé cette approche énergétique en introduisant le concept de taux de restitution d'énergie G [04]. On montre que l'équilibre thermodynamique d'une structure élastique, contenant une fissure de surface A, et chargée par des forces, vis-à-vis de l'extension de cette fissure, est réalisé si ce que l'on appelle le taux d'énergie disponible G est égal à une valeur critique G^c [03]. G est défini par la formule:

$$G = \frac{dP}{dA} \quad (\text{II.5})$$

Avec P énergie potentielle totale de la structure fissurée, c'est-à-dire somme de l'énergie potentielle des forces et de l'énergie élastique emmagasinée, G^c étant l'énergie qu'il faut dépenser pour que la fissure augmente sa surface d'une unité [05].

G, qui peut s'exprimer en J/ ou en N/m, s'appelle aussi la force d'extension de fissure. Si G devient supérieur à G^c , la propagation de la fissure se produit, le supplément d'énergie se transformant en énergie cinétique [03]. On démontre que :

$$G = \frac{1}{2} F^2 \frac{\partial C}{\partial A} \quad (\text{II.6})$$

avec F : force appliquée,

C : complaisance de la structure fissurée, c'est-à-dire rapport de proportionnalité entre le déplacement provoqué par la force F et cette force F elle-même.

Une des hypothèses fondamentales de la mécanique de la rupture est que la ténacité G^c est indépendante de la géométrie et de la dimension du corps fissuré. La ténacité à la rupture mesurée sur une éprouvette de laboratoire peut être appliquée à une autre structure [04-05].

II.3.2.2. Facteur d'intensité des contraintes K

Pour étudier l'état des contraintes dans une zone proche de l'extrémité de la fissure, on considère qu'elle a un rayon de courbure nul à son extrémité et, grâce à la théorie de l'élasticité, on montre que les contraintes tendent vers l'infini quand on se rapproche de cette extrémité comme $r^{-1/2}$, r étant la distance à l'extrémité de la fissure [03]. Ce comportement est asymptotique, en ce sens que si r devient grand par rapport à la dimension de la fissure, des termes en puissance supérieure de r commencent à intervenir pour décrire le champ de contraintes [03].

La zone où domine le terme en $r^{-1/2}$ est dénommée zone de singularité élastique. Les contraintes y sont de la forme [03]

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + o(r) \quad (\text{II.7})$$

avec $f_{ij}(\theta)$: fonction de l'angle polaire par rapport à l'extrémité de la fissure, toujours la même quels que soient la fissure, la pièce et le chargement,

$o(r)$ est écrit pour rappeler qu'il existe d'autres termes qui tendent vers 0 [03].

avec K : Facteur d'intensité des contraintes.

Le facteur K rassemble à lui tout seul l'influence de la dimension de la fissure, des forces appliquées et de la géométrie de la pièce fissurée. Le succès de la mécanique de la rupture provient de ce que les conditions à l'extrémité de la fissure dépendent de ce seul et unique paramètre [03 ; 04]. Cela permet donc des comparaisons faciles entre éprouvette et structure : il

suffit que K soit le même pour que l'état des contraintes à l'extrémité soit identique.

Aumôment de la rupture, en particulier, K atteint une valeur critique K^c qui est donc toujours la même et, par conséquent, caractéristique du matériau [03- 04].

K s'exprime en $\text{N.m}^{-3/2}$ ou en $\text{Pa}\sqrt{m}$, l'unité pratique étant le $\text{MPa}\sqrt{m}$ ($1\text{MPa}\sqrt{m} = 0.91\text{ksi}\sqrt{m}$).

Le déplacement des lèvres de la fissure, lui-même fonction de K , peut être décomposé en trois composantes : parallèle au plan de la fissure et au fronda, perpendiculaire au fronda de la fissure et parallèle au front de fissure. A chacune de ces composantes correspond un mode élémentaire de rupture, le mode I pour la composante U_1 , le mode II pour la composante U_2 et le mode III pour la composante U_3 figure (II.1). Les ruptures les plus

dangereuses se font en général en mode I de sorte que la plupart des études de mécanique de la rupture ont porté sur ce mode. On affecte alors le facteur K de l'indice I.

Les facteurs $K I$, $K II$, $K III$ sont fonction de la longueur de la fissure, de la géométrie de la pièce et du chargement. Par exemple, dans une plaque de très grandes dimensions contenant une fissure de longueur $2a$ et soumise à une contrainte homogène σ :

$$KI = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (II.8)$$

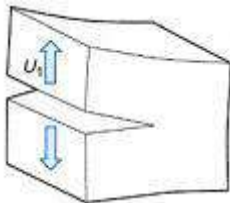
Il est toujours possible de calculer ces facteurs K par la méthode des éléments finis.

Les normes donnent les facteurs K pour les principales éprouvettes préconisées.

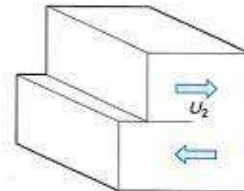
Il existe une relation entre le taux d'énergie disponible G et le facteur d'intensités de contraintes $K I$. À condition que la fissure ne dévie pas [03] :

$$E'G = KI^2 \quad (II.9)$$

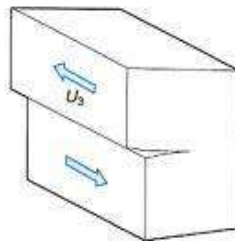
Avec $E' = E$ (module de Young) en contrainte plane, Où $E' = \frac{E}{(1-\nu^2)}$ en déformation plane (ν étant le coefficient de Poisson).



Mode I : ouverture



Mode II : glissement dans le plan



Mode III : glissement perpendiculaire au plan

Figure (II-1): les trois modes de rupture [03]

II.3.2.3. Concentration des contraintes près d'un défaut

Si on considère un défaut de forme elliptique de longueur $2a$ et de rayon à fond d'entaille ρ (figure (II.2)), la contrainte locale à l'extrémité a est [02- 03] :

$$\sigma_y = \sigma_1 + 2\frac{a}{b} = \sigma_1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (\text{II.10})$$

Dans le cas d'une entaille très aiguë, $\rho \ll a$ et on a alors :

$$\sigma_y \approx 2\sigma\sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (\text{II.11})$$

La facteur $2\sqrt{\frac{a}{\rho}}$ appelé facteur de concentration de contrainte .

Où : σ_y , σ sont respectivement la contrainte dans la direction y , la contrainte uniforme de traction appliquée dans le plan de la plaque.

a et b sont les demi-axes du trou elliptique et ρ est le rayon de courbure au sommet du trou.

Dans le cas d'une plaque de largeur infinie et comportant un trou circulaire, la relation II.11 s'écrit :

$$\sigma_y = 3\sigma \quad (KT = 3) \quad (\text{II.12})$$

Lorsque le rapport b/a tend vers zéro, le trou prend la forme d'une fissure, σ_y tend vers l'infini.

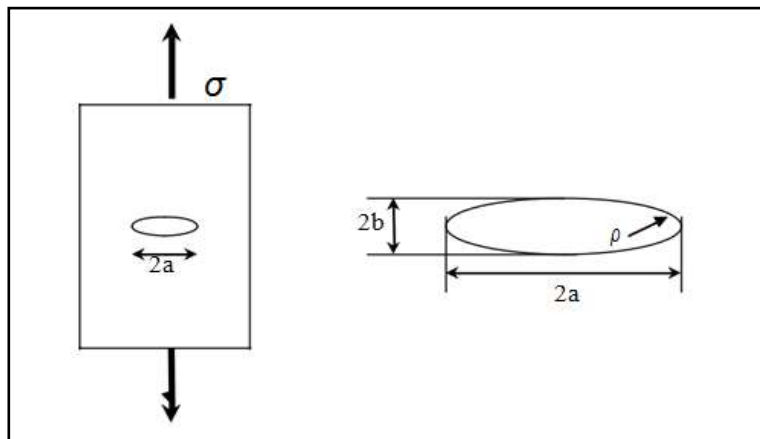


Figure (II-2): défaut elliptique dans une plaque infinie. [02- 03]

II.3.3. Zone plastique en tête de fissure

La MLR prédit des contraintes infinies à l'extrémité d'une fissure aiguë (singularité en $1/r$) [05]. Mais dans les matériaux réels, les contraintes à l'extrémité d'une fissure restent finies car le rayon à fond de fissure n'est pas nul. Ces contraintes dépassent la limite d'élasticité du matériau. la déformation plastique qui en résulte, conduit donc à une relaxation des contraintes à l'extrémité de la fissure [03].

La MLR devient progressivement imprécise à mesure que la taille de la zone plastifiée qui se forme à l'extrémité de la fissure, devient importante. Des corrections simples à la MLR sont proposées lorsque cette taille reste raisonnable. Au delà d'une certaine plastification, le FICK n'est plus adapté à la description des champs des contraintes et des déplacements à l'extrémité de la fissure.[03]

Il est important de connaître la taille de la zone plastique à fond de fissure, compte tenu des limites d'application de la MLR. Cette taille peut être estimée par deux méthodes : [02-03] L'approche d'Irwin et celle de Dugdale-Barenblatt. Les deux approches conduisent à des corrections simples du FIC.

Le terme de zone plastique est usuellement utilisé pour les métaux. On l'utilisera par la suite, dans un sens plus général, pour caractériser une zone de déformations inélastiques (métaux, polymères...) [03]

II.3.3.1. Première approche (approche d'Irwin)

Irwin suppose que la forme de la zone plastifiée de dimension r_y est circulaire. La contrainte normale étant égale à la limite d'élasticité R_e , figure (II.3) Irwin a été le premier à essayer de corriger les équations de la mécanique linéaire de la rupture pour prévoir la zone plastique au front de la fissure [03].

Si la taille de cette zone demeure assez petite, elle n'a pour effet que de décaler la distribution singulière des contraintes d'une quantité r_y appelée (correction de plasticité ou correction d'Irwin du ordre) donnée par la formule suivante [03] :

$$r = \frac{1}{\alpha \pi} \frac{K}{R} \quad (\text{II.13})$$

En contrainte plane : $\alpha = 2$

En déformation plane : $\alpha = 6$

Cette quantité r_y s'ajoute à la longueur réelle de la fissure dans le calcul du facteur d'intensité de contraintes équivalent [03].

$$K_{Ie} = \sigma \sqrt{\pi \cdot \alpha_{eff}} \quad (\text{II.14})$$

Où $a_{eff}=a+r_y$ est la longueur effective de la fissure.

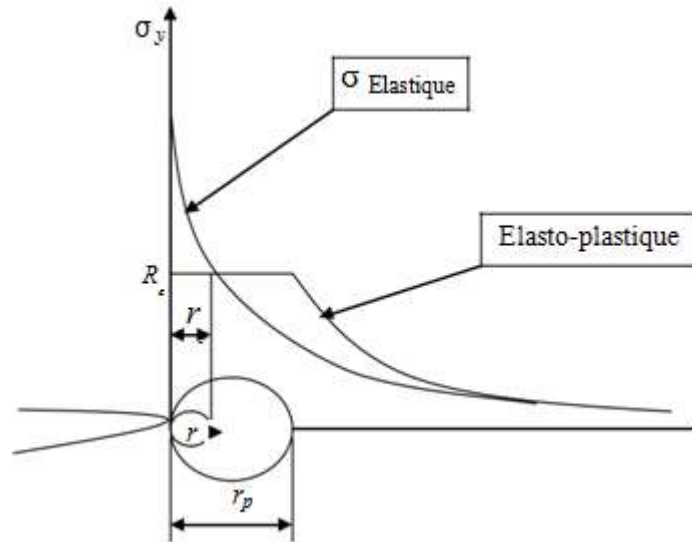
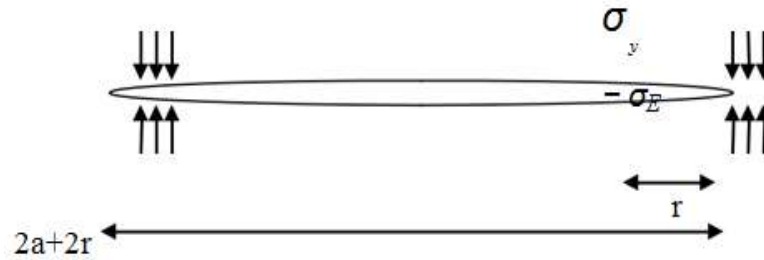


Figure (II-3) : Modèle d'Irwin [03].

II.3.3.2. Deuxième approche (approche de Dugdale-Barenblatt)

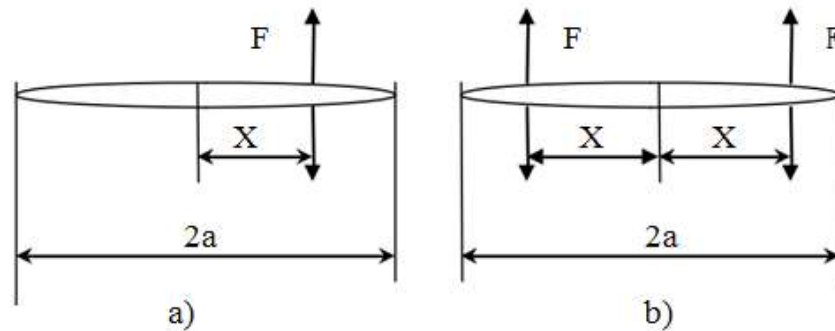
La figure (II.4) illustre le modèle du Dugdale-Barenblatt, qui considère une fissure de longueur $a + r$ avec des contraintes de compression d'intensité la limite d'élasticité σ_E , qui s'exercent sur la longueur r près de chacune des extrémités. La longueur r représente la taille de la zone plastique. Lorsqu'on charge une structure fissurée, une zone plastique se forme à l'extrémité de la fissure. Lors de la décharge, le reste de la structure qui est resté élastique, exerce alors sur la zone plastique des contraintes de compression. $-\sigma_E$ si on suppose que le comportement du matériau est élastique plastique parfait [03].

La taille r de la zone plastique est ensuite calculée dans le cas d'une fissure traversant une plaque infinie ($K_I = \sigma^\infty \sqrt{\pi(a + r)}$).



Figure(II-4) : Modèle de Dugdale-Barenblatt [03].

Pour effectuer ce calcul, Dugdale et Barenblatt utilisent la fonction de Westergaard [03] Préalablement déterminée par Irwin dans le cas du chargement indiqué sur la figure (I.5.a).



Figure(II-5) : Fissure chargée en mode I par une paire de forces F appliquée sur les lèvres a la distance x du centre de la fissure [03].

Cette fonction a pour expression dans le cas du chargement de la figure (II.5.a) où F est une force par unité d'épaisseur :

$$Z(z) = \frac{F}{\pi(z-X)} \sqrt{\frac{a^2-X^2}{z^2-a^2}} \quad (II.15)$$

On en déduit aisément la fonction de Westergaard pour le chargement de la figure (II.5.b), en remplaçant X par $-X$ et en additionnant les deux contributions, ce qui donne :

$$Z(z) = \frac{2Fz}{\pi(z^2-X^2)} \sqrt{\frac{a^2-X^2}{z^2-a^2}} \quad (\text{II.16})$$

On calcule ensuite le FIC à l'extrémité +a, identique au FIC à l'extrémité -a, soit :

$$K_I(+a) = \lim_{z \rightarrow a} 2\pi \sqrt{(z-a)Z(z)} = 2F \sqrt{\frac{a}{\pi(a^2-X^2)}} \quad (\text{II.17})$$

Dans le modèle de Dugdale-Barenblatt, on est en présence d'un chargement réparti sur la longueur ρ figure (II.4). Le calcul pour ce modèle du FIC (K_I), à partir des résultats obtenus précédemment se fait en remplaçant F par $-\sigma_E dx$ et a par $a+\rho$, et en sommant ensuite sur x variant de a à $a+\rho$, ce qui donne :

$$K_I = -2\sigma_E \sqrt{\frac{a+\rho}{\pi}} \int_a^{a+\rho} \frac{dx}{\sqrt{(a+\rho)^2-x^2}} \quad (\text{II.18})$$

Soit après intégration :

$$K_I = -2\sigma_E \sqrt{\frac{a+\rho}{\pi}} \arccos \frac{a}{a+\rho} \quad (\text{II.19})$$

Le calcul de la taille ρ de la zone plastique se fait ensuite par une application classique du principe de superposition, ce qui conduit à :

$$K_I + \sigma^\infty \sqrt{\pi(a+\rho)} = 0 \quad (\text{II.20})$$

Soit :

$$\frac{a}{a+\rho} \frac{\pi \sigma^\infty}{2\sigma_E} \quad (\text{II.21})$$

La taille ρ de la zone plastique devient très grande lorsque la contrainte appliquée σ^∞ tend vers la limite d'élasticité σ_E du matériau. A l'inverse quand cette contrainte est faible par rapport à σ_E , un développement limité simple de la relation précédente conduit à :

$$\rho = \frac{\pi K_I}{8 \sigma_E} \quad (\text{II.22})$$

Matériau	K_{Ic} (MPa $\sqrt{\text{m}}$)	ΔK_s (MPa $\sqrt{\text{m}}$)
acier haute résistance (ex : 35NCD16)	60	1 à 4
acier moyenne résistance (ex : 15MND6) ...		
... (basse température)	40	3
... (palier ductile)	200	8
alliages d'aluminium (ex : 7075)	30	1,5 à 4
alliages de titane (ex : TA6V)	80	2 à 8
composite verre-résine	7	
polyéthylène	6,5	
polystyrène	0,4	
résine époxyde	0,1	
verre	0,01	

Tableau (II-3): Valeur critique et seuil de K[01].

Référence Bibliographique (chapitre II) :

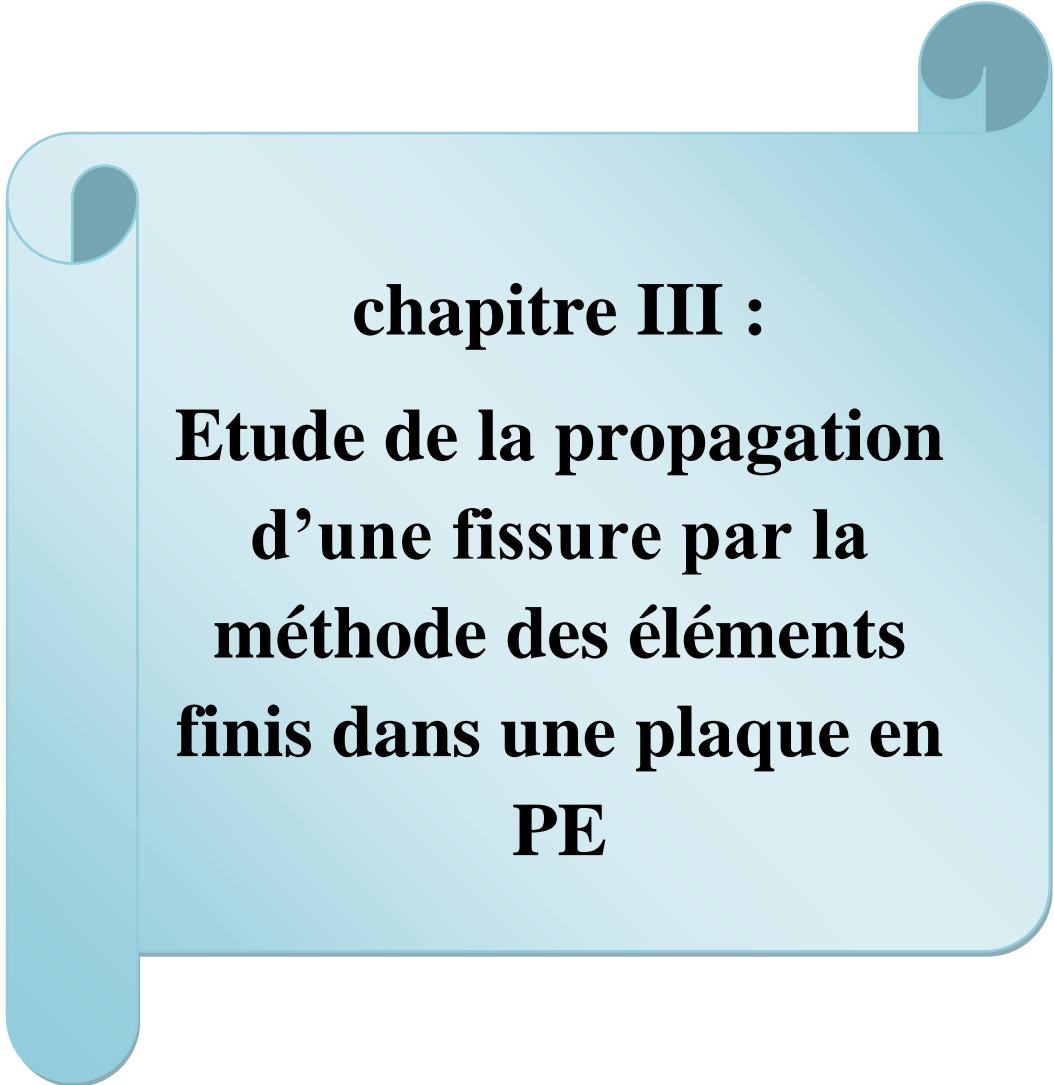
[01]- Prof. G. Caille taud « Mécanique des solide » ENS Mines de Paris

[02]- J.C. Charmet « mécanique du solide et des Materiaus- Elasticité ; Plasticité ; Rupture » ESPCI. Laboratoire d'hydrodynamique et mécanique physique : [.pmmh.espci.fr/fr/](http://pmmh.espci.fr/fr/) .

[03]- A. Guedri « Conception et simulation numérique des caractéristiques mécanique des pipelines ». Thèse Doctorat : Université Badji Mokhtar.2008.

[04]- Hai Nam Le “ Etude de la propagation d'une fissure sous chargement thermique cyclique induisant un gradient de température dans l'épaisseur” Thèse de Doctorat de l'Ecole nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique. France. 12 Mai 2009.

[05]- D.R. Moore ; A. Pavan and J.G.Williams. “Fracture Mechanics for polymers adhesives and Composites” ESSIS; Publication 28; Elsevier 2001.



chapitre III :
**Etude de la propagation
d'une fissure par la
méthode des éléments
finis dans une plaque en
PE**

Introduction

Les structures une plaque en PE sont soumis à des sollicitations qui provoquent dans la plupart des cas des fissures qui entraînent des endommagements des structures. L'étude de la propagation de ces fissures est nécessaire pour décider la possibilité, le temps et la méthode de leur réparation.

Le travail proposé dans ce chapitre consiste à un développement suivi d'une implémentation numérique de la méthode des éléments finis étendue X-FEM en vue d'un dimensionnement par la mécanique de la rupture des structures fissurées. A cet effet diverses applications seront traitées pour l'étude de la propagation de fissure. La méthode du contour plot sera aussi traitée pour le calcul du facteur d'intensité de contrainte pour FIC de fissure afin de montrer l'efficacité de cette méthode.

III.1.Matériau utilisé

Le matériau utilisé est un polyéthylène caractéristiques sont décrites dans le tableau suivant (voir Figure III.1). [1]

Tableau III.1 caractéristiques du matériau étudié

Young	coefficient de Poisson	contrainte limite	la contrainte ultime finale	l'allongement en %
E = 1100 MPa	$\mu = 0.46$	$\Sigma y = 200\text{MPa}$	$\Sigma u = 303$ MPa	$\Sigma el = 22.34\%$

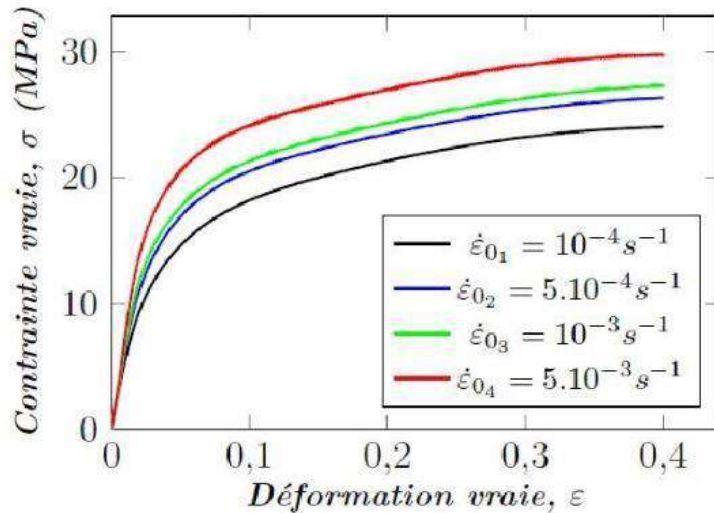


Fig. III.1. Courbe contrainte déformation de polyéthylène [2]

La plaque fissurée possède les mêmes dimensions pour tous les cas étudiés, elle a une hauteur $HP = 254$ mm, une largeur $WP = 176$ mm et une épaisseur $ép. = 2.5$ mm comportant une fissure de même longueur (80 mm) dans tous les cas d'étude pour pouvoir les comparer et ces données ont été utilisées sur la base de travaux antérieurs que nous avons utilisés pour nous donner des résultats presque précis.

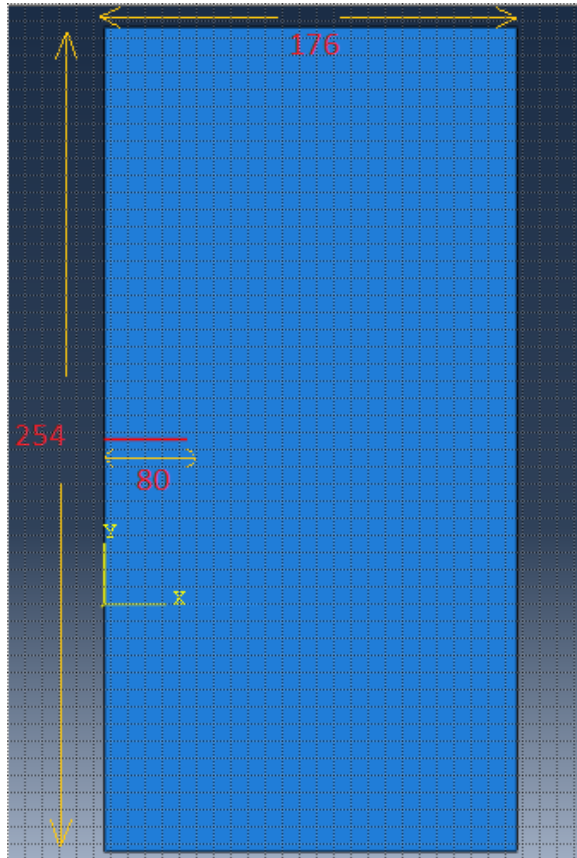


Fig.III.2. géométrie de la plaque

III.2. Méthode du contour plot

III.2.1. Calcul manuel du facteur d'intensité de contrainte

$$KI = \sigma Y \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{b}\right)$$

$$f\left(\frac{a}{b}\right) = \sqrt{1 \div \left(1 - \left(\frac{80}{254}\right)\right)} \left[1.122 \left(1 - \left(\frac{a}{b}\right)\right) - 0.06 \left(\frac{a}{b}\right)^2 + 0.728 \left(\frac{a}{b}\right)^3 \right]$$

$$f\left(\frac{10}{50}\right) = \sqrt{1 \div \left(1 - \left(\frac{80}{254}\right)\right)} \left[1.122 \left(1 - \left(\frac{80}{254}\right)\right) - 0.06 \left(\frac{80}{254}\right)^2 + 0.728 \left(\frac{80}{254}\right)^3 \right]$$

$$f\left(\frac{a}{b}\right) = 0.94986$$

$$KI = 243 \sqrt{\pi \cdot 80} \times 0.94986$$

$$KI = 3658.28 \text{ MPA} \sqrt{\text{mm}}$$

III.2.2. Détermination du facteur d'intensité de contrainte (FIC) par la méthode des éléments finis

Pour déterminer le FIC numériquement par la méthode des éléments finis nous utilisons l'outil travaillant à base d'E.F. qui Abaqus, dans cette étude nous utilisons la version 6.14. pour la détermination du facteur KI.

III.3. Cas d'une fissure horizontale située de la plaque

III.3.1. Condition aux limites

Une contrainte verticale dirigée vers le haut sera appliquée $y = 243$ (en MPA) sera appliquée à la plaque, la base de la plaque est encastree. Ces mêmes conditions seront appliquées dans tous les cas de cette étude.

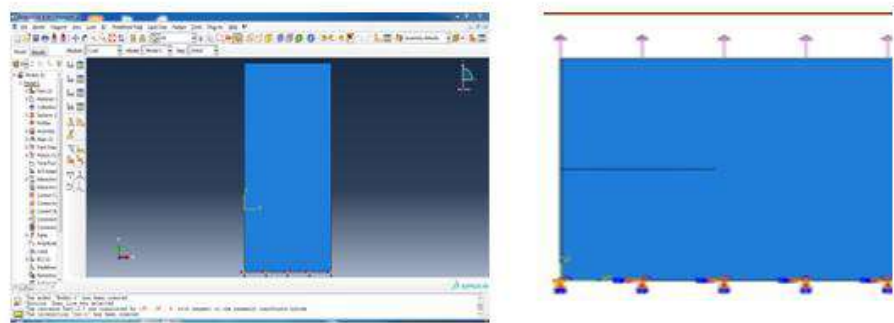


Fig. III.3. Conditions aux limites.

III.3.2. Maillage.

La zone en front de fissure (ou près du front) présente des gradients importants de contraintes et de déformations. Il est donc crucial de bien choisir le type d'éléments, ainsi que la taille optimale de discrétisation afin d'obtenir des résultats fiables avec un temps de calcul raisonnable.

Les éléments cubiques linéaires sont utilisés pour une modélisation 3D. Mais comme nous utilisons une modélisation nous adoptons des éléments quadratique linéaire sde type S4R :A4-nœud doublé incurvé au nombre de 200 d'éléments L'influence de la taille des éléments (voir Fig.III.4) sur les résultats est source de discussions. La discrétisation des éléments doit être suffisamment fine pour simuler les champs de contraintes et de déformations en pointe de fissure. [3]

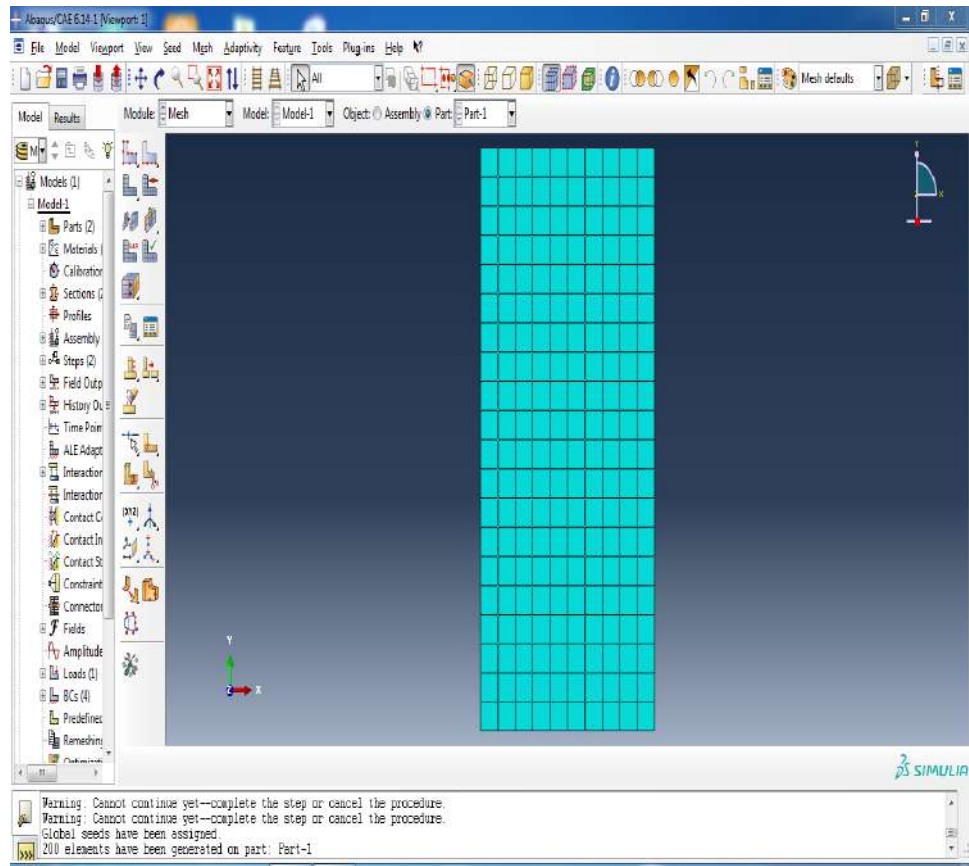


Fig. III.4. Maillage utilisé.

III.3.3. Résultats et discussions

La figure Fig. III.5 représente la plaque fissurée avant et après déformation.

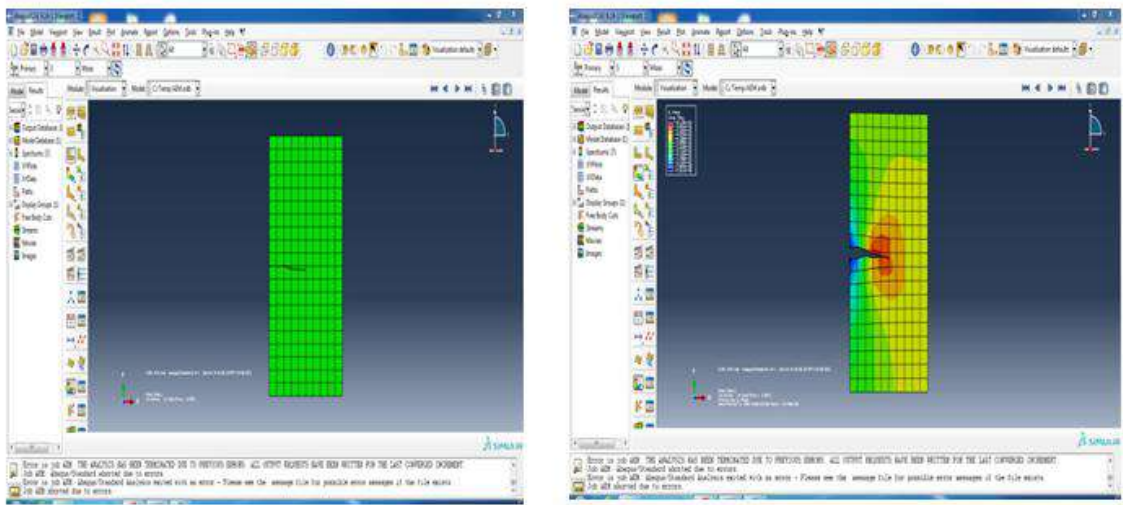


Fig. III.5. Résultats de la simulation pour une fissure de
Plaque fissurée avant déformation Plaque fissurée après déformation

Les figures de III.6 à III.9 représentent les différentes valeurs du facteur KI pour le cas étudié

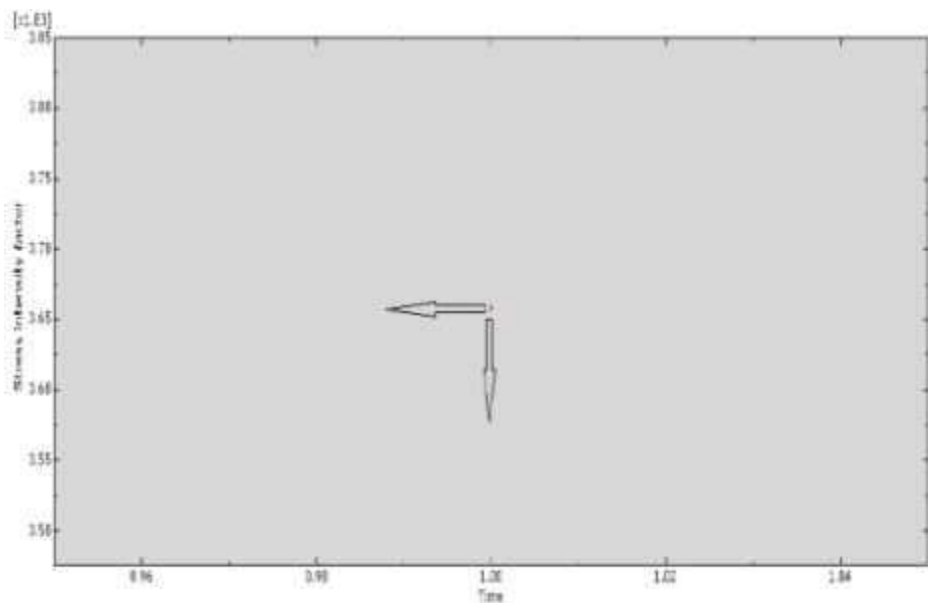


Fig. III.6. Valeur de K1

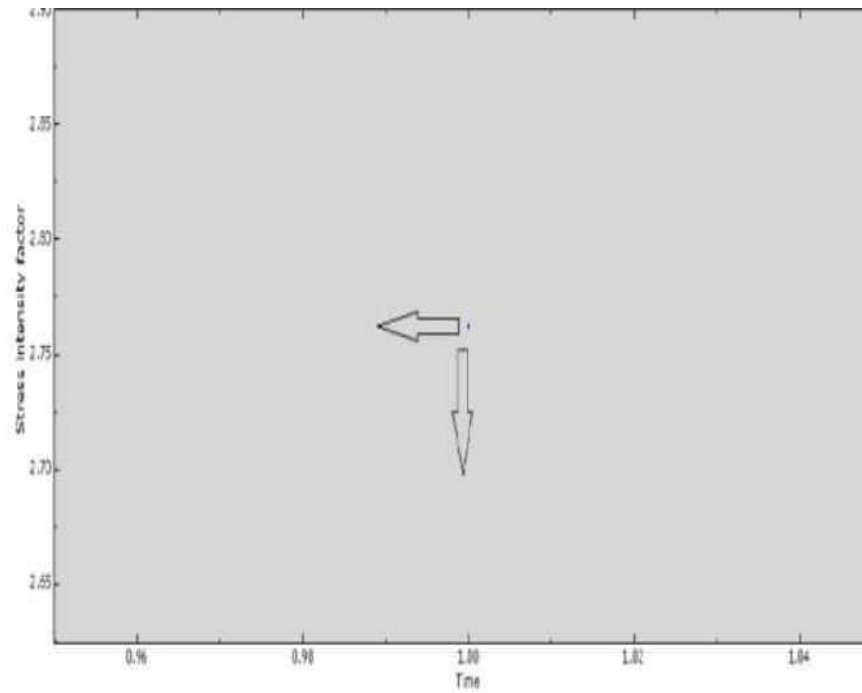


Fig. III.7. Valeur de K2

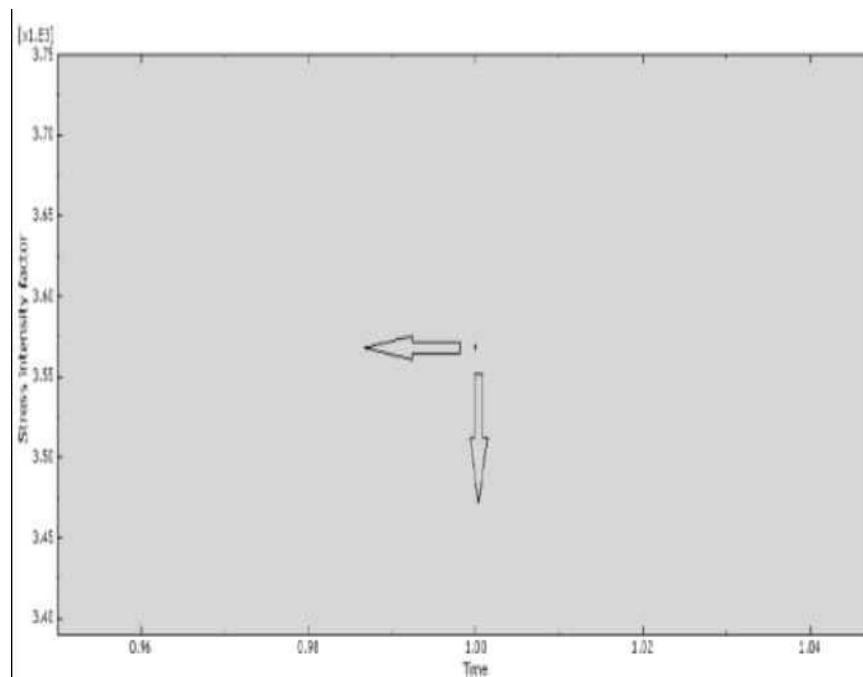


Fig. III.8. Valeur de K3

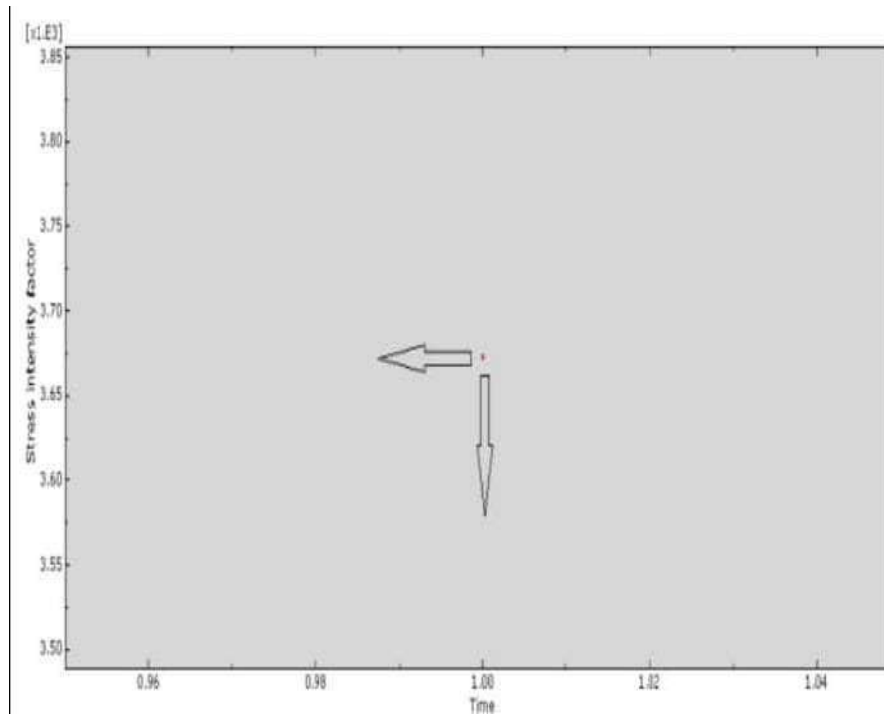


Fig. III.9. Valeur de K4

Tableau III.2 différentes valeurs de KI déterminées par éléments finis.

Facteur K1	K1	K2	K3	K4
Valeurs	3685.18	3781.54	3581.21	3670.33

On remarque que la valeur la plus proche de celle calculée (KI 3658.28 MPA) est celle du facteur K4 (3670.33).

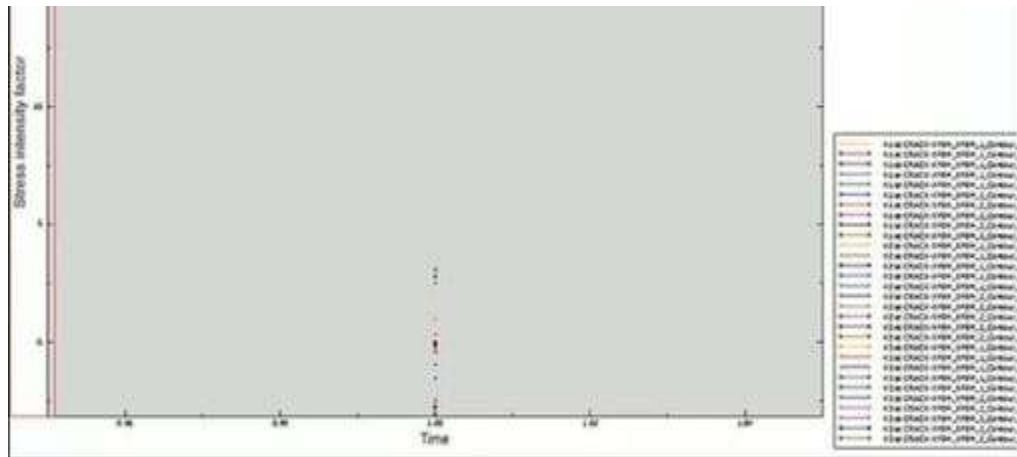


Fig. III. 10. Evolution du FIC en fonction de l'inclinaison de la fissure

III.4. Méthode étendue XFEM :

III.4.1.Cas d'une fissure de la plaque

III.4.1.1.Condition aux limites

$\delta y = 200$ (en MPA), la base de la plaque est encadrée. Ces mêmes conditions seront appliquées dans tous les cas de simulation.

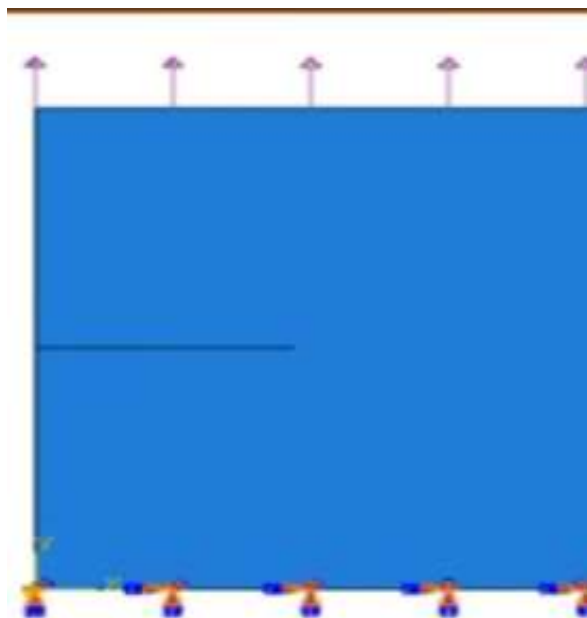


Fig. III.11. Conditions aux limites

III.4.1.2. Maillage

Nous utilisons dans la simulation un maillage à 200 éléments quadratique linéaires de type S4R :A4-nœud doublé incurvé de coque mince ou épaisse intégration réduite, contrôlé au sens des aiguilles d'une montre c'est-à-dire on maintient le même maillage que précédemment. On maintient aussi les mêmes conditions aux limites pour les simulations suivantes.

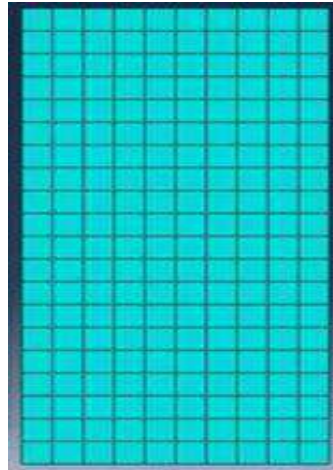
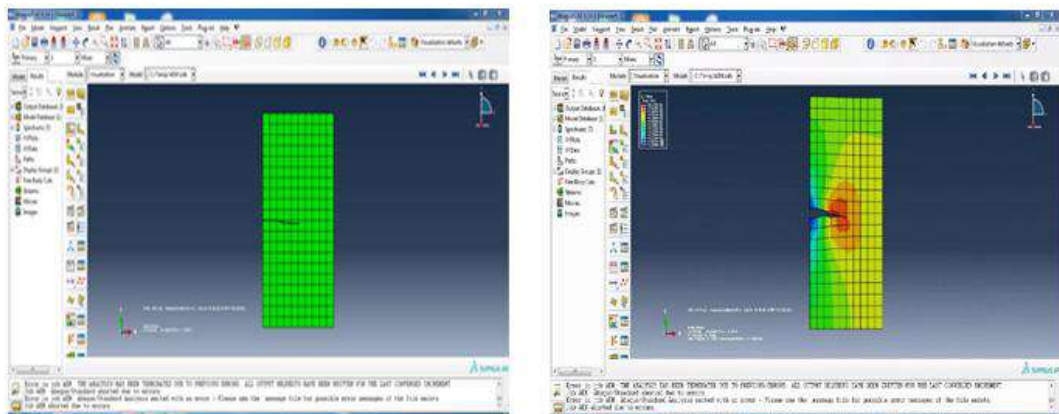


Fig. III.12 Maillage utilisé

III.4.2. Résultats et discussions

La figure Fig. III.51 représente la plaque fissurée avant et après déformation



Avant déformation

Après déformation

Fig. III.13. Résultats de la simulation

III.4.2.1. Evolution d'énergie

La figure III. 14 illustre l'évolution de l'énergie de déformation en fonction de la longueur de la fissure

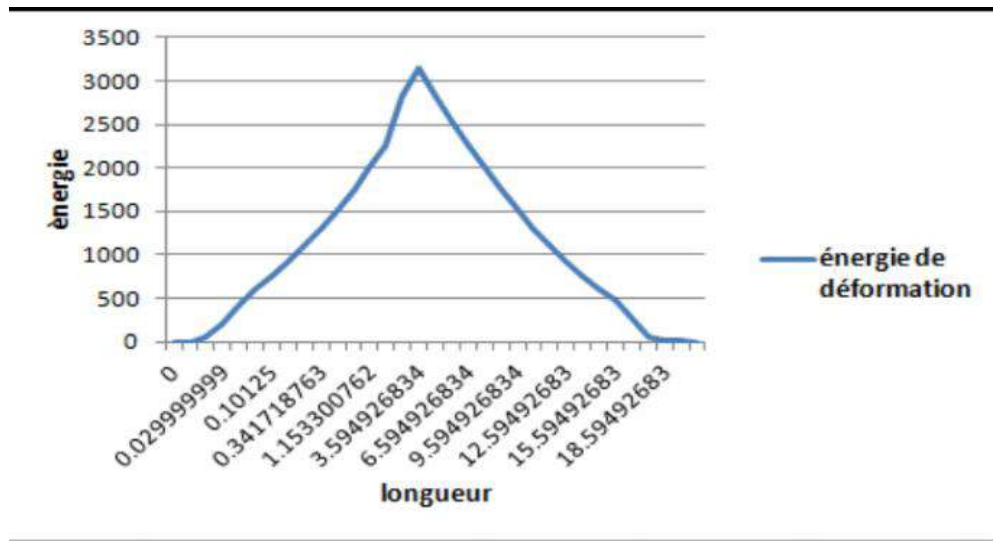


Fig. III. 14 Evolution d'énergie en fonction de la longueur de fissure

III.4.2.2. Evolution de la force

La figure III. 15 illustre l'évolution de la force appliquée en fonction de la longueur de la fissure

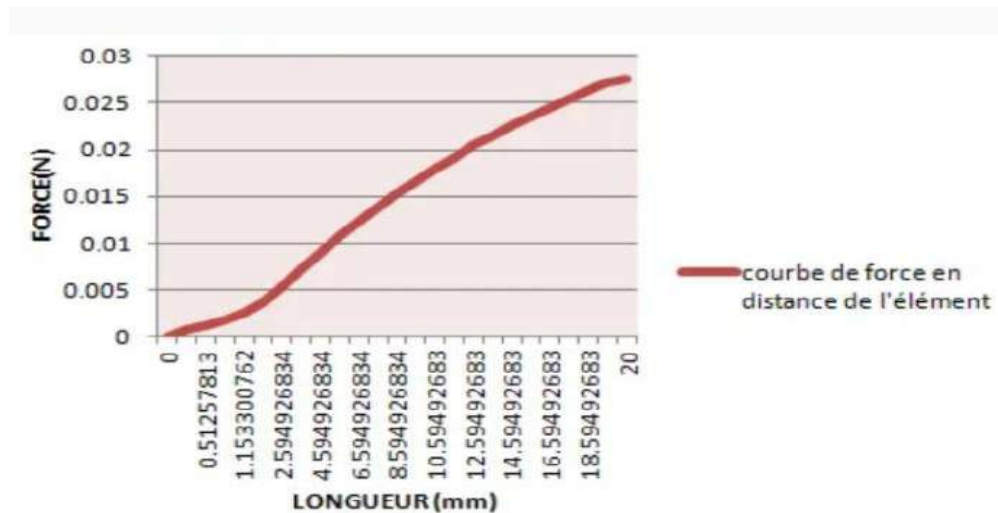


Fig. III. 15 Evolution de la force en fonction de la longueur de fissure

Nous remarquons que la valeur maximale de l'énergie dissipée et celle de la force sont situées au niveau de l'extrémité de la fissure (tip of the crack)

III.4.2.3 Evolution DE STRESS

La figure III.16 illustre l'évolution de stress en fonction de la distance du chemin

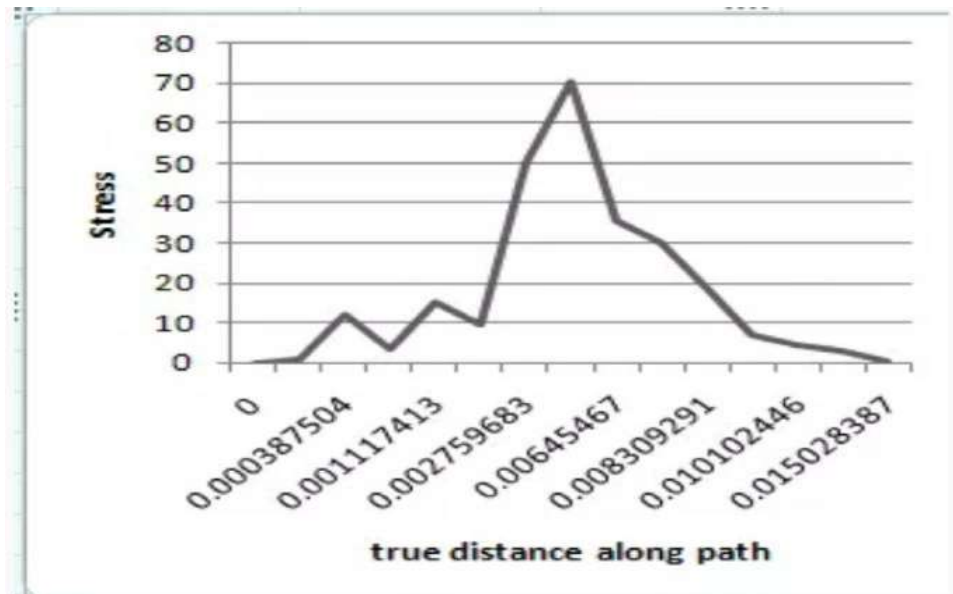


Fig. III. 16 Evolution du stress en fonction de la distance du chemin

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la propagation des fissures dans une de plaque de polyéthylène en utilisant deux méthodes ; la méthode du contour plot et celle du XFEM.

Par la première méthode nous avons montré que le facteur d'intensité de contrainte (FIC) obtenu par la simulation est proche de celui calculé manuellement.

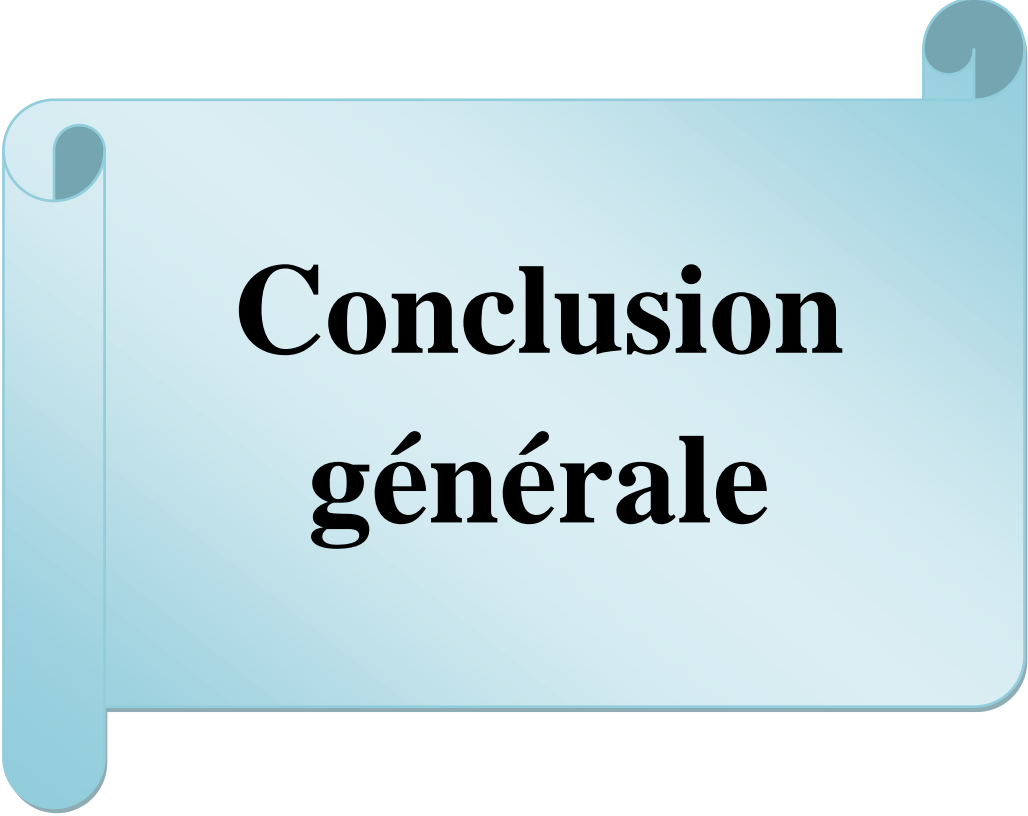
Par la seconde méthode nous avons pu remarquer que l'énergie de déformation, la contrainte et le force de déformation sont maximale au point final de la fissure.

Référence Bibliographique (chapitre III) :

[1]- Good Fellow Polyethylene ,Lille, France, Wwww. Good
Fellow.Com/Csp/Active/Gf Home . Csp

[2]-L. Andrew, Ward, X. Luetn. Brown, Accelerated Test For Evaluating
now crack Growth of polyethylene polymers inle pal and air ,Polymer
Engineering and science, Volume30,No18,1990

[3]-M.Arzaghi,C.Gardin,K.Vor,P.Chea,C.Sarrazin-Baudoux,J.Petit,20ème
congrès Français deMécanique,Besançon,29aoûta2septembre2011.



Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, notre but était de nous familiariser avec l'analyse et la simulation de la mécanique de la rupture. Il agissait de comprendre le traitement de ce problème et surtout utiliser cette technique avancée pour pouvoir modéliser des structures jusqu'à la rupture.

Cette approche étant très complexe dans sa théorie, néanmoins plusieurs auteurs lui ont donné ses premières bases théoriques. L'apparition par la suite des méthodes numériques et particulièrement la méthode des éléments finis à contribuer beaucoup dans l'avancement dans le traitement de la prédiction de l'analyse de la fissuration.

La méthode X-FEM qui est apparue plus récemment a permis d'évaluer considérablement dans ce domaine. Nous nous sommes attelés dans ce travail à présenter cette dernière méthode et surtout à montrer ses performances dans l'analyse du problème de fissuration. Il s'avère que cette méthode qui évolue toujours à l'heure actuelle est sans doute la meilleure approche pour traiter ce problème.

Les exemples que nous avons présenté nous ont permis en plus de comprendre le fonctionnement de la méthode X-FEM, de maîtriser aussi sa modélisation par l'intermédiaire de code de calcul très puissant.

Nous pensons néanmoins qu'au bout de ce travail, nous nous sommes imprégnés d'assez de connaissances pouvons aborder à l'avenir ce genre d'analyse avec plus de maîtrise comme par exemple l'analyse de situation réelle de mécanique de la rupture.