

République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de  
l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique Université  
Mouloud Mammeri - Tizi-Ouzou  
Faculté de Génie de la Construction  
Département de Génie Mécanique



## Mémoire de fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique  
Option : Construction mécanique

# Thème

Etude et vérification d'une bride de  
refoulement d'une pompe au niveau de  
l'entreprise MFG  
Mediterranean float glass

Proposé par :  
Mr: MOUAICI

Promoteur :  
Mr : DAHMANE

Dirigé par :  
Mr : LEBIK

Réalisé par :  
Mr : MOULAHCENE Ferhat  
Mr : ZIANE Djaffar

Promotion : 2012/2013

# Remerciements

*En premier lieu, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir aidé pour arriver à terme de ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer notre sincère reconnaissance à l'égard de tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail, particulièrement à notre promoteur Mr DAHMANI pour sa disponibilité, ses conseils et suggestions.*

*Nos remerciements vont également aux ingénieurs de l'entreprise MFG (Mr LEBIK et Mr MOUAICI) pour la confiance qu'ils nous ont accordée en proposant ce sujet, ainsi qu'à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*En fin, aux membres de jury qui nous font l'honneur d'examiner notre mémoire de fin d'études.*

Merci

*Je dédie ce travail à :*

*Spécialement a Boussad et sa femme.*

*Mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu tout au long de ma vie, qui m'ont orienté dans le bon chemin et qui' ont tout fait pour que je réussisse, que Dieu vous bénisse et vous garde.*

*Ma sœur :Chabha.*

*A la mémoire de mes grands parents paternels et maternels qu'ils reposent en paix.*

*A toute ma famille.*

*A tous mes amis(es) et tous ceux que j'aime.*

*A toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Djaffar.*

*Je dédie ce travail à :*

*Spécialement a mon frère Samir que son âme repose en paix.*

*Mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu tout au long de ma vie, qui m'ont orienté dans le bon chemin et qui' ont tout fait pour que je réussisse, que Dieu vous bénisse et vous garde.*

*Mes très chers frères :Hakim , Samir.*

*Ma sœur :Farida.*

*A la mémoire de mes grands parents paternels qu'ils reposent en paix.*

*Mes grands parents maternels à qui je souhaite une longue vie et mes oncles.*

*A toute ma famille.*

*A tous mes amis(es) et tous ceux que j'aime.*

*A toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Ferhat.*

---

**SOMMAIRE**

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| Remerciements .....         | i   |
| Dédicaces .....             | ii  |
| Sommaire .....              | iv  |
| Liste des symboles .....    | x   |
| Liste des figures .....     | xii |
| Liste des tableaux .....    | xvi |
| Introduction générale ..... | 1   |

**Chapitre I : Aperçu de l'entreprise MFG et de l'industrie du verre.**

|   |    |
|---|----|
| I.1. Présentation.....                          | 2  |
| I.2. Le verre.....                              | 3  |
| I.3. Le procédé « Float ».....                  | 4  |
| a. Le four de fusion.....                       | 6  |
| b. Bain d'étain.....                            | 7  |
| c. Étenderie.....                               | 8  |
| d. Découpe.....                                 | 9  |
| I.4. Unité de production de verre à couche..... | 9  |
| I.4.1- Les fonctions d'un verre à couches.....  | 10 |
| a. Les fonctions optiques.....                  | 10 |
| b. Les fonctions chimiques.....                 | 13 |

|  |    |
|--|----|
| c. Les fonctions électriques.....                                | 13 |
| d. Les fonctions multiples.....                                  | 13 |
| I.4.2-Structure d'un verre à couches.....                        | 13 |
| I.4.3-Nature des couches, procédés de dépôt.....                 | 14 |
| a. Verres à couches déposées sous vide.....                      | 14 |
| b. Verres à couches pyrolitiques.....                            | 15 |
| c. Verres autonettoyants.....                                    | 15 |
| d. Verres antireflets.....                                       | 16 |
| e. Verres à couches réfléchissantes.....                         | 16 |
| I.4.4. Système de refroidissement de l'unité verre a couche..... | 17 |
| a. Présentation du système.....                                  | 17 |
| b. Pompe de refoulement d'eau de la station.....                 | 19 |
| Conclusion.....  | 20 |

## **Chapitre II : Notion sur les pompes de refoulement.**

|  |    |
|--|----|
| II.1-Définition de la pompe.....                                   | 21 |
| II.2. Histoire de la pompe.....                                    | 21 |
| II.3. classification des pompes.....                               | 23 |
| II.3.1. Les pompes volumétriques.....                              | 24 |
| II. 3.1.1. Les pompes alternatives ou à piston.....                | 24 |
| II.3.1.2. Les pompes rotatives.....                                | 25 |
| II.3.1.3. Avantages et inconvénients des pompes volumétriques..... | 26 |
| a. Avantages.....  | 26 |
| b. Inconvénients.....  | 26 |

|   |    |
|---|----|
| III.3.2. les pompes centrifuges.....  | 27 |
| II.3.2.1. définition.....   | 27 |
| III.3.2.2. Principe de fonctionnement.....  | 27 |
| II.3.2.3 Avantages et inconvénients des pompes centrifuges.....                                     | 30 |
| a. Avantages.....   | 30 |
| b. Inconvénients.....   | 30 |
| II.4. La pompe centrifuge utilise dans la station de refroidissement de l`unité verre a couche..... | 31 |
| II.4.1. présentation.....   | 31 |
| II.4.2. Caractéristiques de fonctionnement de la pompe.....   | 33 |
| II.4.3. Entraînement, accessoires de la pompe.....  | 34 |
| II.4.4. Exécution.....  | 34 |
| II.4.5. Matériaux.....  | 36 |
| II.4.6. les caractéristiques de l`acier CrNiMoTi 1.4571.....  | 36 |
| Conclusion.....   | 37 |

### **Chapitre III : Comportement mécanique des matériaux.**

|  |    |
|--|----|
| III.1. ntrouction.....                                 | 38 |
| III.2. Propriétés mécaniques des matériaux.....        | 38 |
| III.2.1. Propriétés d`usage.....                       | 38 |
| III.2.2. Essai de Traction.....                        | 39 |
| III.2.3. Influence de la température sur Re et Rm..... | 40 |

---

|   |    |
|---|----|
| III.2.4. Autres caractéristiques mécaniques: A, E, G, $\nu$ variations en fonction de la température..... | 41 |
| a. Allongement à la rupture A.....  | 41 |
| b. Module d'Young E.....  | 41 |
| c. Valeur spécifique du module.....   | 42 |
| d. Coefficient de Poisson $\nu$ .....   | 42 |
| e. Module de cisaillement G.....  | 42 |
| f. La résilience.....   | 43 |
| g. La ténacité.....   | 43 |
| III.3.Comportement élastique des matériaux.....   | 44 |
| III.3.1. Loi de comportement élastique.....   | 44 |
| a. Loi élastique linéaire et homogène.....  | 44 |
| b. Loi de <i>Hooke</i> donnant les contraintes.....   | 44 |
| c. Loi de <i>Hooke</i> donnant les déformations.....  | 45 |
| d. Relation entre les déviateurs.....   | 45 |
| e. Relation entre pression moyenne et dilatation volumique.....   | 45 |
| f. Quelques relations entre $(\lambda, G)$ , $(E, \nu)$ et $K$ .....                                      | 46 |
| III.4.Le comportement plastique des matériaux.....  | 46 |
| III.4.1.Définition.....   | 47 |
| III.4.2. Propriété.....   | 48 |
| III.4.3. Les principaux critères.....   | 49 |
| a. Critère de Von Mises.....  | 49 |
| b. Critère de Tresca.....   | 52 |
| c. Prise en compte de l'écroutissage.....   | 54 |

|   |    |
|---|----|
| d. Autres critères.....   | 54 |
| III.5. Rupture des matériaux.....                               | 54 |
| III.5.1. les types de rupture.....                              | 55 |
| III.5.1.1. la rupture fragile.....                              | 55 |
| a. Fissure et modes de rupture.....                             | 56 |
| b. Le modèle de rupture fragile.....                            | 57 |
| c. Coefficient de concentration k et facteur d'intensité K..... | 58 |
| III.5.1.2. La rupture ductile.....                              | 59 |
| III.6. Généralité sur la méthode des éléments finis.....        | 60 |

**Chapitre IV : Etude et simulation de la bride de refoulement de la pompe.**

|   |    |
|---|----|
| IV.1.Introduction.....                                | 61 |
| IV.1. logiciel ABAQUS.....                            | 61 |
| IV.1.1. Présentation.....                             | 61 |
| IV.1.2. Système d'unités.....                         | 63 |
| IV.1.3. Phases de mises en données.....               | 64 |
| IV.2. simulation du modèle et les étapes suivies..... | 64 |
| IV.2.1. Dessin du modèle sur ABAQUS.....              | 65 |
| IV.2.2. Propriété du modèle.....                      | 69 |
| a. Densité.....                                       | 69 |
| b. Elasticité.....                                    | 70 |
| c. Plasticité.....                                    | 71 |

|  |    |
|--|----|
| IV.2.3. Maillage du modèle (mesh).....       | 72 |
| IV.2.4. Les variables a calculer (step)..... | 73 |
| IV.2.5. Loads.....                           | 74 |
| a. Condition aux limites.....                | 74 |
| b. Chargement.....                           | 75 |
| IV.2.6. Job.....                             | 76 |
| IV.2.7. Visualisation.....                   | 77 |
| a. Les déplacements.....                     | 77 |
| b. Contraintes S mises.....                  | 78 |
| c. Les contraintes s tresca.....             | 80 |
| d. Les forces de réactions.....              | 81 |
| e. Les déformations.....                     | 82 |
| Conclusion.....                              | 84 |
| Conclusion générale.....                     | 85 |
| Références Bibliographies.....               | 86 |

**Liste des symboles**

MFG : Mediterranean Float Glass.

FS : Le facteur solaire.

TL : La transmission lumineuse.

e : L'émissivité.

TiO<sub>2</sub> : L'oxyde de titane.

HE : Echangeur de chaleur.

---

Re : Limite élastique.

Rm : Limite à la traction.

Re<sub>0,2</sub> : Limite conventionnelle d'élasticité.

A : Allongement à la rupture.

E : Module d'Young.

v : Coefficient de Poisson .

G : Module de cisaillement.

K : Facteur d'intensité de contraintes.

Kc : La ténacité.

K<sub>d</sub> : La ténacité dynamique.

σ<sub>ij</sub> : Tenseur des contraintes.

ε<sub>ij</sub> : Tenseur des déformations.

---

$P_{\text{moy}}$  : La pression moyenne.

$f(s, h)$  : fonction de charge.

$h$  : Le paramètre d'écroutissage.

$\bar{s}$  : Le tenseur déviateur des contraintes.

$\sigma_{\text{VM}}$  : Contrainte équivalente de Von Mises.

$\sigma_{\text{T}}$  : La contrainte équivalente de Tresca.

$\vec{T}$  : Vecteur contrainte des facettes.

$\rho$  : Rayon de courbure.

$2c$  : Grand axe.

$2b$  : Petit axe.

---

**Liste des figures :**

|  |    |
|--|----|
| Fig.I.1 : Situation géographique de l'entreprise                     | 2  |
| Fig.I.2 : Le verre   | 4  |
| Fig.I.3 : Vue générale de la Float line                              | 5  |
| Fig.I.4 : Le verre produit en procédér float                         | 5  |
| Fig.I.5 : Le four de fusion  | 6  |
| Fig.I.6 : Le bain d'étain de la float line                           | 7  |
| Fig.I.7 : L'étenderie de la float line                               | 8  |
| Fig.I.8 : Ligne de découpe   | 9  |
| Fig.I.9 : Unité verre a couche                                       | 10 |
| Fig.I.10 : vitrage isolant   | 11 |
| Fig.I.11 : procédé de production du verre a couches depose sous vide | 14 |
| Fig.I.12 : procédé de production du verre a couches pyrolitiques     | 15 |
| Fig.I.13 : Station de refroidissement pour l'unité verre a couche    | 18 |
| Fig.I.14 : les pompes de refoulement de la station                   | 19 |
| <hr/>  |    |
| Fig.II.1 : l'écoulement du fluide sellent les deux types de pompe    | 24 |
| Fig.II.2 : pompe a piston  | 25 |
| Fig.II.2 : pompe a piston  | 25 |
| Fig.II.4 : pompe centrifuge monobloc                                 | 27 |
| Fig.II.5 : principe de fonctionnement de la pompe centrifuge         | 28 |
| Fig.II.6 : une partie de la pompe centrifuge (le circuit du fluide)  | 28 |

|  |    |
|--|----|
| Fig.II.7 : Courbe caractéristique hauteur-débit volumique    | 29 |
| Fig.II.8 : le point de fonctionnement de la pompe centrifuge | 30 |
| Fig.II.9 : vue éclatée de la pompe                           | 31 |

---

|   |    |
|---|----|
| Fig.III.1 : courbe de traction.   | 39 |
| Fig.III.2 : Evolution de $R_e$ et $R_m$ pour un acier en fonction de la température | 40 |
| Fig.III.3.a : matériaux élasto-plastique avec écrouissage                           | 47 |
| Fig.III.3.b : matériaux élasto-plastique parfait                                    | 47 |
| Fig.III.4 : cisaillement simple   | 50 |
| Fig.III.5.a : matériaux élasto-plastique avec écrouissage                           | 52 |
| Fig.III.5.b : vue dans le plan $s_1 + s_2 + s_3 = 0$                                | 52 |
| Fig.III.6 : représentation de Mohr  | 53 |
| Fig.III.7.a : matériaux élasto-plastique avec écrouissage                           | 53 |
| Fig.III.7.b : vue dans le plan $s_1 + s_2 + s_3 = 0$                                | 53 |
| Fig.III.8 : schéma d'une fissure elliptique   | 55 |
| Fig.III.9 : fissure et modes de rupture   | 56 |
| Fig.III.10 : Facteur d'intensité de contrainte                                      | 59 |

---

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| Fig.IV.1 : logiciel de calcul ABAQUS. | 63 |
| Fig.IV.2 : le modèle a simulé.        | 64 |
| Fig.IV.3 : Le tube.                   | 66 |

---

|  |    |
|--|----|
| Fig.IV.4 : La volute.  | 67 |
| Fig.IV.5 : Le modèle assemble sur ABAQUS.                                | 68 |
| Fig.IV.6 : déclaration de la densité du matériau.                        | 69 |
| Fig.IV.7 : déclaration des propriétés élastique du matériau.             | 70 |
| Fig.IV.7 : déclaration des propriétés élastique du matériau.             | 71 |
| Fig.IV.9 : maillage du modèle.   | 72 |
| Fig.IV.10 : déclaration des variables a calculer.                        | 73 |
| Fig.IV.11 : conditions aux limites.                                      | 74 |
| Fig.IV.12 : application du chargement.                                   | 75 |
| Fig.IV.13 : lancement de l'analyse.                                      | 76 |
| Fig.IV.14 : les déplacements.  | 77 |
| Fig.IV.15 : les contraintes de van mises.                                | 78 |
| Fig.IV.16 : courbe des contraintes de van mises sur un élément.          | 79 |
| Fig.IV.17 : les contraintes de tresca.                                   | 80 |
| Fig.IV.18 : les forces de réactions.                                     | 81 |
| Fig.IV.19 : les déformations.  | 82 |
| Fig.IV.20 : courbe des déformations en fonction du temps sur un élément. | 83 |

---

**LISTE DES TABLEAUX.**

|  |    |
|--|----|
| Tableau .II.1 : éléments de la pompe a engrenage.                              | 26 |
| Tableau.II.2 : la désignation des pièces de la pompes centrifuge.              | 32 |
| Tableau.II.3 : les caractéristiques de fonctionnement de la pompe.             | 33 |
| Tableau.II.4 : les caractéristiques de fonctionnements du compartiment moteur. | 34 |
| Tableau.II.5 : les normes d`exécution de la pompe centrifuge.                  | 34 |
| Tableau.II.6 : les matériaux utilisés dans la conception de la pompe.          | 36 |
| Tableau.II.7 : les propriétés mécanique de l`acier 1.4571.                     | 36 |

---

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| Tableau.IV.1 : système d`unités. | 63 |
|----------------------------------|----|

---

## **Introduction générale:**

Depuis toujours, le principal souci des constructeurs est de disposer, pour la conception, de méthodes rapides, fiables et suffisamment précises. Au cours des dernières années, l'évolution conjointe des moyens informatiques et des méthodes numériques est à l'origine de grands progrès dans le domaine de la construction mécanique.

Le travail consiste à faire une étude de résistance sur une bride de refoulement d'une pompe centrifuge sur laquelle est identifiée une fuite d'eau après un certain temps assez court de fonctionnement.

Grace aux méthodes de calcul par éléments fini introduites au cœur du logiciel ABAQUS, nous allons effectuer une simulation en 3D de cette bride afin de visualiser et identifier cette fissure.

Le travail est subdivisé en quatre chapitres, le premier consiste à faire une présentation de l'entreprise MFG, et du procédé de production du verre float. Ainsi qu'un aperçu sur l'unité verre à couche ou se présente le problème à étudier.

Le second chapitre est consacré aux différents types de pompes de refoulement ainsi qu'à leurs caractéristiques et leurs modes de fonctionnements.

Dans le troisième chapitre, on expliquera les lois de comportement mécaniques des matériaux dans les domaines élastique, plastique et enfin la rupture.

Le dernier chapitre, on le consacrera à la modélisation et la simulation (3D) de la bride de refoulement en utilisant le logiciel de calcul ABAQUS.

## **I.1. Présentation:**

Méditerranéen Float Glass (MFG), située à Larbâa dans la wilaya de Blida, a été créée en 2007. Ce complexe industriel est l'une des plus grandes industries de production de verre plat en Afrique. Leader sur le continent africain dans la production de verre plat, MFG oriente sa production à hauteur de 70% vers le marché extérieur, notamment l'Europe, et les 30% restants suffisent largement à couvrir les besoins du marché national à hauteur de 80%. Ce choix est dicté par la grande demande exprimée à l'international contrairement au marché national qui n'est pas très demandeur de ce genre de verre.

Grâce à cet investissement, «l'Algérie est passée du stade quasi-importatrice à celui d'exportatrice de verre».

Dans le cadre de son développement et dans le but d'élargir sa gamme de produits afin de répondre aux attentes de ses clients MFG a déployé un important projet d'investissement. La production s'oriente aujourd'hui suivant deux axes majeurs : les produits semi-industriels et la transformation de produits verriers



**Fig.I.1** : Situation géographique de l'entreprise

MFG a opté pour un système de management intégré **QHSE** et est certifié sous les trois référentiels :

- ü **ISO 9001** :en 2008, pour la qualité.
- ü **ISO14001** :en 2004, pour l'environnement.
- ü **OHSAS18001** :en 2007, pour la santé et la sécurité des travailleurs.

En octobre 2011 la direction technique de MFG a obtenu la certification **ISO 9001** pour le management des projets.

Mediterranean Float Glass dispose des unités suivantes:

- § Unité de production de verre a couche.
- § Unité de production de verre clair.
- § Unité de production de verre feuilleté.
- § Unité de transformation du verre plat.

## **I.2. Le verre :**

La définition la plus commune et la plus consensuelle du **verre** est celle de Jerzy Zarzycki : « un verre est un solide non-cristallin présentant le phénomène de transition vitreuse », reprise également par J.Barton et C.Guillemet. Le verre est donc un matériau solide, qui n'a, contrairement aux matériaux cristallins, pas d'ordre atomique à longue distance. Généralement dur, fragile, souvent transparent et isolant électrique, imputrescible, ininflammable, la plupart des verres utilisés par l'homme sont issus d'une des matières premières les plus abondantes sur Terre: le sable.

Le verre est l'un des matériaux les plus anciens du monde et il est toujours utilisé massivement dans les sociétés modernes.

Le verre est issu de la fusion de la silice  $\text{SiO}_2$ , principal constituant du sable, qui ne fond qu'à une température très élevée (1 800 °C), difficile à atteindre dans un four classique, ce qui aurait dû présenter la principale limitation à la production du verre. Mais en ajoutant du

natron, celui-ci abaisse la température de fusion de la silice vers 1 300 °C, jouant ainsi un rôle de fondant du verre. Ainsi, en lisant le récit de Pline l'Ancien, on comprend que sous l'action du feu, le sodium du natron réagit avec la silice du sable pour former du verre.



**Fig.I.2 :** Le verre

### **I.3. Le procédé « Float » :**

Dans le procédé « float » inventé par Sir Alastair Pilkington en 1952, un mélange de matières premières est chargé en continu dans le four de fusion. À la sortie du four le verre forme un ruban flottant à la surface de l'étain fondu. La surface de l'étain fondu est extrêmement lisse, donnant au verre une planéité de surface parfaite. Le ruban de verre est ensuite lentement refroidi jusqu'à un durcissement complet et recuit. Le ruban ainsi obtenu est d'épaisseur régulière et présente des surfaces parfaitement polies. Le ruban est ensuite découpé en plaques pour livraison.

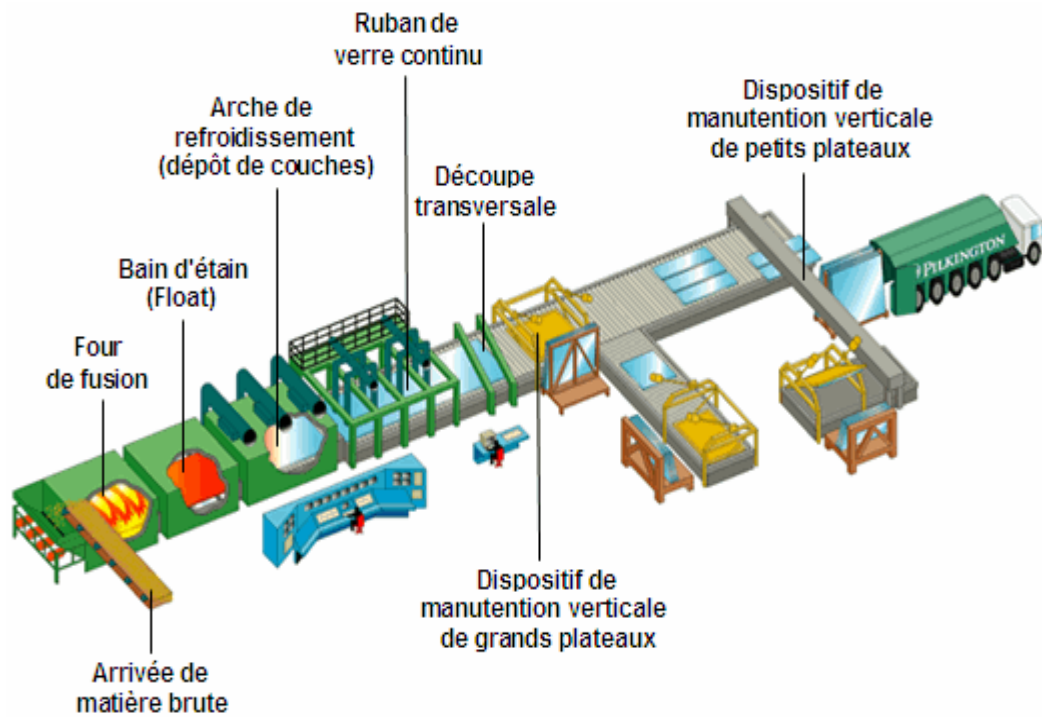


Fig.I.3 : Vue générale de la Float line



Fig.I.4 : Le verre produit en procédé float

Les différents compartiments des float line sont :

**a. Le four de fusion :**

Construit en briques réfractaires, un four type contient jusqu'à 2000 tonnes de verre fondu à 1 550 °C. La température est contrôlée en permanence. Un des systèmes les plus employés à ce jour est le pyromètre. La fusion du verre pour la ligne « float » est assurée par un four à régénérateurs à brûleurs transversaux. Le verre fondu est affiné et homogénéisé. Il est ensuite conditionné à température contrôlée avant d'arriver au bain d'étain. Pour assurer un bon fonctionnement, le four est équipé de dispositifs automatiques de mesure, d'enregistrement et de régulation de pression et de niveau de verre, d'un système de minuterie et d'inversion automatique de flamme, d'instruments de mesure, enregistrement et régulation de température en différents endroits du four et d'un dispositif de régulation de pression de gaz naturel, etc. Les fumées sont évacuées par tirage naturel par une cheminée. Pour protéger l'environnement, les fumées passeront par un équipement de dépollution à tirage forcé conçu en fonction de la réglementation locale.

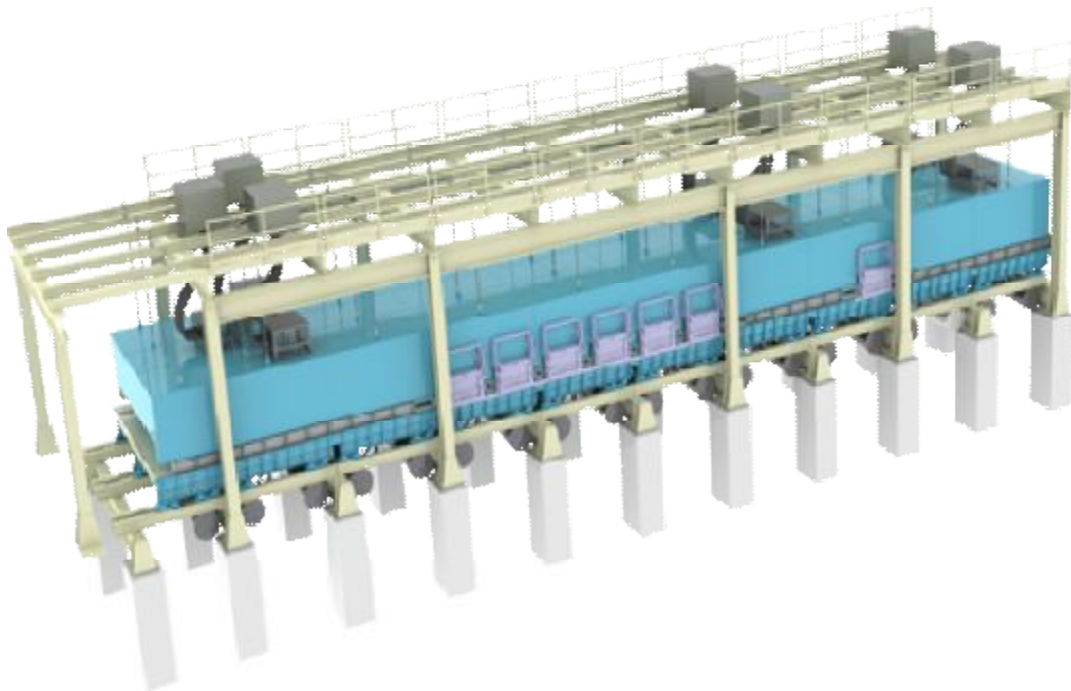


**Fig.I.5 :** Le four de fusion

### **b. Bain d'étain :**

Le verre affiné arrive du four par le canal et il est déversé sur l'étain fondu dans le bain « float » à une température variant de 1 100 °C pour du verre clair à plus de 1 170 °C pour du verre teinté. Le débit est régulé automatiquement de manière à maintenir la largeur et l'épaisseur du ruban. Le bain « float » est chauffé électriquement.

Le verre flotte sur un bain d'étain fondu. Des rouleaux dentés, appelés « top-rollers », accrochent le verre encore liquide sur les rives du ruban et font avancer le verre. L'épaisseur naturelle du verre qui s'étale sur une table est de 5 à 6 mm. Si l'on veut obtenir un ruban d'une épaisseur inférieure à 5 mm, on étire le verre et les top-rollers ont un angle dit « positif ». Si l'on veut une épaisseur supérieure à 5 mm, et ce jusqu'à 12 mm, on repousse le verre et les top-rollers ont un angle dit « négatif ». Plus on s'écarte des 5 mm d'épaisseur, plus il faut ajouter de top-rollers pour donner l'épaisseur souhaitée. Certains bains d'étain possèdent plus de 20 top-rollers pour faire du verre de 0,5 mm d'épaisseur.



**Fig.I.6 :** Le bain d'étain de la float line

### c. Étenderie :

Pour relâcher les contraintes physiques, le ruban est soumis à un traitement thermique dans un long four de recuisson appelé étenderie. Les températures sont étroitement contrôlées dans le sens longitudinal et transversal du ruban. L'étenderie sert à recuire et à refroidir le verre. L'étenderie fermée est en construction métallique, elle refroidit le verre par rayonnement et le recuit selon les exigences de la spécification de production.

Après recuisson, le verre est refroidi rapidement de manière contrôlée par un refroidissement adapté et un système de chauffage. Le verre sera transporté dans l'étenderie sur un convoyeur à rouleaux dont l'écartement permet le maintien du ruban en toute sécurité. La commande est transmise mécaniquement aux rouleaux par le système d'entraînement.



Fig.I.7 : L'étenderie de la float line

#### **d. Découpe :**

Sous contrôle permanent (épaisseur, qualité optique, défauts, etc.), le verre est découpé en plaques.

L'équipement du verre froid comprend des convoyeurs à rouleaux, des systèmes de découpe longitudinaux et transversaux avec rompage, une machine de découpe des rives, un convoyeur à rouleaux basculants, un dispositif d'évacuation du calcin, des dispositifs de séparation des plaques et des empileurs pour les petites et moyennes dimensions.



**Fig.I.8 :** Ligne de découpe

#### **I.4. Unité de production de verre à couche :**

C'est l'unité qui améliore le verre clair en modifiant son comportement optique (les vitrages antireflet et les vitrages réfléchissants utilisés pour réduire le facteur solaire), chimique (les vitrages 'autonettoyants' et vitres 'hydrophobes'), électrique (dépôts Conducteur électrique et transparent) ou encore mécanique ( les traitements contre les rayures). Il sont revêtus d'une couche mince, en général composée d'oxydes métalliques.

L'épaisseur de cette couche est de l'ordre de 10 nanomètres (soit un centième de micromètre) à 800 nanomètres ( $0,8 \mu\text{m}$ ). Pour optimiser les performances, la couche peut être constituée d'un empilement de plusieurs sous-couches.



**Fig.I.9** : Unité verre a couche

### **I.4.1- Les fonctions d'un verre à couches :**

#### **a. Les fonctions optiques :**

La couche modifie le comportement optique du verre, dans le domaine visible et/ou dans le domaine de l'infrarouge. Les applications optiques d'un verre à couche intéressent

d'une part les vitrages utilisés dans le domaine de l'architecture et d'autre part le traitement du coefficient de réflexion.

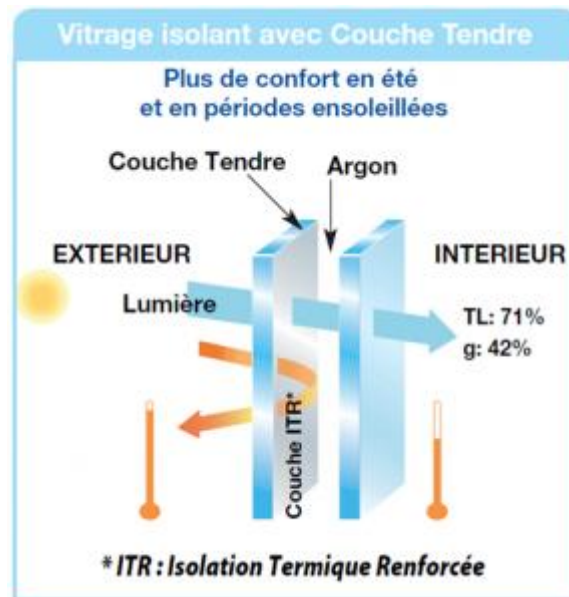


Fig.I.10 : vitrage isolant

### Domaine de l'architecture :

En architecture, il faut tenir compte de la répartition énergétique (ou spectrale) de l'énergie solaire arrivant sur terre. La puissance du rayonnement solaire sur terre est constituée de 43% de rayonnement Infra-rouge, de 3 % de rayonnement Ultra-violet, le reste (54 %) étant de la lumière visible. Une application importante est apportée par une modification du comportement vis-à-vis du rayonnement solaire en contrôlant d'une part l'énergie solaire transmise et d'autre part la luminosité, conduisant ainsi à une économie de conditionnement d'air (en été) et de chauffage (en hiver). Les caractéristiques d'un vitrage sont principalement:

- ü Le facteur solaire (noté  $g$  ou  $FS$  et variant de 0 à 1) qui représente la fraction de l'énergie solaire transmise directement plus la chaleur absorbée par le vitrage et réémise vers l'intérieur de la pièce.

- Ü La transmission lumineuse (notée  $TL$  et variant de 0 à 1) qui est la fraction de puissance transmise dans la fraction du spectre comprise entre  $0,38 \mu\text{m}$  et  $0,72 \mu\text{m}$  qui correspond aux 'couleurs' visibles par l'œil humain.
- Ü Le facteur  $U$  qui caractérise les échanges thermiques à travers le vitrage
- Ü L'émissivité (notée  $e$  et variant de 0 à 1) qui représente la fraction de puissance rayonnée comparée à la puissance rayonnée par un 'corps noir' (dont l'émissivité est égale à 1 par définition) à la même température.

Des couches sont capables de modifier les quantités  $g$ ,  $e$ ,  $TL$  et  $U$ , mais en général de façon non indépendante.

Le secteur de l'automobile fait aussi maintenant de plus en plus appel au contrôle solaire, d'autant plus que dans ce domaine les vitrages ont des surfaces de plus en plus grandes et de moins en moins verticales (exemple : les toits vitrés).

Outre ces applications pratiques, le traitement de surface peut présenter un intérêt esthétique et de décoration (par exemple coloration par effet de réflexion interférentielle provoquée par un dépôt transparent d'indice élevé comme l'oxyde de titane  $\text{TiO}_2$ ).

### **Le traitement du coefficient de réflexion :**

Il est souvent intéressant de contrôler le coefficient de réflexion sur un domaine spectral étendu, comme la totalité du spectre visible par exemple. Des dépôts multicouches diélectriques transparents d'indice de réfraction et d'épaisseurs judicieusement choisis permettent d'obtenir des vitrages anti-réfléchissant, semi-réfléchissant ou super-réfléchissant.

Les applications se trouvent dans le secteur du bâtiment et de l'instrumentation optique.

**b. Les fonctions chimiques :**

Il s'agit essentiellement de créer des vitres à propriétés hydrophobes ou au contraire hydrophiles. Un exemple les verres à couches autonettoyantes à base d'oxyde de titane.

**c. Les fonctions électriques :**

Le but est d'obtenir un dépôt transparent à la lumière visible mais conducteur de l'électricité. Les applications sont l'élimination de charges électrostatiques, mais surtout concernent la réalisation de vitrages 'intelligents' de type électro-chromes. Certains vitrages 'dégivrants' mettent à profit une fine couche transparente mais conductrice de l'électricité. L'exemple typique d'une telle couche est l'oxyde mixte d'indium et d'étain appelé ITO.

**d. Les fonctions multiples :**

Souvent, une combinaison de ces différentes propriétés est recherchée, par exemple est donné par les doubles vitrages autonettoyants et à isolation thermique renforcée. C'est le cas du vitrage 'Cool-Lite SKN 154 BioClean' produit par Saint-Gobain Glass , ce vitrage comporte une couche à faible émissivité déposée en face 2 et un dépôt autonettoyant en face 1.

**I.4.2-Structure d'un verre à couches :**

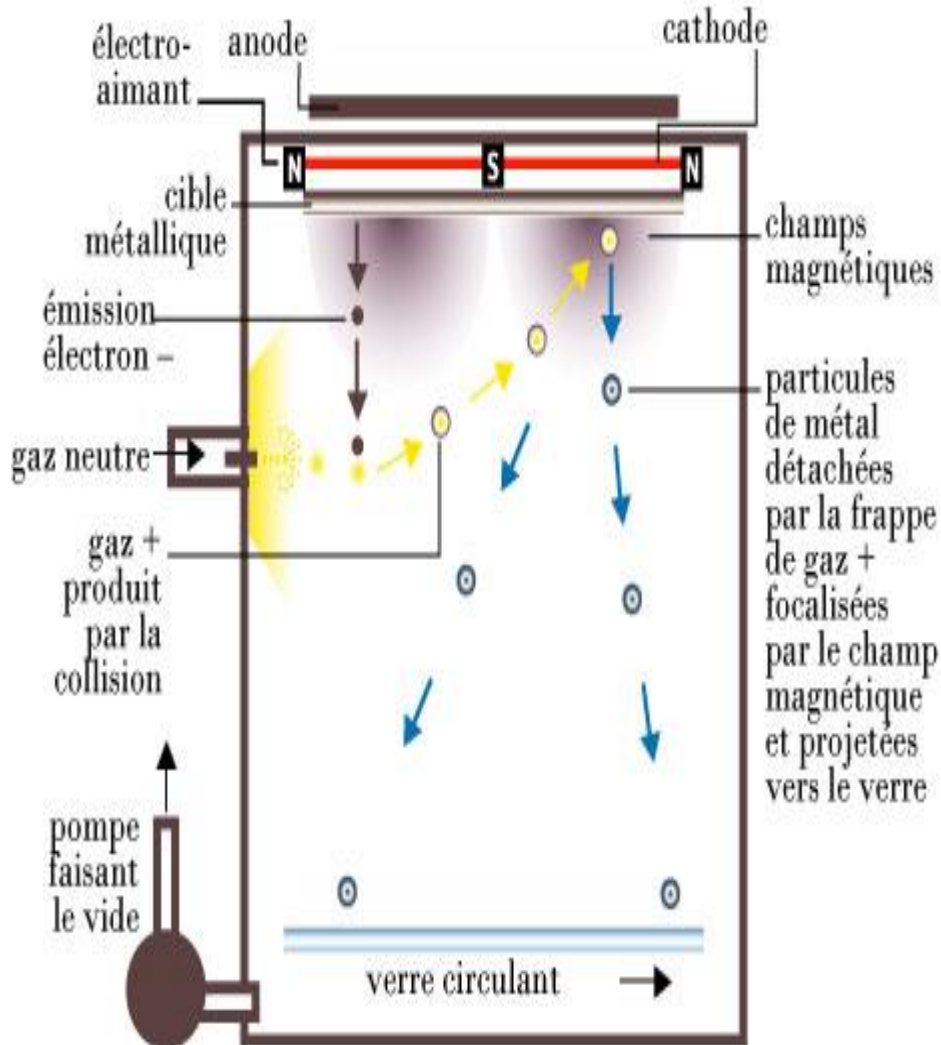
Pour assurer de bonnes propriétés et une bonne durabilité, il est souvent indispensable de déposer :

- ü une sous-couche assurant l'adhérence sur le verre.
- ü une couche (mais plus généralement plusieurs couches) pour donner au verre les caractéristiques fonctionnelles recherchées.
- ü optionnellement, une couche de protection chimique et mécanique (dans le cas de verres à faible émissivité, cette dernière couche peut être du nitrure de silicium).

### **I.4.3-Nature des couches, procédés de dépôt :**

#### **a. Verres à couches déposées sous vide :**

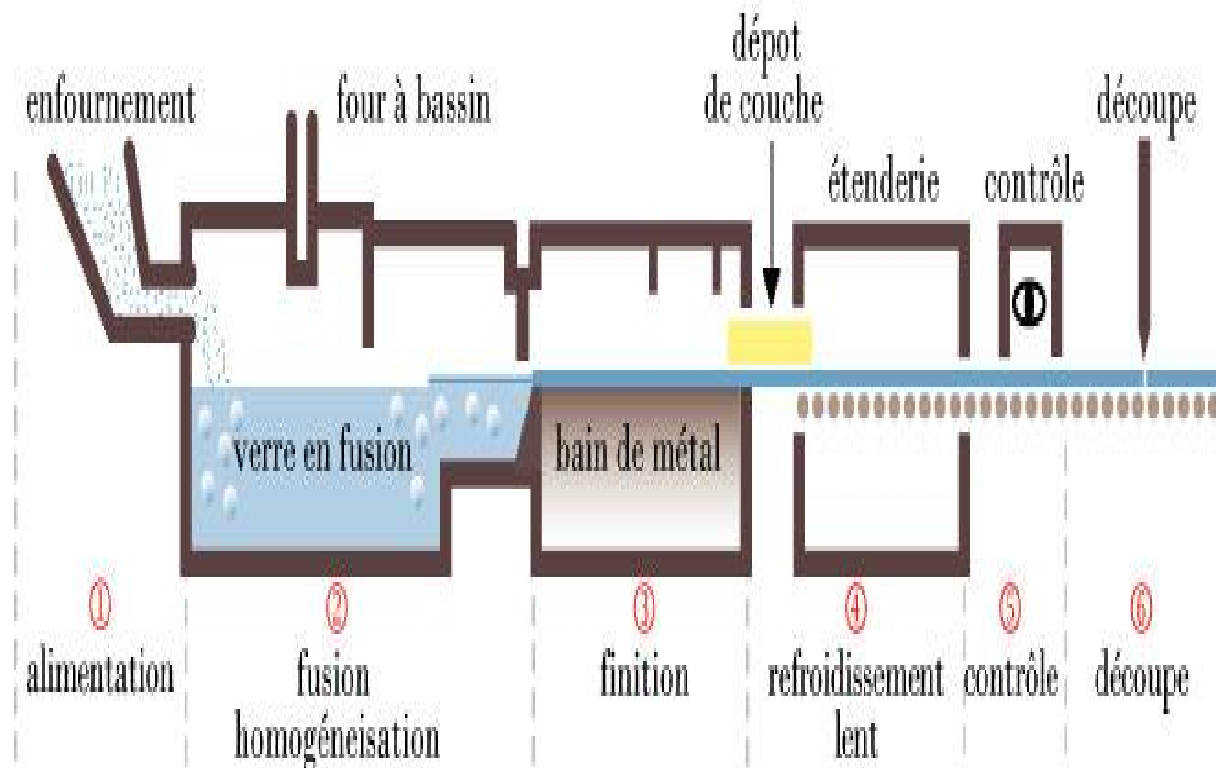
Ces verres sont obtenus par dépôt d'oxydes ou de métal pur selon des procédés électromagnétiques. La technique la plus courante est celle de la pulvérisation cathodique par magnétron qui s'effectue dans une enceinte confinée, sous vide très poussé, en présence de gaz ionisés et contrôlés. Le bombardement électronique d'une cathode métallique en libère des particules qui vont ensuite s'incruster à grande vitesse en surface du verre.



**Fig.I.11 :** procédé de production du verre a couches depose sous vide

### b. Verres à couches pyrolitiques :

Ces verres sont obtenus par pulvérisation d'oxydes métalliques sur le verre en fusion. Les oxydes se fondent au verre dans sa partie superficielle et la surface du verre est alors vitreuse.



**Fig.I.12** : procédé de production du verre a couches pyrolitiques

### c. Verres autonettoyants :

Les vitrages autonettoyants sont des vitrages sur lesquels est déposée en face extérieure une couche spéciale composée de dioxyde de titane. Cette couche est déposée au moment de la fabrication du verre. Ces vitrages utilisent les effets combinés des rayons UV de la lumière naturelle et de la pluie pour éliminer les salissures qui se déposent sur leur surface.

La couche en surface a deux propriétés chimiques qui, sous l'action combinée de l'eau et du rayonnement solaire, rendent le verre autonettoyant :

- ü propriété photo catalytique : le rayonnement ultraviolet déclenche une réaction chimique en présence de dépôts poussiéreux et organiques superflus ; ceux-ci s'oxydent et n'adhèrent plus à la surface du verre.
- ü propriété hydrophile : les molécules hydrophiles attirent l'eau qui s'écoule sur la surface du verre ; elles empêchent la formation de gouttelettes séparées et garantissent par temps de pluie un lavage des particules associées à la poussière et à la saleté.

Disponibles en simple vitrage de 4 à 10 mm ils peuvent être trempés, feuilletés, et comporter une couche de contrôle solaire en face 2.

**d. Verres antireflets :**

Ces verres sont revêtus, en général sur leurs deux faces, avec une couche métallique transparente qui permet d'atténuer très fortement la réflexion extérieure de la lumière au point de ne plus percevoir les reflets des objets environnants. Il permet de voir au travers de ces verres sans que cette vision ne soit gênée par la réflexion d'images parasites.

L'application d'un tel verre est intéressante là où doit être privilégiée l'observation des paysages ou encore celle des objets qu'ils protègent (vitrines de présentation...). Des précautions dans la manipulation et l'entretien des verres doivent être prises pour préserver l'efficacité des couches.

**e. Verres à couches réfléchissantes :**

Ces verres, aussi appelés de protection solaire, comportent une couche dont l'objet est de réfléchir le rayonnement solaire afin de limiter sa pénétration à l'intérieur du bâtiment. L'efficacité est d'autant meilleure que les couches sont placées en face 1. Ces couches apportent une couleur au verre mais n'influent en principe que peu sur la performance thermique des doubles vitrages.

### **I.4.4. système de refroidissement de l'unité verre a couche :**

#### **a. présentation du système :**

On entend par "systèmes de refroidissement industriel" des systèmes destinés à extraire le trop-plein de chaleur d'un fluide par échange calorifique avec de l'eau ou de l'air, de manière à abaisser la température de ce fluide à la température ambiante.

L'unité de verre a couche se dispose d'un système de refroidissement qui permet de maintenir une température adéquate pour un bon fonctionnement des éléments de cette unité (cathodes, unité de courant, compresseur, ventilateur des chambres de pompage). En raison des différents niveaux de température, les circuits consommateurs qui doivent être refroidis sont partagés en deux groupes :

1. les cathodes avec 40°C de température de départ.
2. les unités de courant avec 28°C de température de départ.
3. le compresseur avec 38 °C de température de départ.
4. les ventilateurs des chambres de pompage avec 19 °C température départ.

Le circuit cathodique tout comme celui des unités de courant sont refroidis par un même système. Ce système de refroidissement se divise à son tour en deux circuits, un partant du circuit de la tour de réfrigération, l'autre partant du circuit du groupe d'eau glacée. Ces deux circuits se particularisent de part leurs différents niveaux de température.

5. Le circuit de l'échangeur de chaleur avec 35°C de température de départ.
6. le circuit du groupe d'eau glacée avec 19°C de température de départ.

Les circuits consommateurs et frigorifiques sont séparés les uns des autres par des échangeurs de chaleur à plaques. Ceci est nécessaire car de l'eau distillée coule dans circuits consommateurs et un mélange eau/glycol coule dans les circuits frigorifiques. L'eau de refroidissement dans le circuit de la tour de réfrigération circule au moyen de pompes CT.

L'eau réchauffée par les circuits consommateurs est alors transportée dans les tours de réfrigération situées à l'extérieur et y est refroidie.

L'eau refroidie des circuits coule vers les appareils à plaques du circuit cathodique (HE1/HE2) et de celui des unités de courant (HE3). Si la température dans les circuits consommateurs est plus élevée que la valeur souhaitée et si celle se trouvant dans le circuit de la tour de réfrigération est moindre que celle dans les circuits des récepteurs, la vanne de réglage s'ouvre alors et refroidit le circuit consommateur à la température voulue.

Dans le circuit des unités de courant, l'échangeur de chaleur HE4 est enclenché après l'échangeur de chaleur HE3. Cet appareil à plaques est refroidi par le circuit du groupe d'eau glacée. Si la température dans le circuit des unités de courant, après l'échangeur de chaleur HE3, n'a pas atteint la valeur souhaitée (performance des tours de réfrigération ne suffit pas), le groupe d'eau glacée se met en marche. Dans ce circuit, l'eau froide est préparée avec un niveau de température moindre. Si la température derrière l'échangeur de chaleur HE3 (TIC P2) est plus élevée que la valeur souhaitée, la vanne de réglage Y CH1 se libère et l'appareil à plaques HE4, selon le réglage donné, traverse et refroidit le circuit des unités de courant.



**Fig.I.13** : Station de refroidissement pour l'unité verre à couche

**b. Pompe de refoulement d'eau de la station :**

La circulation d'eau de la station de refroidissement verre les équipements de l'unité verre a couche qui ont besoins d'être refroidis pour accomplir leur fonctions, ce fait grâce a trois pompe centrifuge monobloc (Etachrom BC 065-250/3002 C11 ). Ces trois pompes ne travaillent pas toute au même temps, car il ya un programmeur automatique qui fait travailler deux pompe au même temps alors que la troisième se repose et cela se fait en cycle de 24heures (tous les 24h ya une pompe qui s'arrête et l'autre prend le relai).



**Fig.I.14** : les pompes de refoulement de la station

## **Conclusion :**

Dans ce chapitre, un bref aperçu sur l'entreprise Mediterranean float glass de CEVITAL est présenté, ainsi que des notions élémentaires sur l'industrie du verre.

L'une des unités les plus importantes de l'entreprise, celle du verre à couche, est concernée principalement par cette étude. En effet, au niveau de cette unité, une rupture d'un conduit de refroidissement cause répétitivement un arrêt du processus.

### **II.1-Définition d'une pompe :**

Une pompe est un dispositif permettant d'aspirer et de refouler un fluide. La plus ancienne pompe connue est la pompe à godets inventée en Chine au 1<sup>er</sup> siècle après J.-C.. Les pompes modernes ont été développées à partir du XVIII<sup>e</sup> siècle. Les pompes diesel et électriques, utilisées de nos jours, peuvent avoir des débits de pompage très élevés. En basse pression pour la circulation de l'eau et en haute pression plus de 400 bars pour l'oléohydraulique.

### **II.2. Historique de la pompe :**

Le principe de la pompe est apparu dès que l'homme a su construire un habitat artificiel pour se protéger des éléments naturels.

Le besoin en eau nécessaire à sa survie l'obligea à trouver un système de transport de cette eau, du puits ou de la rivière à son habitat, il utilisa simplement l'énergie développée par ses muscles pour transporter l'eau à l'aide de récipient naturel ou artificiel, plus la contenance et la distance étaient grande plus l'énergie dépensée était importante. Jusqu'au début de l'ère industrielle (fin du XVIII<sup>e</sup> siècle) des pompes ne servirent que pour le transfert de l'eau.

Les Grecs et les Romains furent les premiers à utiliser des systèmes rotatifs pour véhiculer l'eau.

Tous ces systèmes étaient utilisés pour relever l'eau dans des aqueducs alimentant les villes et les bains. Les Grecs et les Romains furent parmi les premiers à poser les bases de l'hydraulique.

À la grande époque de la culture gréco-romaine de nombreux principes de physique et d'hydraulique furent découverts, mais jamais développés. Les besoins économiques de cette

époque ne nécessitaient pas une mécanisation de l'outil de production. L'énergie nécessaire à la production était fournie par une main-d'œuvre presque gratuite (les esclaves). Cependant dès cette époque les principes des pompes à piston, des pompes centrifuge et des pompes à vide furent découverts. Les réalisations mettant en œuvre ces principes ne servaient cependant qu'à la démonstration des calculs mathématiques (jeux d'intellectuels) ou aux divertissements (Fontaine, jeux d'eau, tours de magie etc.), les écluses (afin d'éviter les vitesses d'écoulement trop rapide), anti-béliers sur les conduites fermées (afin d'éviter l'éclatement des conduites) etc.

Il faudra attendre la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle pour que les premières pompes soient réellement construites et utilisées de façon industrielle.

Jusqu'au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle les besoins économiques étaient satisfaits par la croissance démographique qui fournissait une main-d'œuvre bon marché, le moulin à eau restait le principal moyen de production d'énergie. L'explosion démographique dans la deuxième partie du XVIII<sup>e</sup> siècle obligea l'outil de production à se mécaniser.

L'apparition de la machine à vapeur (Denis Papin) améliorée par l'anglais James Watt permit la mécanisation des secteurs industriels où les besoins étaient en pleine expansion (coton, charbon). Le besoin constant de minerai de charbon apparu avec le développement de l'ère industrielle obligeant la recherche de celui-ci à des profondeurs qui ne permettaient plus le travail à ciel ouvert. Les infiltrations d'eau noyant de façon continue les galeries souterraines, on utilisa alors de façon régulière des pompes pour évacuer cette eau. Il s'agit probablement là de la première utilisation industrielle des pompes. Il s'agissait en fait de pompes à piston, machine dont l'énergie provenait de la vapeur produite par de l'eau chauffée par un foyer, ce foyer ouvert provoquait régulièrement des incendies dans les galeries (peut-être l'origine du nom pompe à feu ?).

C'est toujours le besoin en énergie, cette fois électrique qui permet une seconde évolution dans la technique des pompes de faire son apparition.

L'énergie électrique permet le développement des pompes à principe rotatif, turbine et centrifuge pour alimenter les alternateurs des centrales dont les plus gros modèles furent réalisés par les Suédois, en fait depuis près d'un siècle aucun grand principe de pompe ne fut découvert. Seuls les matériaux utilisés et la précision d'usinage permirent aux pompes d'évoluer vers de meilleurs rendements, de plus grand débit et de plus haute pression. Le seul fait d'utiliser un liquide pour la fabrication où les besoins de la fabrication d'un produit impliquent nécessairement l'utilisation de pompes.

Les pompes répondent toutes au même besoin, déplacer un liquide d'un point à un autre, pour déplacer ce liquide il faut lui communiquer de l'énergie, les pompes remplissent cette fonction, le moteur qui alimente les pompes transforme l'énergie thermique ou électrique en énergie pour permettre le mouvement des organes des pompes, cette énergie mécanique est retransmise au fluide. Cette énergie fluide se traduit sous forme de débit (énergie cinétique) et de pression (énergie potentielle), ces énergies vont s'échanger et se consommer dans les circuits de l'installation.

### **II.3. classification des pompes :**

Il existe différentes pompes qui peuvent se classer en deux grandes familles :

- Les pompes centrifuges
- Les pompes volumétriques

L'utilisation d'un type de pompes ou d'un autre dépend des conditions d'écoulement du fluide. De manière générale, si on veut augmenter la pression d'un fluide on utilisera plutôt

les pompes volumétriques, tandis que si on veut augmenter le débit on utilisera plutôt les pompes centrifuges.

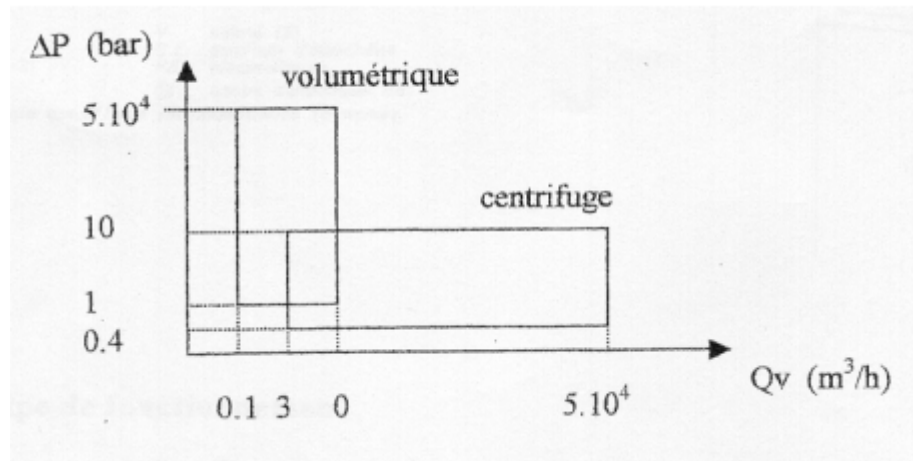


Fig.II.1 : l'écoulement du fluide selon les deux types de pompe

### II.3.1. Les pompes volumétriques :

On distingue deux grandes types de pompes volumétriques :

#### II.3.1.1 Les pompes alternatives ou à piston :

Les pompes à piston constituent l'un des plus anciens types de pompes et demeurent parmi les plus répandues. Comme son nom l'indique la pompe à piston utilise les variations de volumes occasionnées par le déplacement d'un piston dans un cylindre.

Ces machines ont donc un fonctionnement alternatif et nécessite un jeu de soupapes ou de clapets pour obtenir l'aspiration dans le cylindre et le refoulement.

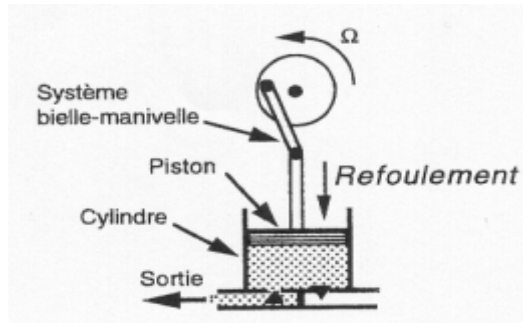


Fig.II.2 : pompe a piston

### II.3.1.2 Les pompes rotatives :

Le principe de ces pompes est le suivant : Deux rotors tournent en roulant l'un sur l'autre sans glisser pour éviter les frottements et déplacent un volume de fluide.

Il existe différentes pompes rotatives:

- Pompes à engrenages.
- Pompes à lobes.
- Pompes à vis.
- Pompes à rotor hélicoïdal excentré.
- Pompes à palettes rigides ou souples.
- Pompes péristaltiques.

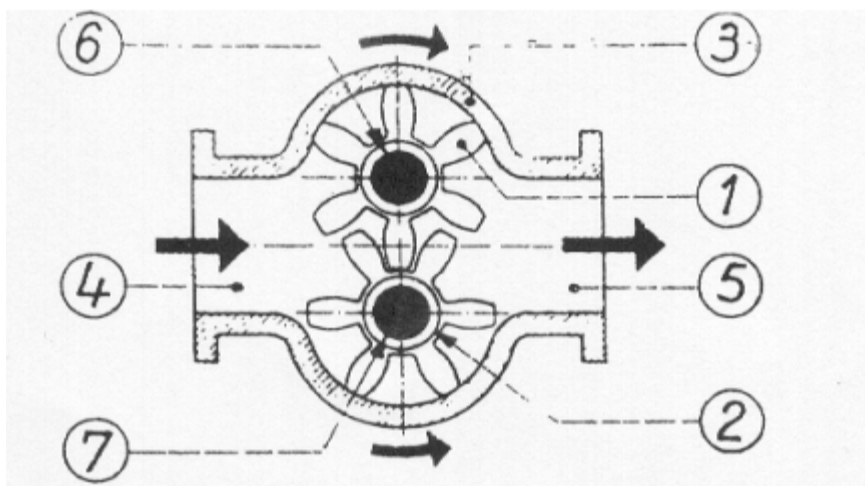


Fig.II.3 : pompe a engrenage

Les différents éléments de la pompe à engrenage :

| numéros | éléments               |
|---------|------------------------|
| 1       | Roue denté             |
| 2       | Roue denté             |
| 3       | Corps de la pompe      |
| 4       | Orifice d'aspiration   |
| 5       | Orifice de refoulement |
| 6       | Axe moteur             |
| 7       | Axe fou                |

**Tableau .II.1** : éléments de la pompe à engrenage.

### **II.3.1.3. Avantages et inconvénients des pompes volumétriques :**

#### **a. Avantages :**

- Construction robuste.
- Pompage possible de liquide très visqueux.
- Rendement élevé.
- Obtention de faibles débits facile à mesurer sous pression élevée (pompes doseuses alimentaires).

#### **b. Inconvénients :**

- Appareils plus lourds et plus encombrants.
- Impossibilité d'obtenir de gros débits sous faible pression.
- Danger de surpression dans le circuit de refoulement d'où la présence indispensable de sécurités (soupape de sûreté).
- Prix d'achat plus élevé.
- Frais d'entretien plus élevés.

### **III.3.2. les pompes centrifuges :**

#### **III.3.2.1. définition :**

Une pompe centrifuge est une machine rotative qui pompe un liquide en le forçant au travers d'une roue à aube ou d'une hélice appelée impulseur. C'est le type de pompe industrielle le plus commun. Par l'effet de la rotation de l'impulseur, le fluide pompé est aspiré axialement dans la pompe, puis accéléré radialement, et enfin refoulé tangentiellement.



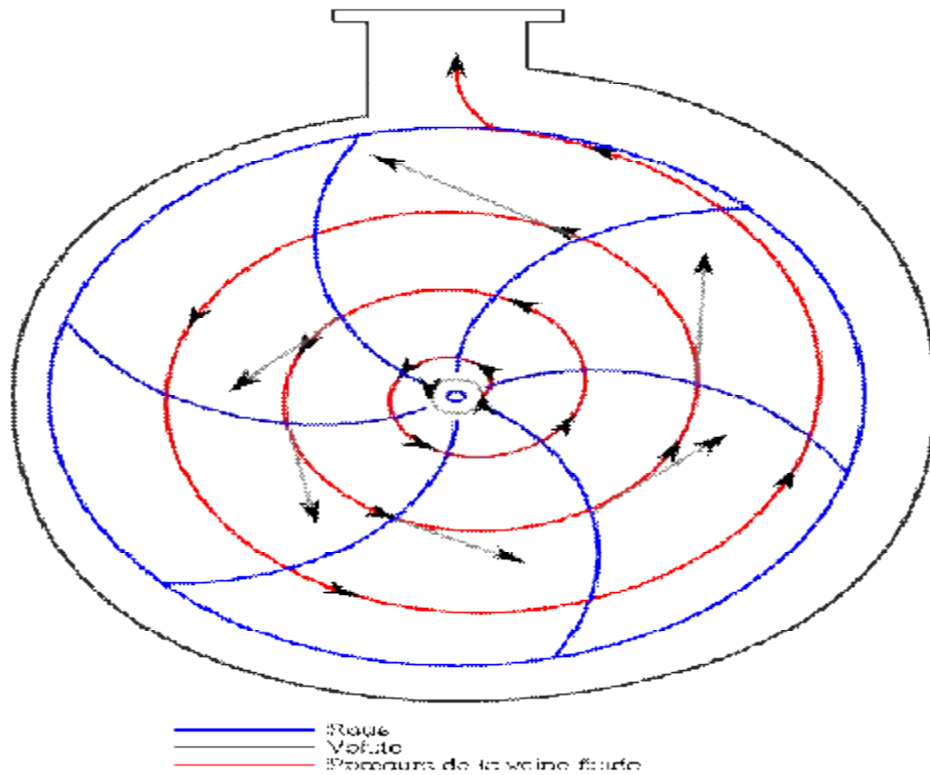
**Fig.II.4 :** pompe centrifuge monobloc

#### **III.3.2.2. Principe de fonctionnement :**

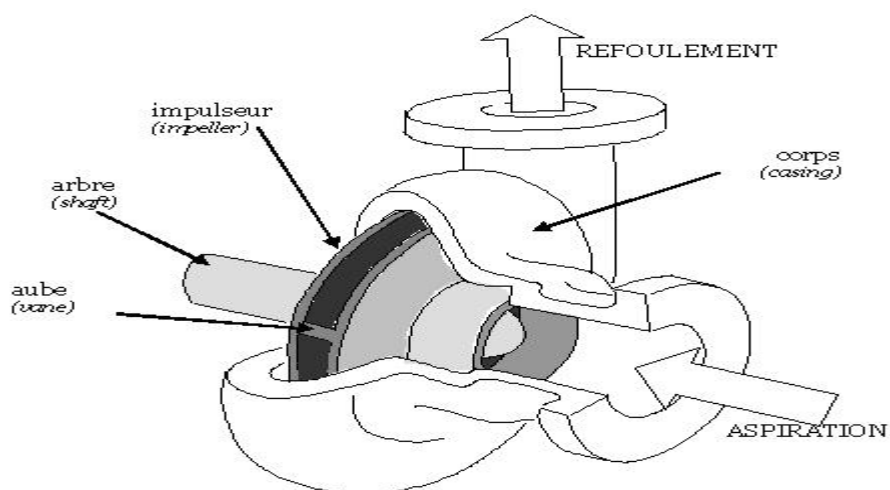
Une pompe centrifuge accélère le fluide qui la traverse en lui communiquant un mouvement de rotation, donc une certaine puissance hydraulique.

Cette énergie hydraulique peut être vue comme la somme d'une énergie cinétique déterminée par le mouvement liquide dans le tube et d'une énergie potentielle stockée soit

sous la forme d'un accroissement de pression soit sous celle d'une augmentation de hauteur (théorème de Bernoulli).



**Fig.II.5** : principe de fonctionnement de la pompe centrifuge



**Fig.II.6** : une partie de la pompe centrifuge.

(le circuit du fluide)

La puissance hydraulique fournie par la pompe est donnée par la relation :

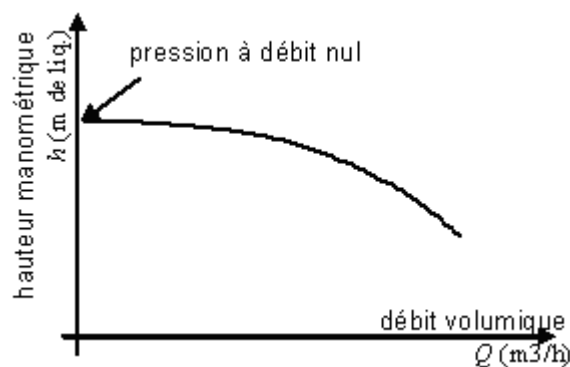
$$W_{\text{hydraulique}} = \rho g Q h$$

Dans laquelle :

- ü  $W_{\text{hydraulique}}$  est exprimée en watts.
- ü  $\rho$  est la masse volumique du liquide (kg/m<sup>3</sup>).
- ü  $g$  est l'accélération de pesanteur soit 9,81 m/s<sup>2</sup>.
- ü  $Q$  est le débit volumique du liquide exprimé en m<sup>3</sup>/s.
- ü  $h$  est la hauteur manométrique de la pompe exprimée en mètres.

La hauteur manométrique est la hauteur d'une colonne de liquide qui déterminerait une pression statique égale à la pression de refoulement.

Le terme  $Q \cdot h$  est souvent appelé charge hydraulique.



**Fig.II.7** : Courbe caractéristique hauteur-débit volumique

Cette courbe caractéristique est le plus souvent décroissante : la pression diminue quand le débit augmente, et prend une forme grossièrement parabolique.

On appelle puissance à l'arbre la puissance mécanique requise pour faire fonctionner la pompe. On a donc la relation :

$$W_{\text{hydraulique}} = \eta W_{\text{à l'arbre}}$$

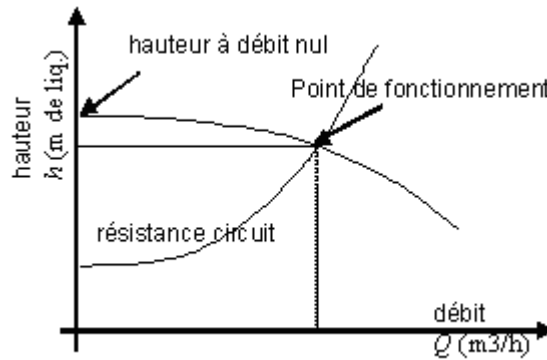


Fig.II.8 : le point de fonctionnement de la pompe centrifuge

Le rendement varie en fonction du point de fonctionnement, et dépend également de la machine. Pour les machines usuelles, il se situe le plus souvent entre 70 % et 90 %.

Une pompe centrifuge ne délivre ni une quantité de liquide fixée, ni une pression déterminée : le point de fonctionnement est déterminé par la résistance du circuit connecté à la pompe.

### II.3.2.3 Avantages et inconvénients des pompes centrifuges :

#### a. Avantages :

- Ces machines sont de construction simple et demande peu d'entretien.
- Prix modérés et coût de maintenance faible.
- Matériaux de construction très variés.
- Pompes compactes et peu encombrantes.
- Bons rendements.
- Le débit est continu.
- En cas de dysfonctionnement du circuit de refoulement, la pompe ne subit aucun dommage.

#### b. Inconvénients :

- Elle ne fonctionne avec des fluides trop visqueux.
- Elle nécessite des dispositifs d'équilibrage.



La désignation des pièces de la pompe centrifuge dans le tableau suivant :

| Repère   | Désignation de la pièce | Repère   | Désignation de la pièce |
|----------|-------------------------|----------|-------------------------|
| 101      | Corps de pompe          | 523      | Chemise d'arbre         |
| 132      | Pièce intermédiaire     | 68-3     | Plaque de recouvrement  |
| 163      | Fond de refoulement     | 80113    | Moteur à bride          |
| 210      | Arbre                   | 901.1/.3 | Vis à tête hexagonale   |
| 230      | Roue                    | 902.1/.2 | Goujon fileté           |
| 341      | Lanterne d'entraînement | 903.1    | Bouchon fileté          |
| 400.1    | Joint plat              | 914      | Vis à tête cylindrique  |
| 411.3    | Joint circulaire        | 920.1-.5 | Écrou                   |
| 412.1    | Joint torique           | 930.1    | Frein d'écrou           |
| 433      | Garniture mécanique     | 931      | Tôle-frein d'écrou      |
| 502.1/.2 | Bague d'usure           | 940.2    | Clavette                |
| 515      | Bague de serrage        | 6B       | Vidange liquide pompé   |

**Tableau.II.2** : la désignation des pièces de la pompes centrifuge.

**II.4.2. Caractéristiques de fonctionnement de la pompe :**

Les caractéristiques de fonctionnement de cette pompe centrifuge sont :

| <b>Liquide pompé</b>              | <b>Eau entièrement déminéralisée<br/>Matériaux sans agression<br/>chimique ou mécanique</b> |
|-----------------------------------|---|
| Température liquide pompé         | 40,0 °C   |
| Densité liquide pompé             | 992 kg/m <sup>3</sup>   |
| Viscosité liquide pompé           | 0,66 mm <sup>2</sup> /s   |
| Débit                             | 97,01 m <sup>3</sup> /h   |
| Débit massique                    | 26,73 kg/s  |
| Hauteur manométrique totale       | 73,01 m   |
| Rendement                         | 73,0 %  |
| Puissance absorbée                | 26,21 kW  |
| Vitesse de rotation pompe         | 2950 rpm  |
| Pression de service admissible    | 12,00 bar.r   |
| Pression de refoulement           | 7,10 bar.r  |
| Puissance max. courbe             | 34,25 kW  |
| Débit min. admissible             | 16,75 m <sup>3</sup> /h   |
| Débit massique min.<br>admissible | 4,61 kg/s   |
| Hauteur à débit nul               | 85,58 m   |

**Tableau.II.3 :** les caractéristiques de fonctionnement de la pompe.

### **II.4.3. Entraînement, accessoires de la pompe :**

Dans le tableau suivant on a identifier le compartiment moteur et ces caractéristiques de fonctionnements :

|                                   |                        |
|-----------------------------------|------------------------|
| Type d'entraînement               | Moteur électrique      |
| Type de construction moteur       | V15                    |
| Taille moteur                     | 200L                   |
| Fréquence                         | 50 Hz                  |
| Tension de service                | 400 V                  |
| Puissance nominale P2             | 30,00 kW               |
| Courant nominal                   | 52,0 A                 |
| Nombre de pôles                   | 2                      |
| Type de couplage                  | triangle               |
| Méthode de refroidissement moteur | Ventilation extérieure |
| Matériau moteur                   | Aluminium              |

**Tableau.II.4 :** les caractéristiques de fonctionnements du compartiment moteur.

### **II.4.4. Exécution :**

La pompe centrifuge utilisé dans l'unité de refroidissement est exécuter selon les normes indiquer dans le tableau suivant :

|  |                       |
|--|-----------------------|
| Norme de pompe                         | EN 733                |
| Exécution                              | Construction monobloc |
| Mode d'installation                    | Horizontal            |
| Diamètre nominal tubulure d'aspiration | DN 80                 |

|   |  |
|---|--|
| Pression nominale tubulure d'aspiration | PN 16  |
| Position tubulure d'aspiration          | axial  |
| Norme de raccordement Aspiration        | EN 1092-2  |
| Diamètre nominal Refoulement            | DN 65  |
| Pression nominale Refoulement           | PN 16  |
| Position bride de refoulement           | en haut (0°/360°)  |
| Norme de bride de Refoulement           | EN 1092-2  |
| Étanchéité d'arbre                      | GM à simple effet  |
| Fabricant                               | KSB  |
| Type                                    | 1  |
| Code matériau                           | BQ1EGG   |
| Mode de fonctionnement                  | A Garniture mécanique simple (couvercle A)   |
| Qualité de l'eau                        | conductivité > 10 µS/cm < 250 µS/cm, teneur en SiO <sub>2</sub> < 10 mg/l et teneur en substances solides 5mg/l max. |
| Chambre de garniture                    | Chambre d'étanchéité conique (couvercle A)   |
| Calculé pour pression d'aspiration      | 0,00 bar.r   |
| Montage de pompe sans Silicone          | Oui  |
| Type de palier                          | Construction monobloc  |
| Taille lanterne de palier               | WE35   |
| Type de palier                          | Paliers à roulements   |
| Type de lubrification côté entraînement | Graisse  |
| Couleur                                 | bleu d'outremer (RAL 5002)   |

**Tableau.II.5** : les normes d'exécution de la pompe centrifuge.

**II.4.5. Matériaux :**

Dans le tableau suivant sont listé les matériaux des différents éléments de la pompe centrifuge :

|   |                     |
|---|---------------------|
| Corps de pompe (101)<br>Fond de refoulement (163)<br>Arbre (210)<br>Bague d'usure (502.1)<br>Bague d'usure (502.2)<br>Chemise d'arbre (523) | Acier CrNiMo 1.4571 |
| Roue (230)  | Acier CrNiMo 1.4408 |
| Joint torique (412.1)   | EPDM 70/80          |
| Vis à tête hexagonale (901.1)   | Acier 8.8 A 2A      |
| Bouchon fileté (903.1)  | Acier CrNiMo A4     |

**Tableau.II.6 :** les matériaux utilisés dans la conception de la pompe.

**II.4.6. les caractéristiques de l'acier CrNiMoTi 1.4571 :**

le tableau suivant représente les caractéristiques de l'acier dont la bride de refoulement est conçu :

| Désignation               | Numéro du matériau      | $R_e$<br>(MPa) | $R_{e0.2}$<br>(MPa) | $R_{e1}$<br>(MPa) | $R_m$<br>(MPa) |
|---------------------------|-------------------------|----------------|---------------------|-------------------|----------------|
| X6<br>CrNiMoTi<br>17 12 2 | 1.4571 (AISI<br>316 Ti) | 200            | 240                 | 260               | 520            |

**Tableau.II.7 :** les propriétés mécanique de l'acier 1.4571

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre nous venons d'identifier d'une manière très rapide le principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge.

Les caractéristiques de cette pompe sont complètement identifiées et serviront en majorité à procéder au calcul de résistance nécessaire pour l'identification du problème de rupture du conduit de refoulement.

### **III.1. Introduction :**

Le comportement mécanique relève de la réponse du matériau lorsqu'une force lui est appliquée. Sous contrainte un matériau peut soit se déformer soit se rompre. Le type de déformation engendrée dépend de l'intensité de la contrainte.

Lorsqu'elle est inférieure à une certaine valeur, la déformation est élastique: le matériau retrouve sa forme originale lorsque la contrainte est levée. Si le retour vers la forme initiale prend un certain temps après l'annulation de la contrainte on parle d'effet anélastique ou viscoélastique.

Des contraintes plus élevées peuvent mener à une déformation plastique: le matériau ne retrouve pas sa forme originale lorsque la contrainte est supprimée.

A une température constante, une déformation plastique peut se développer avec un certain retard même dans le domaine élastique, cet effet est appelé fluage.

A plus forte contrainte on assiste à la rupture. Si la rupture intervient avant que le matériau n'ait subi une large déformation plastique on parle de rupture fragile, dans le cas contraire il s'agit d'une rupture ductile.

### **III.2. Propriétés mécaniques des matériaux :**

#### **III.2.1. Propriétés d'usage :**

Elles peuvent être séparées en deux catégories:

- celles qui font l'objet d'une garantie:  $R_m$ ,  $R_e$ ,  $A$ , à 20°C, ou la limite élastique à chaud  $R_p^t$ , la résilience à température donnée  $K_c$ .
- celles données à titre indicatif: résistance au fluage (allongement donné, de 0,5 ou 1% à

température donnée, en un temps donné : 10000 ou 100000 heures ), à la fatigue (limite d'endurance dépendant de nombreux facteurs pour  $10^7$  cycles pour les aciers).

### III.2.2. Essai de Traction :

Il consiste à imposer un allongement à une éprouvette de section initiale  $S_0$  et de longueur utile  $L_0$ . La courbe type obtenue pour un matériau ductile est la suivante:

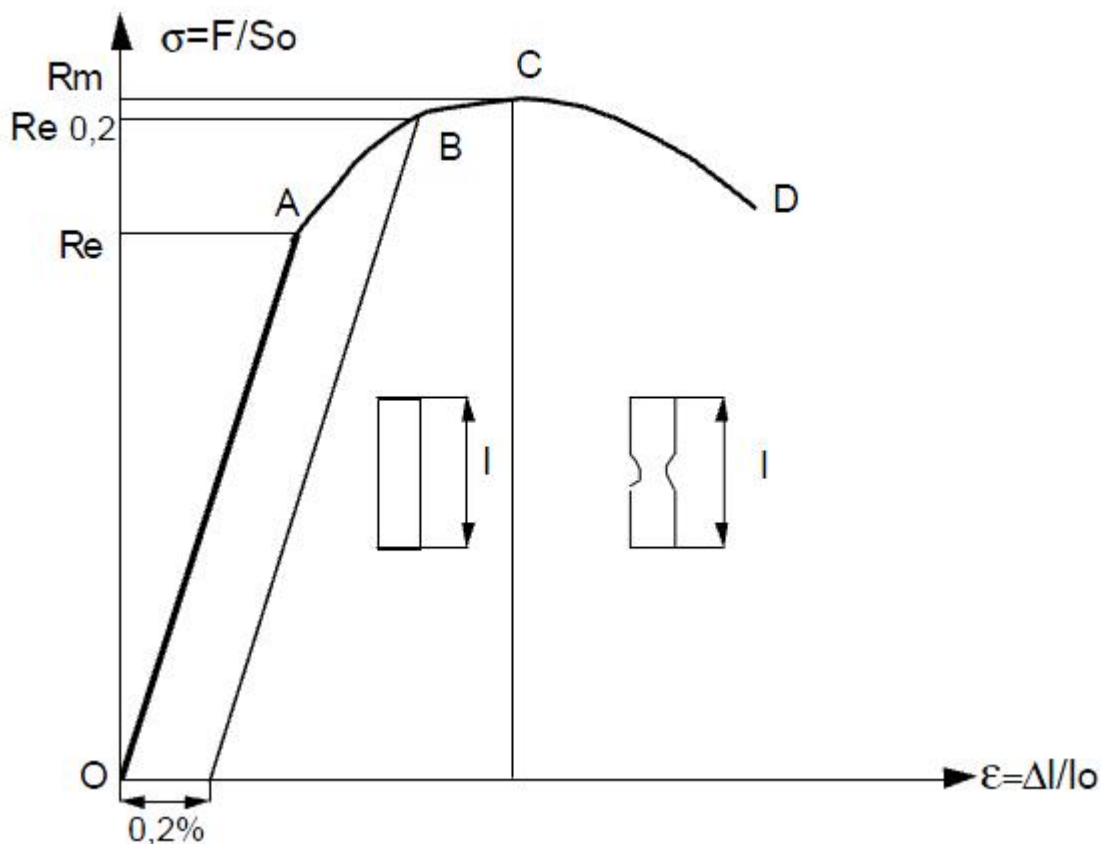


fig.III.1 : courbe de traction.

La droite OA correspond à la déformation élastique réversible.

La courbe AC est le domaine de déformation plastique homogène: si on supprime la force de traction, il y a un retour élastique suivant une parallèle à OA et il reste une déformation permanente.

Pour CD, la force nécessaire pour déformer le matériau diminue alors que l'allongement

continue d'augmenter, cette instabilité est appelée instabilité plastique. La striction apparaît. En D il y a rupture de l'éprouvette.

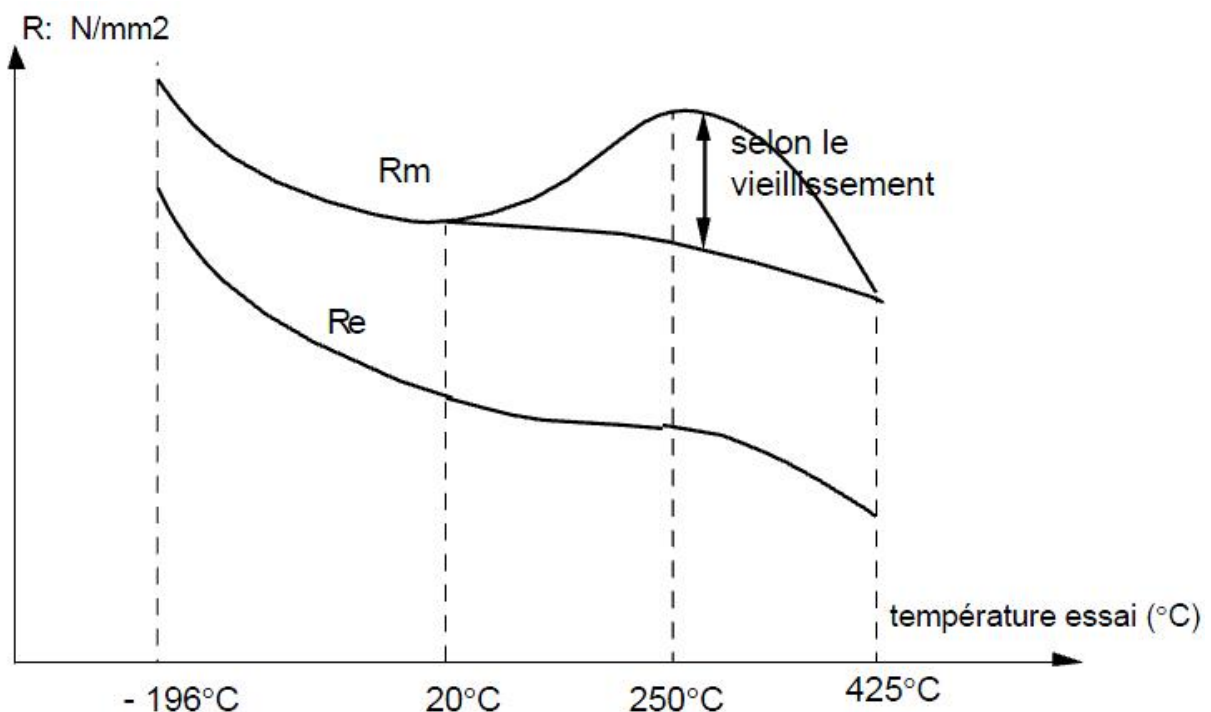
$R_e$  (MPa) est la limite de proportionnalité ou limite élastique. Elle est bien marquée pour les matériaux ductiles.  $R_e$  correspond au seuil d'écoulement plastique.

$R_m$  est la résistance limite à la traction. Cette valeur est utilisée pour estimer la limite d'endurance.

$R_e$  est atteinte quand on observe la première chute de l'effort lors de l'essai. En l'absence de ce phénomène, quand OA n'est pas rectiligne, on doit utiliser la limite conventionnelle d'élasticité  $R_{e0,2}$  qui correspond à un allongement plastique de 0,2%.

### **III.2.3. Influence de la température sur $R_e$ et $R_m$ :**

Les définitions de  $R_e$  ou  $R_m$  sont conventionnelles car elles dépendent de la section initiale de l'éprouvette (surtout  $R_m$ ), de la qualité de l'extensomètre ( $R_e$ ), de la vitesse de mise en charge et de la température d'essai: ce ne sont pas des contraintes vraies.



**Fig.III.2 :** Evolution de  $R_e$  et  $R_m$  pour un acier en fonction de la température

### III.2.4. Autres caractéristiques mécaniques: A, E, G, n

#### variations en fonction de la température :

##### a. allongement à la rupture A :

L'allongement à la rupture est le rapport :

$$A = 100 \cdot (L_d - L_0) / L_0 \quad (\text{III.1})$$

où  $L_d$  est la longueur de l'éprouvette à la rupture en D.

##### b. module d'Young E:

La pente de la partie linéaire OA (Figure 1) représente le module d'Young  $E$  (en Mpa ou en GPa) ou module d'élasticité.

On appelle loi de Hooke la relation :

$$\sigma_{\text{élastique}} = E \cdot \varepsilon_{\text{élastique}} \quad (\text{III.2})$$

La mesure de  $E$  est obtenue à l'aide d'un extensomètre. Le module d'Young à 20°C va de 4 Mpa pour le caoutchouc à 500 GPa pour les céramiques (SiC).

Cette variation importante est due aux intensités très variables des forces de liaison entre les atomes ou molécules au sein des matériaux: liaisons covalentes, ioniques.

La rigidité d'une structure en traction, compression, flexion, est proportionnelle au module d'Young. La valeur de ce dernier, pour les matériaux isotropes, est indépendante de la direction de l'effort.

Par contre, pour les matériaux anisotropes, tels les stratifiés, les composites orientés, les monocristaux,  $E$  varie avec l'orientation.

$E$  décroît quand la température augmente : environ  $10^{-4}$  par degré pour les métaux, les céramiques et les verres. Il varie de façon beaucoup plus importante en fonction de la température dans le cas des polymères et des composites à matrice organique.

**c. Valeur spécifique du module :**

Il est intéressant d'utiliser le rapport du module et de la densité du métal. La valeur de  $E/\rho$  est la valeur spécifique du module: c'est un indice de performance qui tient compte de la déformation élastique et de l'allègement.

Les métaux peuvent être classées en deux catégories :

- aluminium, fer, magnésium, titane (les plus performants)

$$26 < E/\rho < 27 \text{ (en } 10^9 \text{ N.mm.Kg}^{-1}\text{)}$$

- cuivre et zinc (les moins performants)

$$14 < E/\rho < 15$$

**d. coefficient de Poisson n :**

le coefficient de Poisson (aussi appelé coefficient *principal* de Poisson) permet de caractériser la contraction de la matière perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué.

$$n = (L_0 - L) / L_0 \quad (\text{III.3})$$

Le coefficient de Poisson fait partie des constantes élastiques. Il est compris entre -1 et 0,5 . 0,5 est la valeur limite pour un corps chauffé devenant alors liquide (incompressible).

**e. module de cisaillement G :**

Le module de cisaillement **G** ou module de Lamé ou module de Coulomb, exprimé en Mpa ou Gpa, définit le cisaillement élastique consécutif à l'application d'une sollicitation de cisaillement.

Il varie sensiblement comme E en fonction de la température et le type de matériau.

Pour les matériaux isotropes, on a la relation :

$$G = E / 2(1 + n) \quad (\text{III.4})$$

**f. La résilience :**

La résilience est la capacité d'un matériau à absorber de l'énergie quand il se déforme sous l'effet d'un choc (déformation rapide). Il est utile de distinguer les matériaux métalliques, ou fragiles, des matériaux de type élastomères.

Dans le cas des matériaux "cassants" (aciers par exemple), la résilience est caractérisée par l'énergie nécessaire pour déformer et rompre le matériau lors d'un choc par un objet percuteur. Dans le cas des matériaux de type élastomères, l'éprouvette n'est pas rompue, la résilience est caractérisée par la proportion d'énergie restituée à l'objet percuteur qui rebondit à la suite du choc.

**g. La ténacité :**

C'est une caractéristique, à la base du concept de tolérance au dommage dans les structures, qui est basée sur la formulation des contraintes et déplacements au voisinage d'une fissure de géométrie connue. Le chargement est statique ou dynamique.

Ces conditions déterminent le facteur d'intensité de contraintes  $K$ , calculé, qui caractérise l'accroissement des contraintes et des déformations provoqué par la fissure.

La ténacité  $K_c$ , est déterminée expérimentalement au moyen d'éprouvettes pré-fissurées.

Elle correspond à la valeur critique de  $K$  pour laquelle se produit une propagation brutale d'une fissure de longueur  $a_c$  sous une charge  $P_c$ .

$K_d$  est la ténacité dynamique qui correspond à la valeur critique de  $K$  sous un choc.

### **III.3. Comportement élastique des matériaux :**

En langage courant, le terme élastique implique un retour à la configuration de référence. On peut dire ainsi qu'un milieu élastique est doué d'une «mémoire particulière» lui permettant de ne se « souvenir » que de cette configuration à laquelle il revient dès que les sollicitations auxquelles il a été soumis sont annulées. Cependant, le comportement élastique peut être linéaire ou non linéaire.

Il correspond à de petits déplacements réversibles des atomes autour de leur position d'équilibre dans le réseau cristallin. Sous l'action d'une force, les atomes s'écartent. Une réaction due aux forces de liaison tendant à les rapprocher provoque la réaction.

#### **III.3.1. Loi de comportement élastique :**

##### **a. Loi élastique linéaire et homogène :**

Chacune des six composantes  $\sigma_{ij}$  du tenseur des contraintes s'écrit donc comme combinaison linéaire des 6 composantes des déformations :

$$\sigma_{ij} = C_{ij}^{11} \varepsilon_{11} + C_{ij}^{22} \varepsilon_{22} + C_{ij}^{33} \varepsilon_{33} + C_{ij}^{12} \varepsilon_{12} + C_{ij}^{23} \varepsilon_{23} + C_{ij}^{31} \varepsilon_{31} \quad (\text{III.5})$$

où les  $C_{ij}^{kl}$  sont 6 constantes matérielles. Une *loi d'élasticité linéaire et homogène* fait donc intervenir 6×6 constantes. Si l'on fait l'hypothèse d'*isotropie* (la loi s'écrit dans tout référentiel sous la même forme) on montre que la loi ne fait plus intervenir que deux constantes distinctes. Cette loi porte alors le nom de loi de Hooke.

##### **b. Loi de Hooke donnant les contraintes :**

On l'écrit sous la forme :

$$\sigma_{ij} = 2G \varepsilon_{ij} + \lambda (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \delta_{ij} \quad (\text{III.6})$$

Ou encor :

$$\bar{\sigma} = 2G \bar{\varepsilon} + \lambda \text{tr}(\bar{\varepsilon}) \bar{I} \quad (\text{III.7})$$

Les constantes matérielles  $\lambda$  et  $G$  sont les constantes de Lamé.

**c. Loi de Hooke donnant les déformations :**

Pour exprimer les déformations, l'écriture précédente peut s'inverser sous la forme :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+n}{E} \sigma_{ij} - \frac{n}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \delta_{ij} \quad (\text{III.8})$$

Ou encor :

$$\bar{\bar{\varepsilon}} = \frac{1+n}{E} \bar{\bar{\sigma}} - \frac{n}{E} \text{tr}(\bar{\bar{\sigma}}) \bar{\bar{I}} \quad (\text{III.9})$$

Les deux constantes matérielles  $E$  et  $\nu$  sont, respectivement, le module de Young et le coefficient de Poisson.

**d. Relation entre les déviateurs :**

En prenant la partie *déviatorique* des deux relations précédentes on a :

$$\text{dev}(\bar{\bar{\sigma}}) = 2G \text{dev}(\bar{\bar{\varepsilon}}) \quad (\text{III.10})$$

$$\text{dev}(\bar{\bar{\varepsilon}}) = \frac{1+n}{E} \text{dev}(\bar{\bar{\sigma}}) \quad (\text{III.11})$$

ce qui montre que les déviateurs des contraintes et des déformations sont proportionnels et que la constante  $G$  (module de cisaillement) est donnée par :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{III.12})$$

**e. Relation entre pression moyenne et dilatation volumique :**

En prenant cette fois-ci la trace de la loi de Hooke on obtient :

$$\text{tr}(\bar{\bar{\sigma}}) = (2G + 3\lambda) \text{tr}(\bar{\bar{\varepsilon}}) \quad (\text{III.13})$$

$$\text{tr}(\bar{\bar{\varepsilon}}) = \frac{1-2\nu}{E} \text{tr}(\bar{\bar{\sigma}}) \quad (\text{III.14})$$

ce qui montre que la pression moyenne  $P_{\text{moy}} = 1/3 \text{tr}(\bar{\mathbf{S}})$  est proportionnelle à la variation relative de volume  $\text{tr}(\bar{\boldsymbol{\varepsilon}})$  :

$$\mathbf{P}_{\text{moy}} = \mathbf{K} \text{tr}(\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}) \quad (\text{III.15})$$

**f. Quelques relations entre  $(\lambda, G), (E, \nu)$  :**

Le module de young en fonction du module de cisaillement et du deuxième coefficient de Lamé est donnée par la relation suivante :

$$\mathbf{E} = \frac{G(3\lambda + 2G)}{\lambda + G} \quad (\text{III.16})$$

Le coefficient de poisson en fonction du module de cisaillement et du deuxième coefficient de Lamé est donnée par la relation suivante :

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + G)} \quad (\text{III.17})$$

Le deuxième coefficient de Lamé en fonction du coefficient de poisson et du module de young est donnée par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (\text{III.18})$$

Le module de cisaillement en fonction du coefficient de poisson et du module de young est donnée par la relation suivante :

$$\mathbf{G} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{III.19})$$

### **III.4. Le comportement plastique des matériaux :**

Le comportement plastique est celui d'un corps solide qui prend des déformations permanentes sans se fissurer. On admet généralement que ces déformations permanentes

se produisent au delà d'un seuil de contrainte appelé seuil de plasticité ou limite d'élasticité.

### III.4.1. Définition :

Le critère de plasticité est la fonction scalaire  $f(s, h)$  telle que :

- si  $f(s, h) < 0$  l'état actuel  $(s, h)$  est intérieur au domaine d'élasticité.

-si  $f(s, h) = 0$  l'état actuel se situe sur la frontière du domaine.

-Un état extérieur au domaine d'élasticité est physiquement impossible à obtenir, le domaine d'élasticité représente donc l'ensemble des états de contraintes admissibles.

Le paramètre d'écrouissage  $h$  caractérise l'évolution de ce domaine en fonction de l'historique du chargement suivi pour obtenir l'état actuel. Sur la figure (fig.III.3) sont schématisés l'évolution avec et sans écrouissage du domaine d'élasticité représenté dans le plan des contraintes  $\sigma_1, \sigma_2$ . Sur les figures (a) et (b),  $OA$  représente l'évolution élastique et  $AB$ , l'évolution plastique. Nous notons  $f_0(s)$ , le critère définissant le domaine d'élasticité initial.

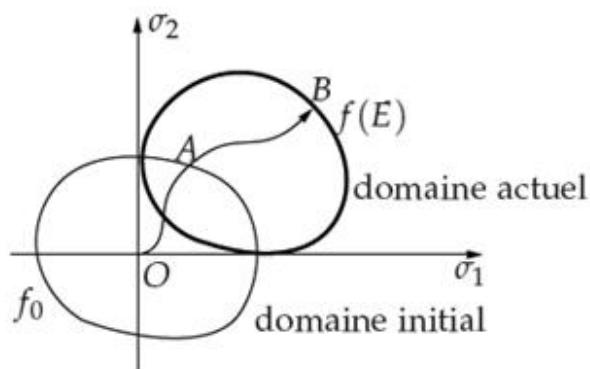


Fig.III.3.a : matériaux élasto-plastique avec écrouissage

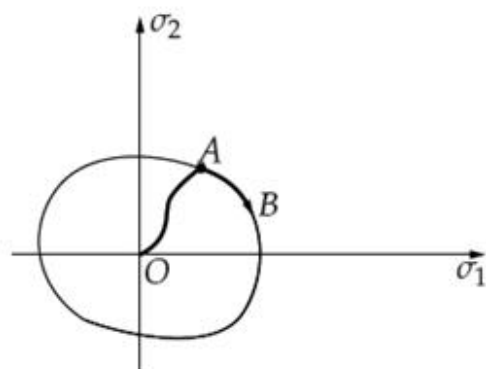


fig.III.3.b : matériaux élasto-plastique parfait

**III.4.2. Propriété :**

$f(\mathbf{s}, h)$  doit respecter les symétries matérielles. Si le matériau est isotrope (dans l'état initial et après déformations élastiques), cette quantité  $f_0(\mathbf{s})$  doit être invariante dans tout changement de base et symétrique des contraintes principales.

En conséquence pour un matériau isotrope,  $f_0(\mathbf{s})$  s'exprime en fonction des seuls invariants de  $\mathbf{s}$ .

Pour rappel, une fonction scalaire d'un tenseur est invariante si sa valeur ne change pas lors d'un changement de base. Le polynôme caractéristique :

$$P = \det(\bar{\mathbf{S}} - l\bar{\mathbf{I}}) \quad (\text{III.20})$$

est un invariant de  $\bar{\mathbf{S}}$ . Tous les coefficients suivants sont des invariants de  $\bar{\mathbf{S}}$  :

$$\mathbf{I}_1 = \text{tr}(\bar{\boldsymbol{\sigma}}) \quad (\text{III.21})$$

$$\mathbf{I}_2 = \frac{1}{2}(\text{tr}^2 \bar{\boldsymbol{\sigma}} - \text{tr} \bar{\boldsymbol{\sigma}}^2) \quad (\text{III.22})$$

$$\mathbf{I}_3 = \det(\bar{\boldsymbol{\sigma}}) \quad (\text{III.23})$$

En plasticité sont utilisés les invariants définis par les traces des premières puissances du tenseur des contraintes :

$$\mathbf{I}_1 = \text{tr} \bar{\boldsymbol{\sigma}} \quad (\text{III.24})$$

$$\mathbf{I}_2 = \text{tr} \bar{\boldsymbol{\sigma}}^2 \quad (\text{III.25})$$

$$\mathbf{I}_3 = \text{tr} \bar{\boldsymbol{\sigma}}^3 \quad (\text{III.26})$$

La représentation de la fonction  $f_0(\mathbf{s})$  dans  $\mathfrak{R}^3$  espace des contraintes principales est une surface pour laquelle, les plans (1, 1, 0), (0, 1, 1), (1, 0, 1) sont des plans de symétrie, et l'axe (1, 1, 1) est un axe de symétrie ternaire.

Les principaux critères de résistance sont :

- pour les matériaux homogènes isotropes : Von Mises (1910), Tresca (1870)
- pour les matériaux orthotropes : Hill (1950)
- pour les sols : Mohr-Coulomb, Drucker-Prager (1950)

Ces critères sont anciens, ils restent cependant largement utilisés car les méthodes d'identification des paramètres caractérisant le comportement élasto-plastique ont fait leurs preuves pour ces critères. Depuis, de nombreux travaux ont permis d'élaborer des critères modélisant mieux le comportement des matériaux. Cependant il reste toujours la difficulté de définir des processus expérimentaux simples et fiables permettant d'identifier les paramètres du modèle que l'on veut utiliser.

### **III.4.3. Les principaux critères :**

#### **a. Critère de Von Mises :**

L'expérience montre que pour les métaux, tout état de contraintes hydrostatique est admissible, c'est-à-dire qu'il appartient au domaine d'élasticité, autrement dit quelque soit la charge, il n'y a pas de déformations plastiques. Par conséquent, le domaine d'élasticité est représenté par un ouvert non borné d'axe (1, 1, 1) dans l'espace des contraintes principales  $\mathfrak{R}^3$ . Il s'avère donc que l'expression du critère  $f_0(\mathbf{s})$  doit être indépendante de la partie sphérique du tenseur des contraintes.

Pour exprimer le critère, nous utilisons donc le tenseur déviateur des contraintes :

$$\bar{\mathbf{s}} = \bar{\boldsymbol{\sigma}} - \frac{1}{3} \text{tr}(\bar{\boldsymbol{\sigma}}) \bar{\mathbf{I}} \quad (\text{III.27})$$

et sa partie sphérique est notée  $\mathcal{S}_s$ . Le critère de Von Mises est la forme la plus simple utilisant le premier invariant non nul du déviateur des contraintes :,

$$I_2(\bar{\mathbf{s}}) = \frac{1}{2} \mathbf{s}_{ij} : \mathbf{s}_{ij} \quad (\text{III.28})$$

Soit la fonction de charge :

$$f_0(\mathbf{s}) = I_2 - k^2 \quad (\text{III.29})$$

Plaçons-nous dans le cas d'un essai de traction :

$$\bar{\bar{\sigma}} = \begin{bmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \bar{\bar{\sigma}}_d = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}\sigma & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3}\sigma & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{3}\sigma \end{bmatrix}$$

d'où :

$$f_0(\mathbf{s}) = \left(\frac{2}{3}s^2\right) - k^2 \quad (\text{III.30})$$

$k$  apparaît comme  $\left(\frac{2}{3}\sigma_0\right)^{1/2}$ , avec  $s_0$  limite élastique en traction.

En pratique, la définition du domaine d'élasticité utilisant le critère de Von Mises est le suivant :

$$\{ \bar{\bar{\sigma}}; (3I_2(\bar{\bar{\sigma}}))^{1/2} - \sigma_s \leq 0 \} \quad (\text{III.31})$$

Le seuil  $s_s$  a la dimension d'une contrainte que l'on peut identifier à  $s_0$  dans le cas de l'essai de traction. La grandeur :

$$s_{VM} = (3I_2)^{1/2} \quad (\text{III.32})$$

est appelée contrainte équivalente de Von Mises. Appliquons le critère de Von Mises à l'essai de cisaillement simple indiqué sur la figure suivante :

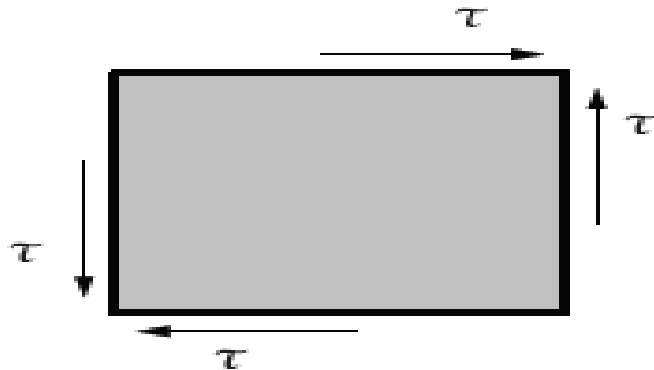


Fig.III.4 : cisaillement simple

Le tenseur de contrainte s'écrit alors :

$$\bar{\bar{\sigma}} = \begin{bmatrix} 0 & \tau & 0 \\ \tau & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \bar{\bar{s}} = \bar{\bar{\sigma}} \quad (\text{III.33})$$

La fonction de charge s'écrit  $f_0(\mathbf{S}) = (3\tau^2 - \sigma_s)^{1/2}$ . La limite d'élasticité en cisaillement simple pour le critère de Von Mises est donc définie par  $\mathcal{S}_s/\sqrt{3}$ . Exprimons la fonction de charge initiale  $f_0(\mathbf{s})$  dans  $\mathfrak{R}^3$ , espace des contraintes principales :

$$\bar{\bar{\sigma}} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}; \bar{\bar{s}} = \begin{bmatrix} \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2\sigma_3 - \sigma_2 - \sigma_1}{3} \end{bmatrix} \quad (\text{III.34})$$

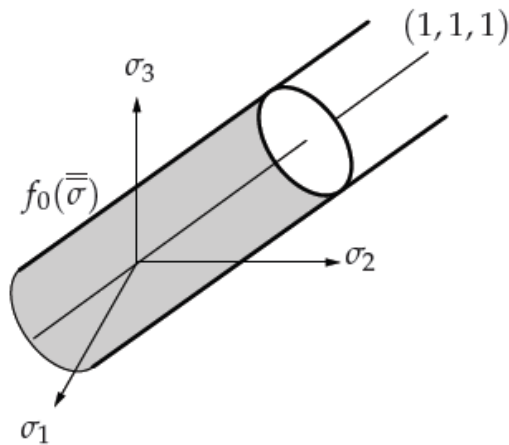
D'où :

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (\text{III.35})$$

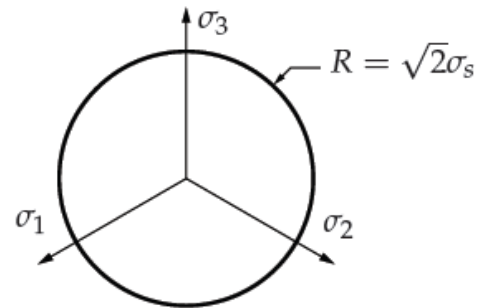
et :

$$f_0(\bar{\bar{S}}) = \sigma_{VM} - \sigma_s \quad (\text{III.36})$$

La représentation graphique de la fonction de charge initiale dans l'espace des contraintes principales  $\mathfrak{R}^3$  est une surface cylindrique non bornée d'axe (1, 1, 1) de rayon  $\sqrt{2}\sigma_s$  comme indiqué sur la figure :



**Fig.III.5.a** : matériau élasto-plastique avec écrouissage



**fig.III.5.b** : vue dans le plan  $s_1 + s_2 + s_3 = 0$

### b. Critère de Tresca :

Pour ce critère, le domaine d'élasticité est défini dans  $\mathfrak{R}^3$ , espace des contraintes principales, par :

$$\{ \bar{\sigma} ; \forall_{i,j} \in [1, 3], |\sigma_i - \sigma_j| - \sigma_s \leq 0 \} \quad (\text{III.37})$$

Il est simple de voir que pour l'essai de traction, le seuil  $\mathcal{S}_s$  est la limite élastique  $\mathcal{S}_0$ .

La contrainte équivalente de Tresca est définie par :

$$\sigma_T = \max |\sigma_i - \sigma_j| \quad (\text{III.38})$$

L'addition d'un tenseur sphérique quelconque au tenseur des contraintes ne modifie pas la valeur de la contrainte équivalente de Tresca. Tout état de contraintes hydrostatique est donc admissible. Comme pour Von Mises ce critère est indépendant de la partie sphérique du tenseur des contraintes.

Pour l'essai de cisaillement simple, une représentation de Mohr permet de voir que

l'expression du critère de Tresca est  $|2t| - S_s \leq 0$ . La limite d'élasticité en cisaillement simple est donc  $S_s/2$ .

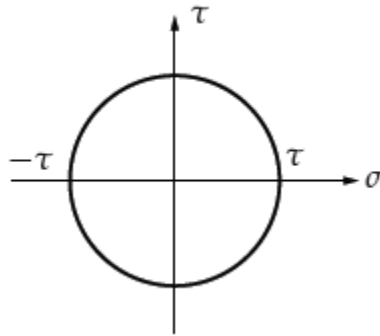


Fig.III.6 :représentation de Mohr

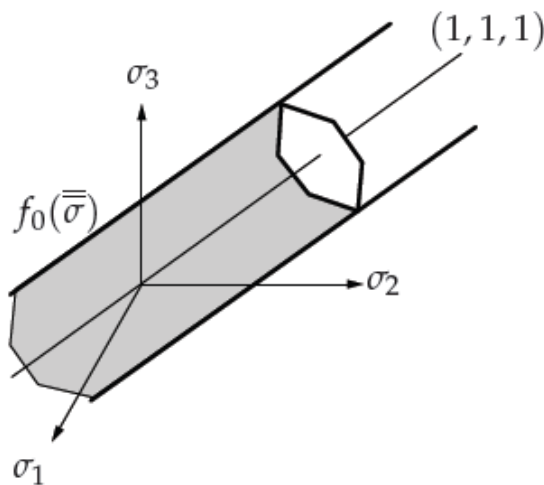


Fig.III.7.a :matériau élasto-plastique avec écrouissage

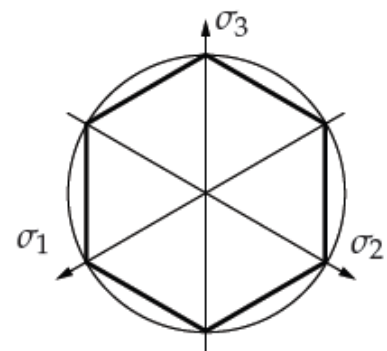


Fig.III.7.b : vue dans le plan  $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0$

La représentation graphique de la fonction de charge initiale dans  $\mathfrak{R}^3$ , espace des contraintes principales, est une surface cylindrique de base hexagonale non bornée d'axe (1, 1, 1) indiquée sur la figure (III.7.a).

Le critère de Tresca est plus précis que celui de Von Mises et l'écart maximal entre les deux critères est  $1-\sqrt{3}/2$ , soit un écart de l'ordre de 13%. Il est dit critère de cisaillement

maximal, si les contraintes principales sont ordonnées  $s_1 > s_2 > s_3$ , le critère ne fait plus apparaître que le cisaillement maximal  $t_{\max} = (s_1 - s_3)/2$ .

**c. Prise en compte de l'écrouissage :**

L'écrouissage correspond aux modifications que subit le matériau lorsque les contraintes qui lui sont appliquées sont suffisamment fortes pour provoquer des déformations plastiques, permanentes. Ces modifications sont d'ordre métallurgique (modification de la structure interne du métal) et ont généralement une influence sur ses propriétés mécaniques. L'écrouissage ne se produit que sur les matériaux ductiles et dans le domaine plastique comme nous l'avons mentionné précédemment, l'état actuel du critère est lié à l'état d'écrouissage ( $h$ ) du matériau qui évolue au cours des déformations plastiques.

**Écrouissage isotrope :** Le modèle isotrope consiste à faire dépendre le seuil  $s_s(h)$  de l'état d'écrouissage. Ce qui conduit à une dilatation du domaine d'élasticité définie par :

- Von mises :  $f(\bar{\sigma}, h) = \sigma_{VM} - \sigma_s(h)$
- Tresca :  $f(\bar{\sigma}, h) = \sigma_T - \sigma_s(h)$

**d. Autres critères :**

Les autres critères sont souvent construits à partir des deux précédents.

Ainsi le critère de Hill utilisé pour les matériaux anisotropes est une généralisation du critère de Von Mises.

Le critère de Coulomb est construit à partir de celui de Tresca et le critère de Drucker-Prager à partir de celui de Von Mises. Il existe bien évidemment plusieurs autres critères.

### **III.5. Rupture des matériaux :**

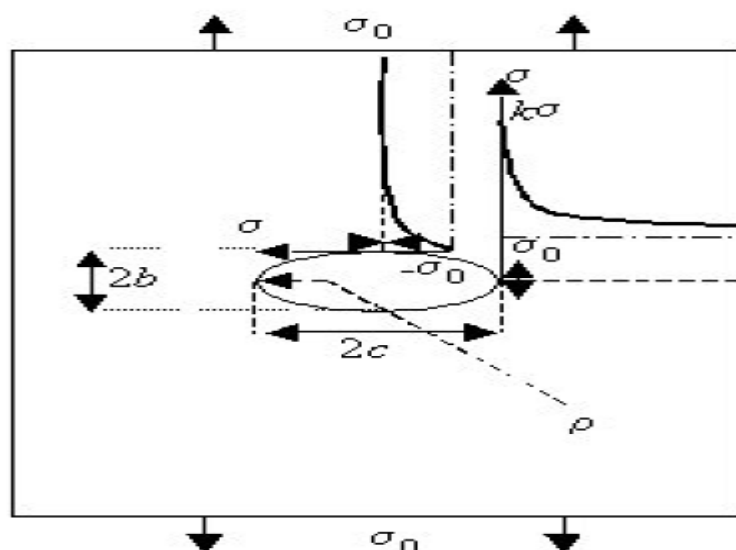
Lorsqu'un matériau est sollicité jusqu'à rupture, les essais montrent que la contrainte de rupture  $\sigma_R$  est une grandeur présentant de fortes fluctuations pouvant même dépasser la

décade pour certains matériaux et que le mode de ruine dépend de la nature du matériau. Ainsi 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. Si la rupture est toujours l'étape ultime de la ruine des structures, elle est précédée d'une étape de plastification pour les matériaux ductiles.

### **III.5.1. les types de rupture :**

#### **III.4.1.1. la rupture fragile :**

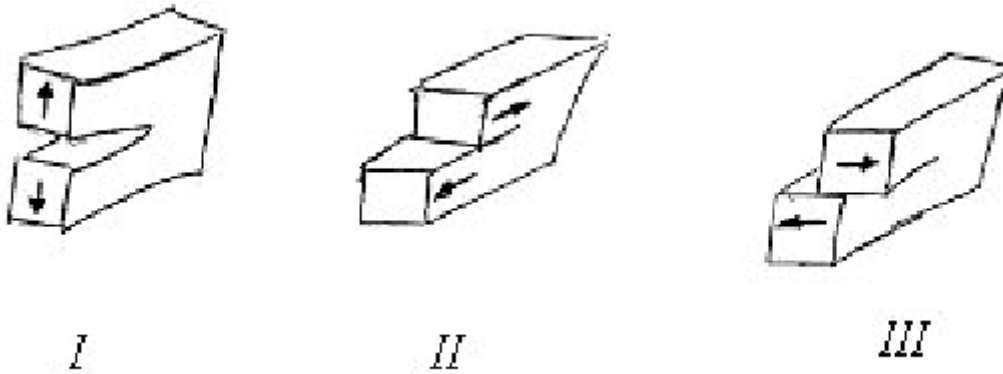
A l'échelle macroscopique une fissure peut être considérée comme une ellipse de grand axe  $2c$  dont le petit axe  $2b$ , donc le rayon  $\rho$ , tend vers 0. Dans ce cas, le coefficient de concentration de contrainte  $k$  diverge induisant une discontinuité et une divergence des contraintes en tête de fissure. La fissure doit alors être vue comme une discontinuité au sein d'un milieu continu.



**Fig.III.8 :** schéma d'une fissure elliptique

a. Fissure et modes de rupture :

La rupture est caractérisée (au moins localement) par la séparation irréversible (généralement les liaisons chimiques rompues ne se rétablissent pas par suite de la présence inévitable de polluant) d'un milieu continu de part et d'autre d'une surface génératrice S. La coupure ainsi créée est appelée fissure.



**Fig.III.9 :** fissure et modes de rupture

Lorsque la séparation est effective, les lèvres sont libres de charge et les vecteurs contrainte des facettes de chaque lèvre s'annulent.

$$\vec{T} = \bar{\sigma} \vec{n} = 0$$

Cette condition n'est évidemment pas applicable aux fissures fermées qui imposent une condition de frottement entre les lèvres, comme cela se produit dans les roches sous pression.

On distingue trois modes de rupture :

- Le mode I appelé de manière évidente mode d'ouverture.
- Le mode II appelé mode de glissement plan.
- Le mode III appelé mode de glissement anti plan ou mode de déchirure, celui mobilise lorsque l'on déchire une feuille de papier.

**b. Le modèle de rupture fragile :**

Le résultat essentiel en élasticité linéaire a été établi par Irwin. Le premier terme du développement limite du champ de contrainte au voisinage d'une fissure est le même pour tous les problèmes (chargement et géométrie de fissure) correspondant à un mode d'ouverture donné. Pour chaque mode, ce premier terme est connu à un facteur multiplicatif près noté  $K$  facteur d'intensité de contrainte. La solution d'un problème de fissure se ramène donc en élasticité linéaire à la détermination du facteur  $K$  qui ne dépend que de la géométrie de la fissure et du type de chargement. Dans un problème réel, la solution sera souvent une combinaison linéaire des trois modes, combinaison rendue possible en raison du principe de superposition des solutions en élasticité linéaire. Le mode I est cependant physiquement le mode le plus important puisque l'ouverture de la fissure conduit assez facilement à la rupture. Les autres modes ne sont pas toujours faciles à contrôler, en particulier en présence de frottement des lèvres. En mode I la fissure se propage dans son propre plan par raison de symétrie. On s'intéressera donc essentiellement au mode I.

$$\vec{U} = \frac{K}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \vec{f}(k, \theta) \quad (\text{III.39})$$

$$\bar{\sigma} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \bar{f}(\theta) \quad (\text{III.40})$$

$\nu$  étant le coefficient de Poisson et  $\mu$  le module de cisaillement :

$$\mathbf{K} = 3 - 4\nu \quad \text{en déformation plane.}$$

$$\mathbf{K} = \frac{3-\nu}{1+\nu} \quad \text{en contrainte plane.}$$

$$S_{33} = \nu(S_{11} + S_{22}) \quad \text{en déformation plane.}$$

$$S_{33} = 0 \quad \text{en contrainte plane}$$

**c. Coefficient de concentration k et facteur d'intensité K :**

Il est important de ne pas confondre le coefficient de concentration de contrainte k qui ne donne qu'une information locale à la pointe même de la fissure et le facteur d'intensité de contrainte K qui décrit l'ensemble de la singularité spatiale du champ de contrainte. Si k est sans dimension, K est le produit d'une contrainte par la racine carrée d'une longueur

$[K] = [\sigma][L]^{1/2}$  et se mesure en  $\text{MPa}\cdot\sqrt{m}$ .

Le passage à la limite permettant de définir une fissure comme la limite d'un trou elliptique complètement aplati conduit naturellement à une relation entre les deux grandeurs, la longueur intervenant dans K étant reliée à la taille c du défaut par la relation d'Irwin :

$$\mathbf{K} = \lim_{\rho \rightarrow 0} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_m \sqrt{\rho} \quad (\text{III.41})$$

$\sigma_m$  étant la contrainte en tête de la fissure elliptique et  $\rho$  son rayon de courbure.

Pour une fissure elliptique aplatie de longueur  $2c$  dans une plaque infinie (en pratique de dimensions grandes devant c) soumise à une traction  $\sigma$ ,

$$\mathbf{S}_m = \mathbf{k}\mathbf{S} \quad \text{avec :} \quad \mathbf{k} = 2\sqrt{\frac{c}{r}}$$

le passage à la limite conduit à  $\mathbf{K}_I = \sigma\sqrt{\pi c}$ .

Citons comme autre exemple le cas classique d'une fissure latérale de longueur c débouchant sur le côté d'une plaque semi infinie soumise à une traction homogène  $\sigma$  perpendiculaire à la fissure pour laquelle :

$$\mathbf{K}_I = 1,122\mathbf{S}\sqrt{\pi c}$$

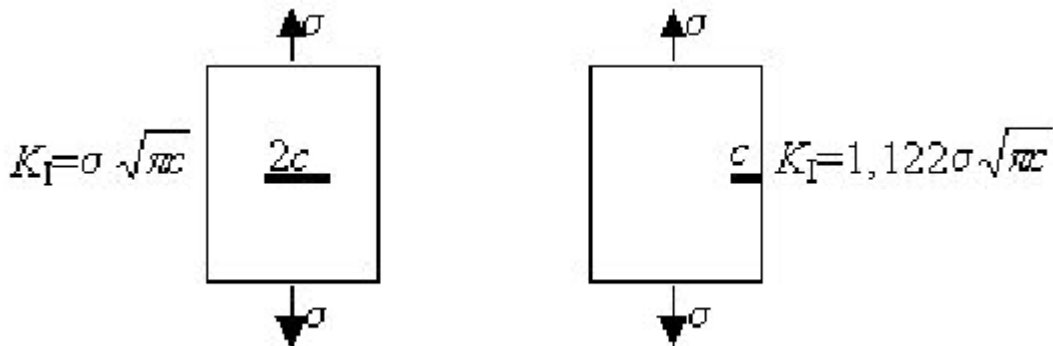


Fig.III.10 : Facteur d'intensité de contrainte

### III.5.1.2. La rupture ductile :

Lorsqu'une charge suffisante est appliquée à un matériau ductile pouvant soutenir une déformation plastique importante, la rupture se développe à partir d'une fissure, souvent une fissure de fatigue, et la surface de rupture est extrêmement rugueuse, constituée de cupules traduisant l'arrachement de matière et la forte dissipation d'énergie de déformation plastique en tête de fissure dans la zone de rayon.

$$\mathbf{R} = \frac{1}{\pi} \left( \frac{Kc}{Rp} \right)^2 \quad (\text{III.42})$$

Ce rayon augmentant rapidement quand  $R^P$  diminue. Les fissures dans les matériaux mous sont associées à des zones plastifiées importantes. La rupture par déchirement ductile consomme beaucoup d'énergie par déformation plastique et plus la zone plastique est étendue, plus l'énergie absorbée est importante, donc plus GC et KC sont élevés. C'est pourquoi les métaux ductiles ont une telle ténacité. D'autres matériaux doivent aussi leur ténacité à ce comportement, par exemple la pâte à modeler, et certains polymères la doivent à un mode de rupture similaire au déchirement ductile (formation des crazes avec arrachement des macromolécules entre les lèvres de la fissure).

### **III.6. Généralité sur la méthode des éléments finis :**

Les sciences de l'ingénieur (Mécanique des solides et des fluides, thermique...) permettent de décrire le comportement des phénomènes physiques grâce à des équations aux dérivées partielles. La méthode des éléments finis est l'une des méthodes les plus utilisées aujourd'hui pour résoudre ces équations. Elle nécessite l'utilisation intensive de l'ordinateur.

C'est une méthode très générale qui s'applique à la majorité des problèmes rencontrés dans la pratique (stationnaires ou non stationnaires, linéaires ou non linéaires, définis dans un domaine géométrique à une ou deux ou trois dimensions).

La méthode des éléments finis consiste à utiliser une approximation simple des variables inconnues pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques. Elle fait appel aux trois domaines suivants :

- Sciences de l'ingénieur pour construire les équations aux dérivées partielles.
- Méthodes numériques pour construire et résoudre les équations algébriques.
- Programmation et informatique pour exécuter efficacement les calculs sur l'ordinateur.

Le fait que cette méthode de calcul nécessite l'utilisation intensive de l'ordinateur, on a plusieurs logiciels d'analyse et de calcul par cette méthode. Parmi les plus utilisés y a ABAQUS développé par la société simulia (Dassault Système). Dans la suite nous allons utiliser ce code de calcul pour effectuer notre étude du problème de rupture rencontré sur la pompe de refoulement. Ya bien d'autres logiciels de ce type comme :

- CASTEM : logiciel français développé par CEA.
- ASTER : logiciel français développé par EDF.
- RFEM : logiciel allemand développé par Dlubal Software.

## **IV.1. Introduction :**

La simulation informatique ou numérique désigne l'exécution d'un programme informatique sur un ordinateur ou réseau en vue de simuler un phénomène physique réel et complexe. Les simulations numériques scientifiques reposent sur la mise en œuvre de modèles théoriques utilisant souvent la technique des éléments finis. Elles sont donc une adaptation aux moyens numériques de la modélisation mathématique, et servent à étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution. On parle également de calcul numérique. Les interfaces graphiques permettent la visualisation des résultats des calculs par des images de synthèse.

Ces simulations informatiques, réalisées par des logiciels comme ABAQUS, sont rapidement devenues incontournables pour la modélisation des systèmes naturels en physique, chimie et bien d'autres domaines. Elles permettent d'éviter le risque et le coût d'une série d'épreuves réelles (ex: essais de véhicules) ou offrent un aperçu sur le développement d'un système trop complexe pour simuler avec de simples formules mathématiques.

## **IV.2. Logiciel ABAQUS :**

### **IV.2.1. Présentation :**

Ce logiciel est une suite puissante des programmes de simulation créée en 1978, basée sur les méthodes numériques approchées par éléments finis. Le code de calcul ABAQUS est particulièrement réputé pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Il s'est imposé comme partie intégrante des processus de conception dans plusieurs sociétés de renommée mondiale et dans tous les secteurs industriels. Il offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. ABAQUS possède une bibliothèque étendue

d'éléments pouvant modéliser n'importe quelle géométrie. Il a une liste également étendue de modèles matériels qui peuvent simuler le comportement de la plupart des matériaux typiques de technologie comprenant les métaux, le caoutchouc, les polymères, les composites, le béton armé, et les matériaux géotechniques comme les sols et la roche. Il peut simuler des problèmes dans des secteurs divers, comme : la mécanique, le transfert thermique, électrique, problèmes couplés (piézo et thermique), l'acoustique et la mécanique des sols....

Dans la plupart des simulations, y compris des modèles fortement non linéaires, le besoin de l'utilisateur est de fournir les données technologiques telles que la géométrie de la structure, les lois de comportement des matériaux constitutants, les conditions aux limites et les charges appliquées. ABAQUS peut simuler n'importe quelle géométrie telles que : poutres, plaques, coques et éléments spéciaux (ressorts, masses...) en deux dimensions ou en trois dimensions.

Le cœur du logiciel ABAQUS est donc ce qu'on pourrait appeler son "moteur de calcul". À partir d'un fichier de données, caractérisé par le suffixe .inp, qui décrit l'ensemble du problème mécanique, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées et fournit les résultats dans un fichier .odb.

Deux tâches sont à accomplir : générer le fichier de données (cela s'appelle aussi effectuer le prétraitement) et exploiter les résultats contenus dans le fichier .odb (ou post traitement). La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, des matériaux, des chargements, etc..., suivant une syntaxe précise. Il faut savoir que le pré traitement et le post traitement peuvent être effectués par d'autres logiciels.

ABAQUS se divise en trois grands codes :

- **ABAQUS/Standard:** résoudre par un algorithme statique implicite.

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

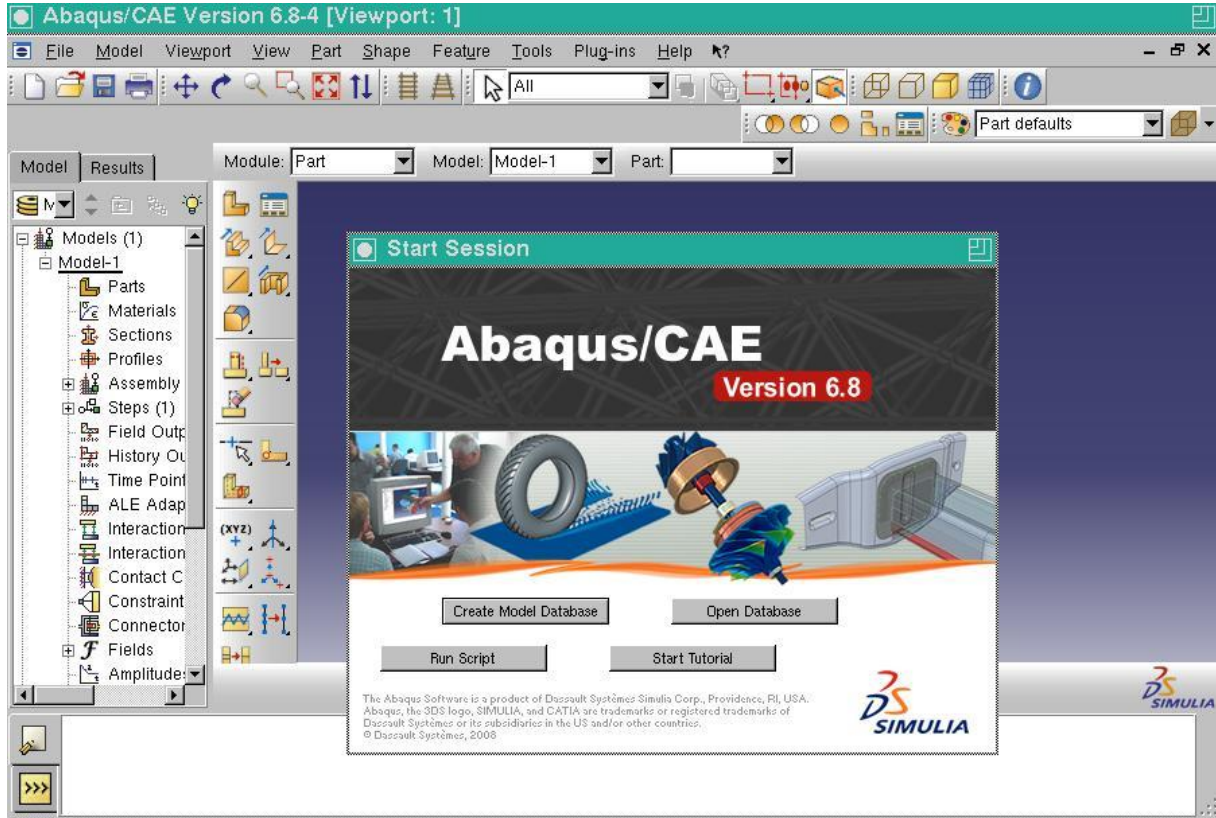


Fig.IV.1 : logiciel de calcul ABAQUS.

### IV.2.2. Système d'unités :

Comme dans beaucoup de logiciels dédiés au calcul des structures, il n'ya pas de système d'unités unique. C'est à l'utilisateur de définir le système d'unité qu'il juge adéquat.

Le tableau suivant donne un aperçu des différentes unités utilisées par ABAQUS.

| Masse | Longueur | Temps | Force        | Pression          | Energie        |
|-------|----------|-------|--------------|-------------------|----------------|
| M     | L        | T     | $M L T^{-2}$ | $M L^{-1} T^{-2}$ | $M L^2 T^{-2}$ |
| Kg    | m        | s     | N            | Pa                | J              |
| g     | mm       | ms    | N            | MPa               | mJ             |
| Tonne | mm       | s     | N            | MPa               | mJ             |

Tableau.IV.1 : système d'unités.

### **IV.2.3. Phases de mises en données :**

Pour les applications courantes, on peut distinguer 4 phases dans la mise en données :

**Phase 1** : Génération du maillage (nœuds, éléments).

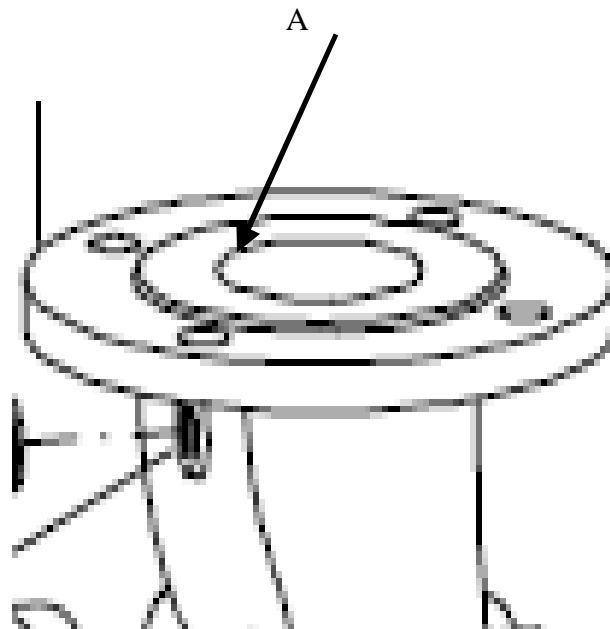
**Phase 2** : Propriétés des matériaux (mécanique, physique, thermique).

**Phase 3** : Conditions aux limites.

**Phase 4** : Etape de calcul (chargement, définition des résultats).

### **IV.3. simulation du modèle et les étapes suivies :**

Le modèle a simuler s'agit de la bride de refoulement qui se situe sur la partie supérieure de la pompe. C'est à travers ce tube que circule l'eau refoulée à une pression de 6 bars.



**Fig.IV.2** : le modèle a simulé.

Le problème constaté dans l'entreprise c'est une rupture au niveau du col supérieur de la bride. Cette rupture apparaît comme une fissure et survient en général après une certaine durée relativement courte de fonctionnement. Par ailleurs, l'apparition de cette fissure est répétitive. Elle cause une fuite d'eau et une diminution de la pression de refoulement et donc

un mauvais refroidissement. A chaque remplacement de la bride la fissure apparaît à la même position **A** schématisé sur la figure IV.2.

Une première analyse du problème nous emmène à soupçonner un montage non conforme de la pompe. En effet, il existe des conditions de montage pour éviter que la bride ne soit désaxée par rapport à la verticale. Ainsi, au niveau de la conception géométrique sous ABAQUS nous procéderons à une inclinaison très légère de la bride (1 degrés d' angle du même coté du point **A** de la figure IV.2) et ensuite voir si les contraintes sont plus importantes du coté de la fissure.

#### **IV.3.1. Dessin du modèle sur ABAQUS :**

Le modèle géométrique est conçu sous ABAQUS en deux étapes. La première est le dessin des deux parties inférieures (le tube) et la partie supérieure (la volute) en esquisse 2D suivie par une extrusion en 3D figures IV.3 et IV.4.



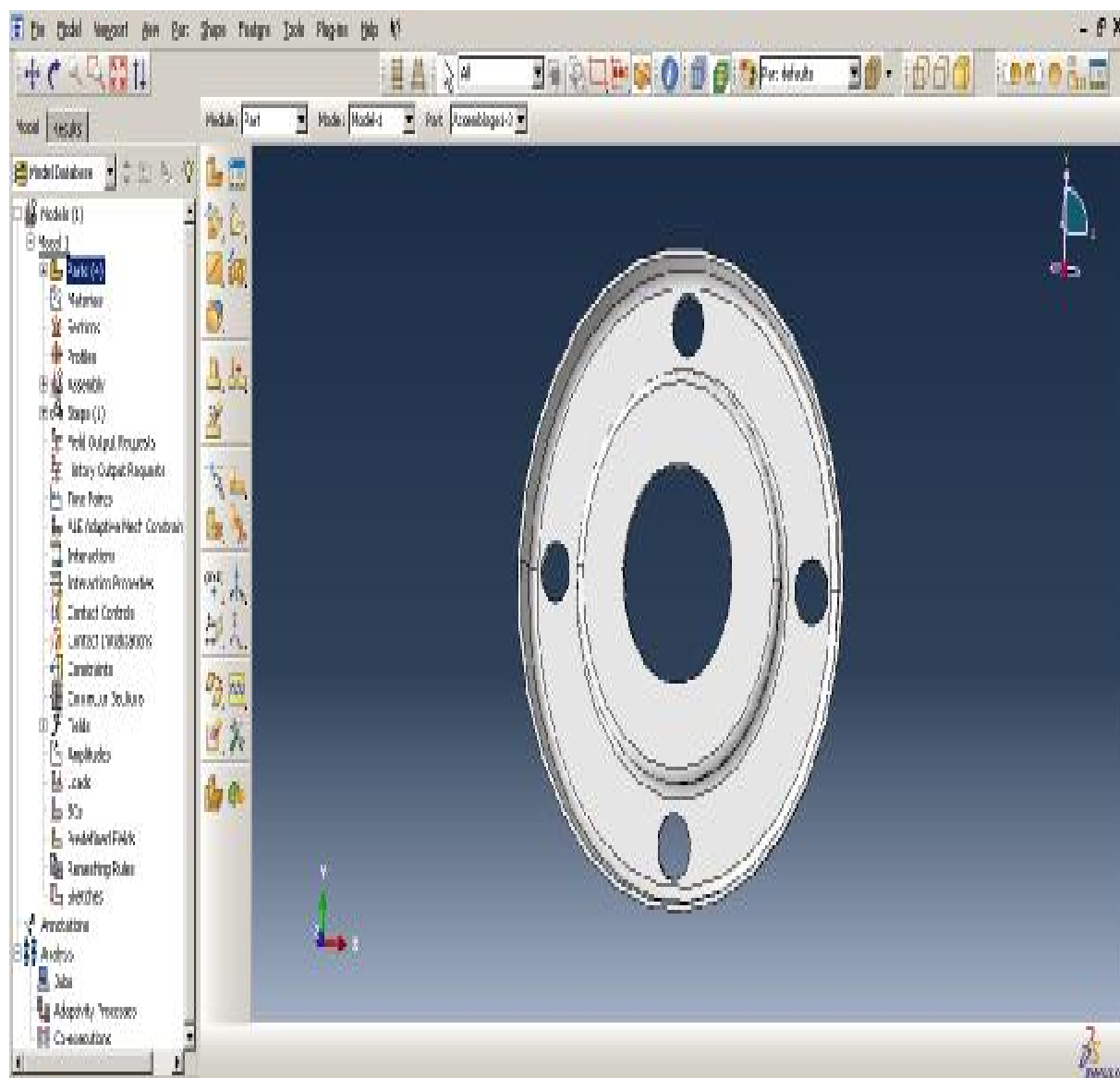
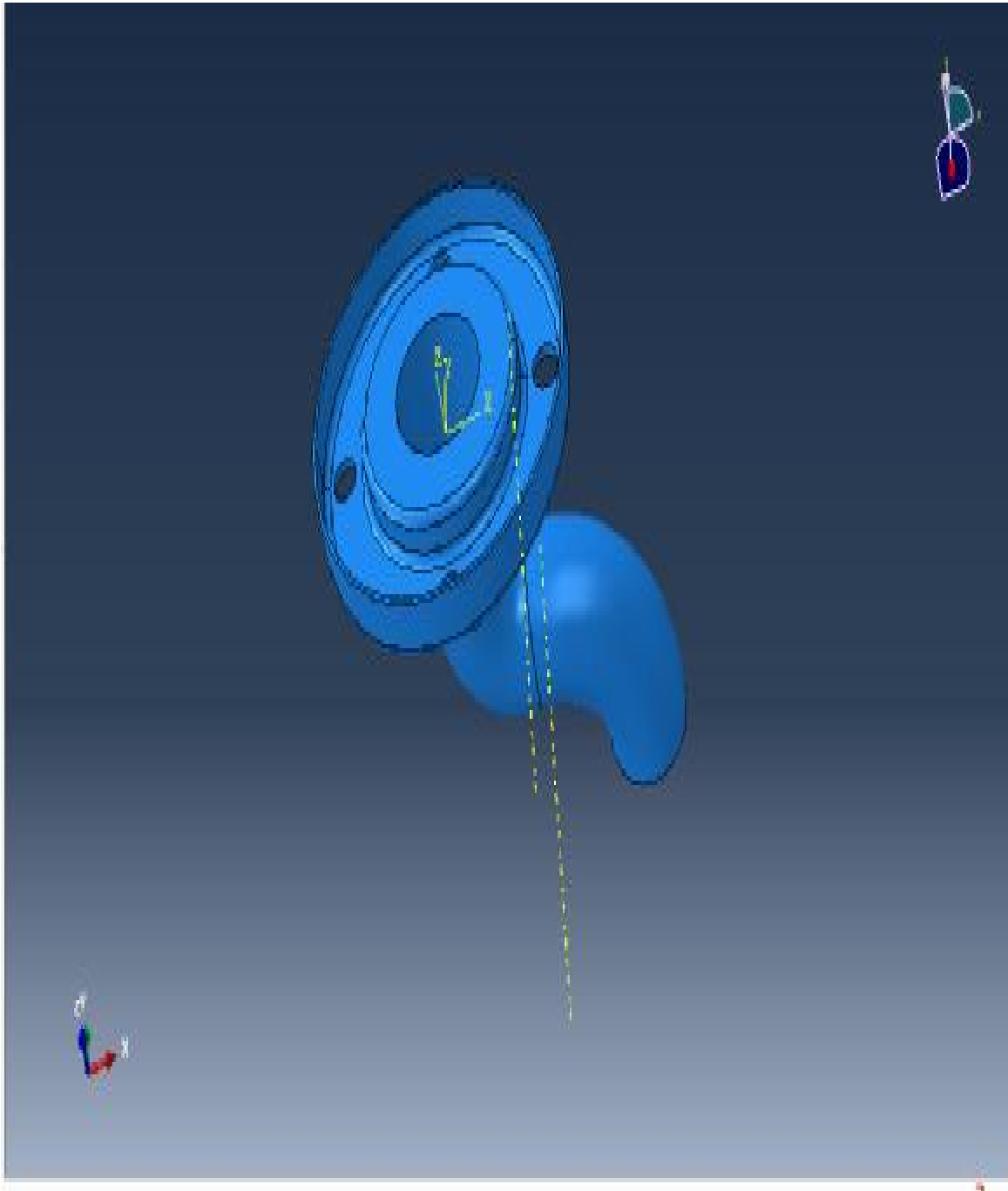


Fig.IV.4 : La volute.

La deuxième étape de la conception consiste à assembler les deux parties en utilisant les outils de déplacement et d'assemblage entre les trois instances (parties). Figure IV.5.



**Fig.IV.5** : Le modèle assemble sur ABAQUS.

### IV.3.2. Propriété du modèle :

Dans cette étape nous procédons à la déclaration des propriétés mécanique du matériau ainsi que les lois de comportement de ce dernier :

a. Densité :  $0.00798 \text{ g.mm}^{-3}$

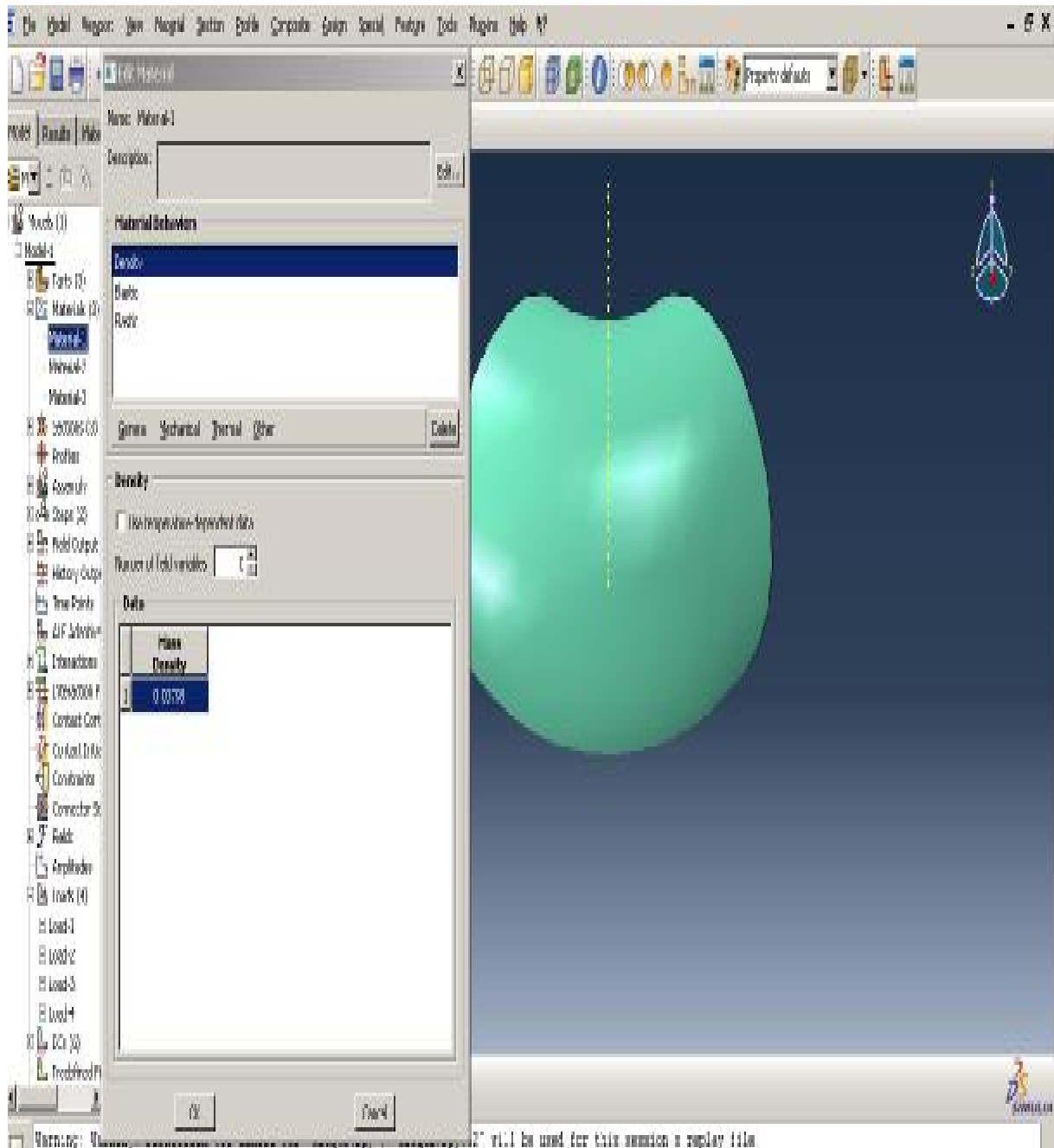
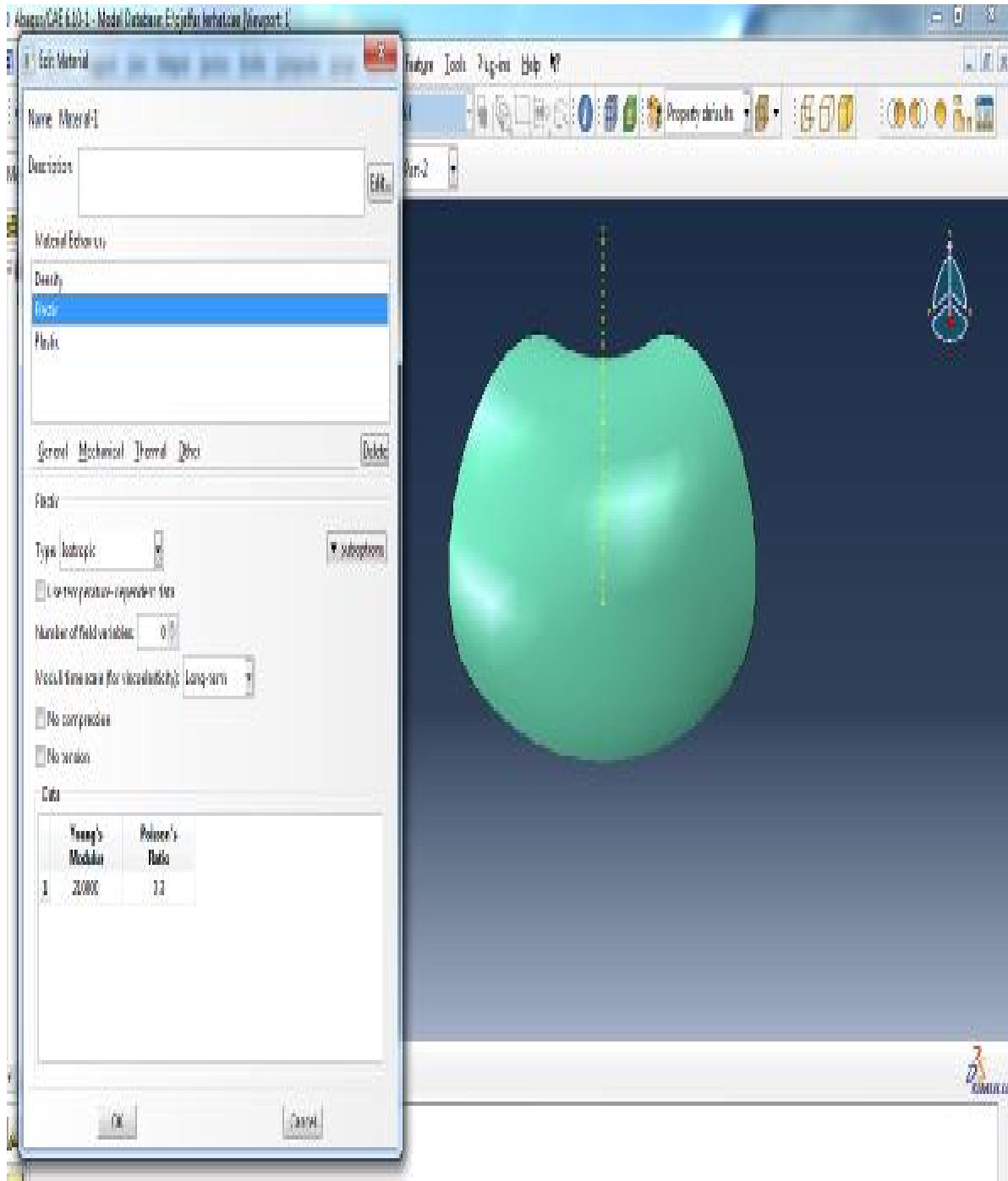


Fig.IV.6 : déclaration de la densité du matériau.

**b. Elasticité :**

- Module de Young : 210000 MPa
- Coefficient de poisson : 0,3

**Fig.IV.7** : déclaration des propriétés élastique du matériau.

### c. Plasticité :

Sous ABAQUS, les de plasticité (courbe de contraintes déformations) est définie par l' introduction de plusieurs valeurs de points spécifiques sur la courbe. Ces valeurs sont données dans le tableau II.7.

| Contraintes (MPa) | Déformations         |
|-------------------|----------------------|
| 200( $R_e$ )      | 0(domaine élastique) |
| 240( $R_{e0.2}$ ) | 0.002                |
| 260( $R_{e1}$ )   | 0.01                 |
| 520( $R_m$ )      | 0.1                  |

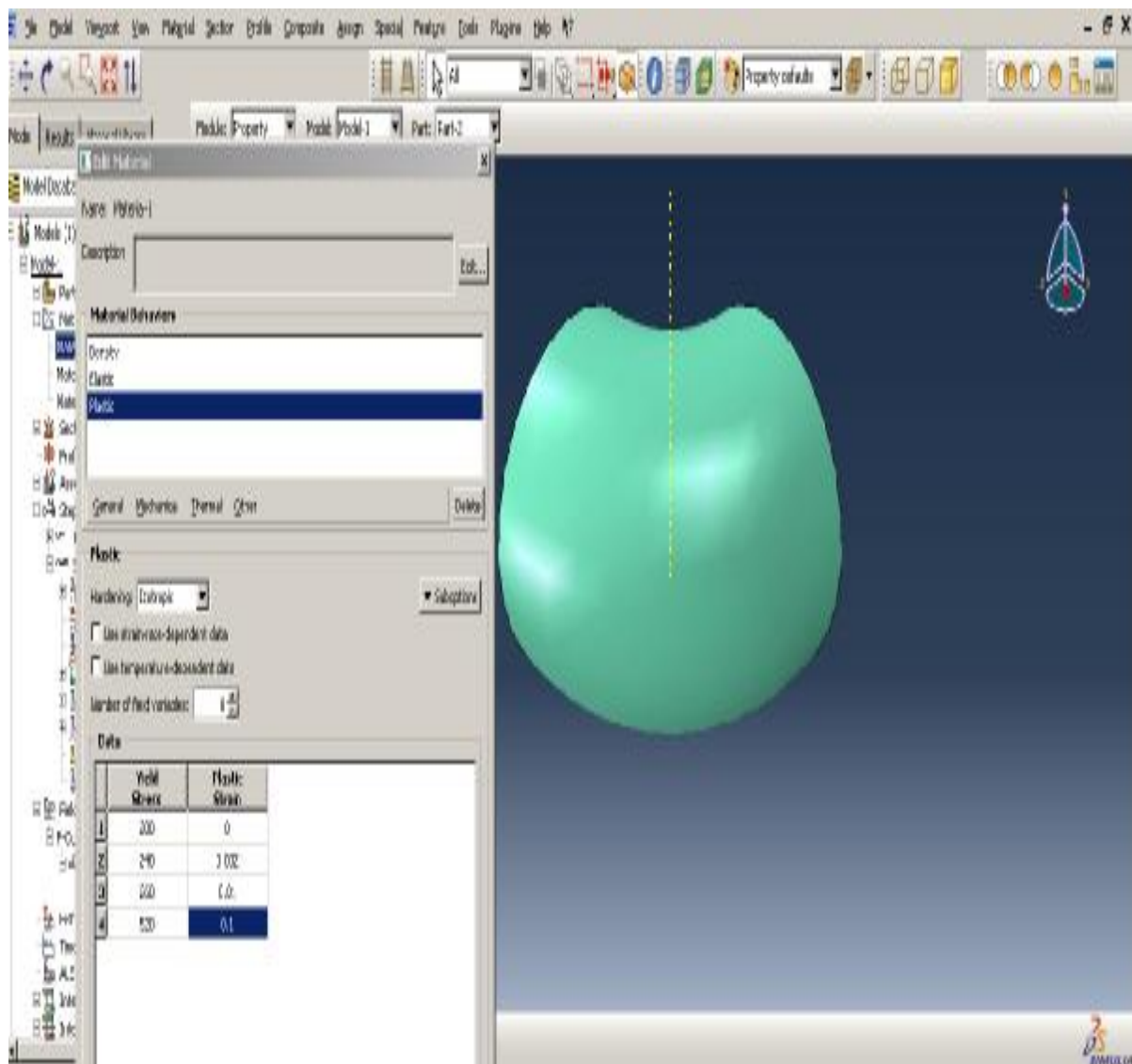
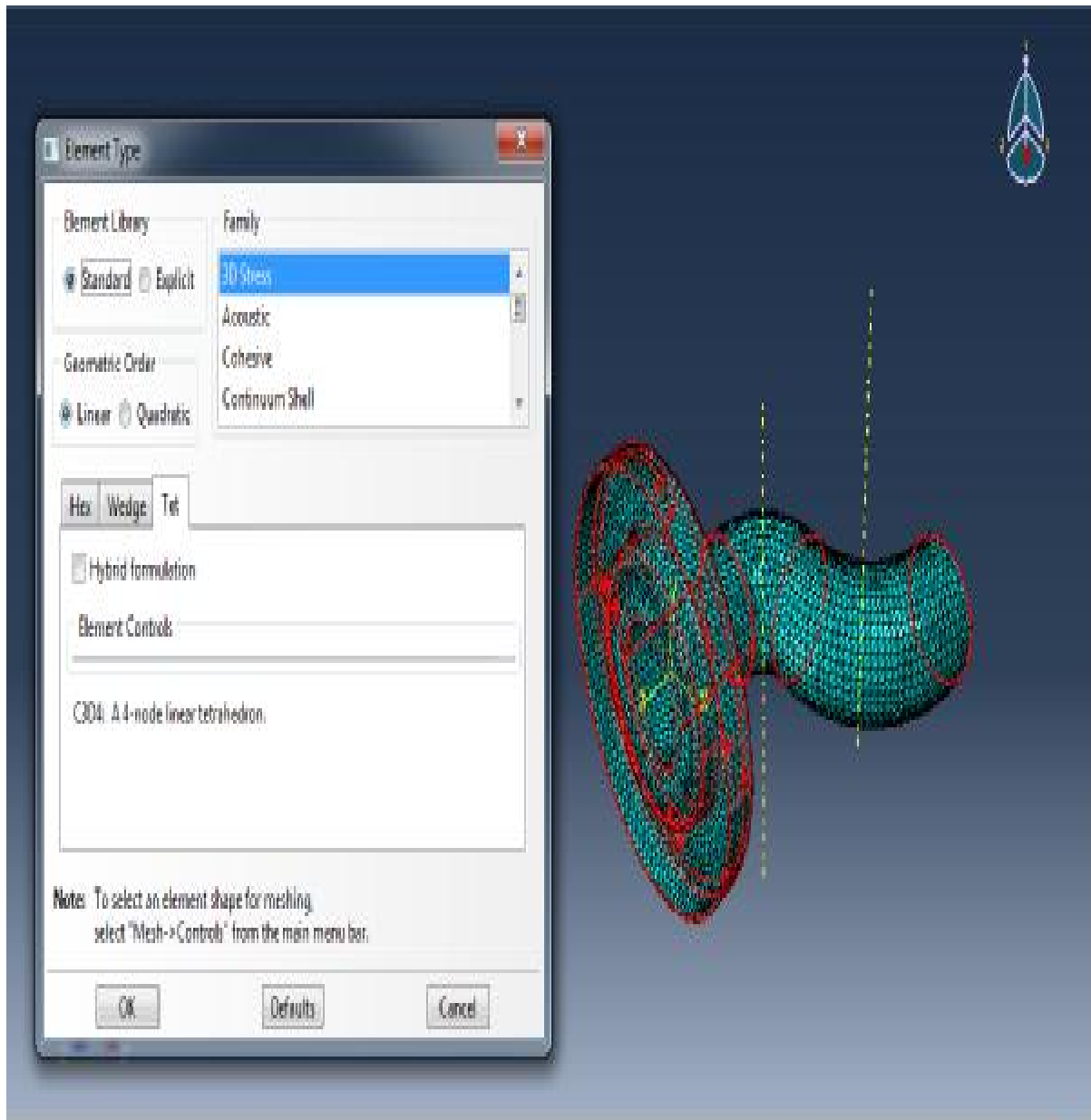


Fig.IV.8 : déclaration des propriétés plastique du matériau.

### IV.3.3. Maillage du modèle (mesh) :

Nous avons utilisé pour cette structure un maillage linéaire tétraédrale qui possède 4 nœuds avec une taille de 5mm pour avoir un maillage stable.



**Fig.IV.9 :** maillage du modèle.

#### IV.3.4. Les variables a calculer (step):

Il faut définir la procédure qu'ABAQUS doit suivre dans la résolution numérique du problème. On définit la période qui représente le temps de calcul, elle représente le temps qu'ABAQUS prend pour appliquer la totalité de la charge.

Ensuite, il faut définir les variables à calculer qui seront présentés dans le fichier résultat. Elles sont définies dans le « field output request ».

Pour notre cas nous avons choisi un calcul explicite car il est plus efficace et plus rapide dans ce genre de calcul [12]. Nous avons travaillé avec une période de 10 s.

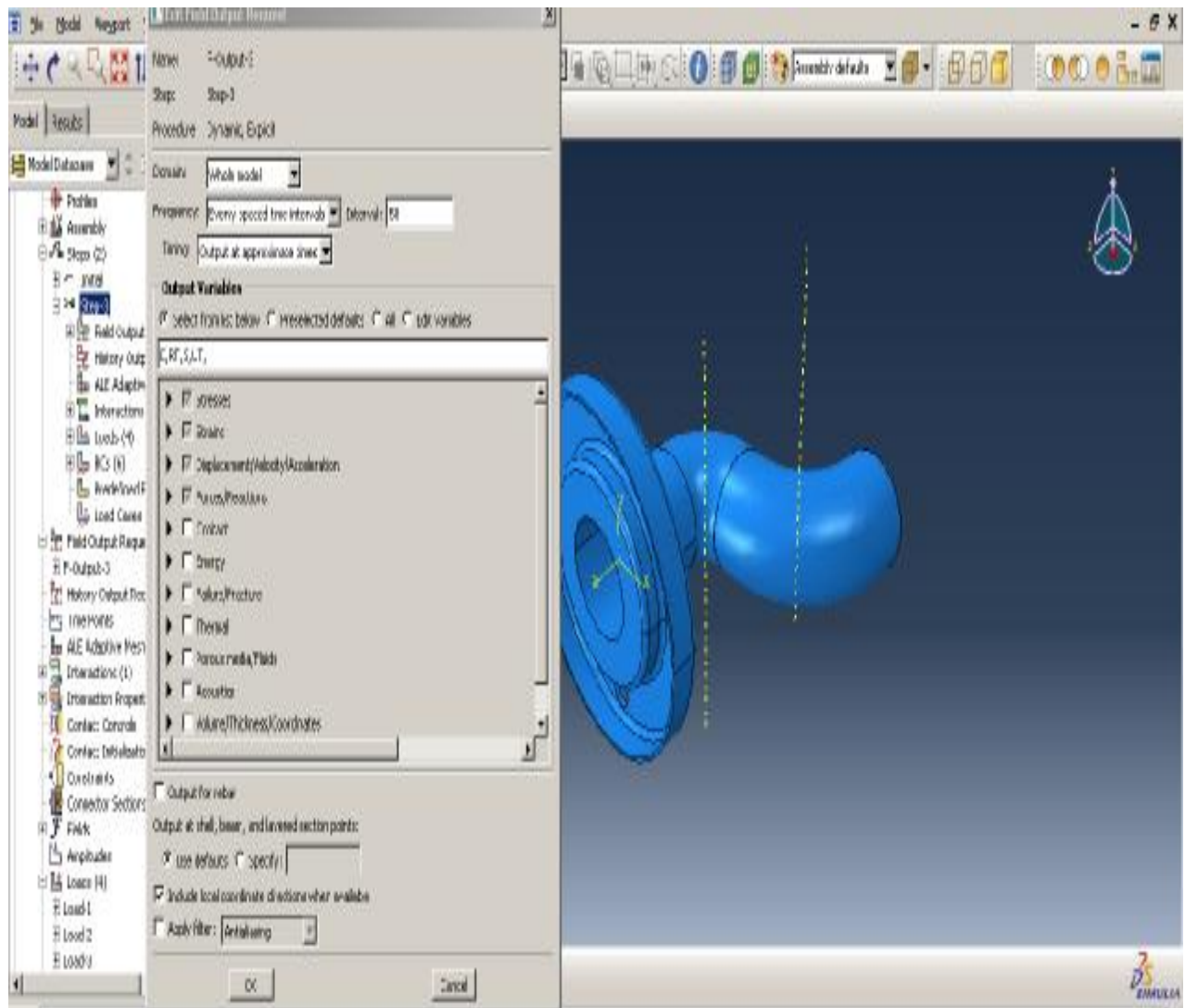


Fig.IV.10 : déclaration des variables a calculer.

### IV.3.5. Application des conditions aux limites et des charges (loads) :

#### a. Condition aux limites :

Le tube et la volute sont totalement encastés (zéro degré de liberté pour la structure ).

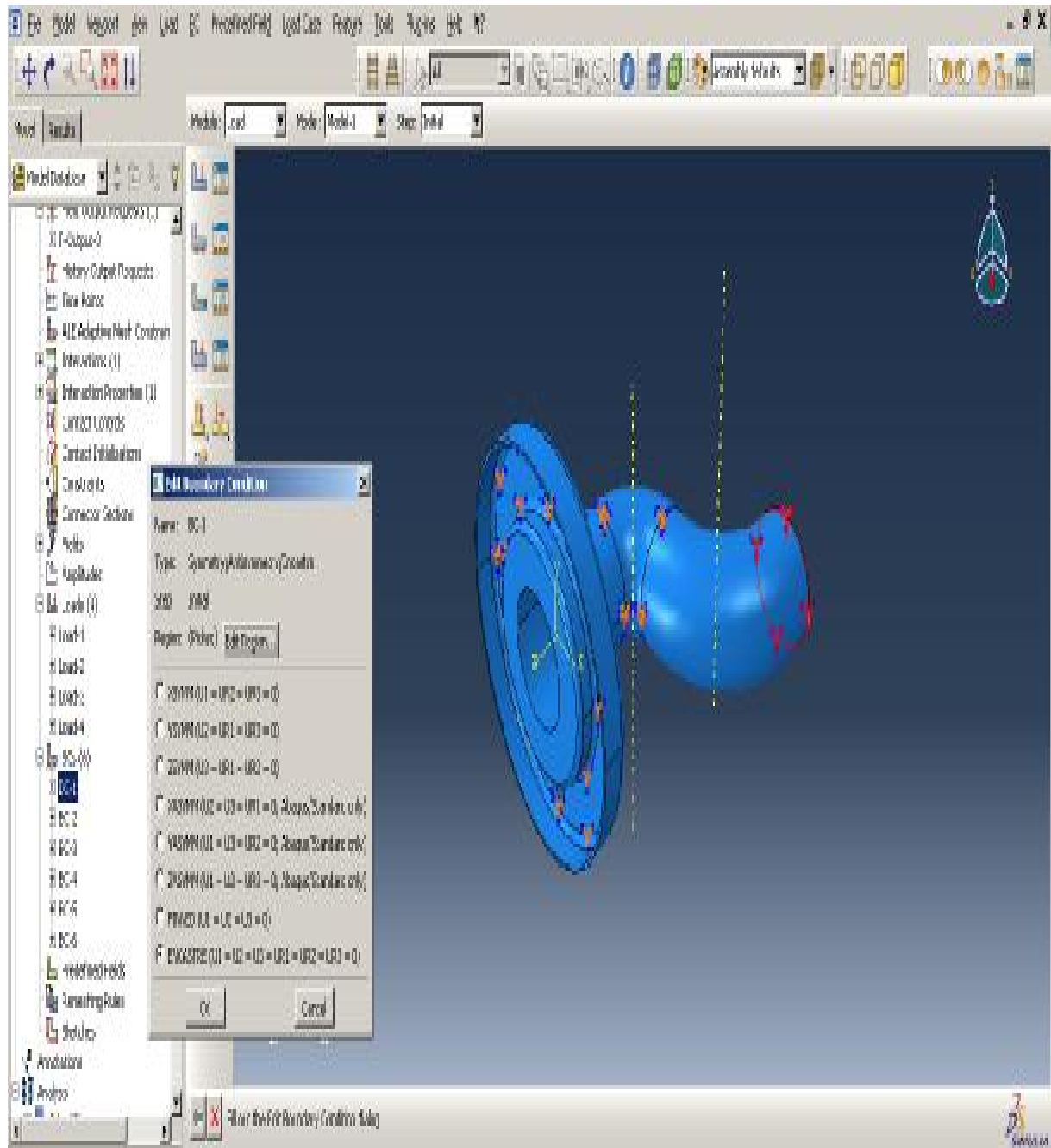
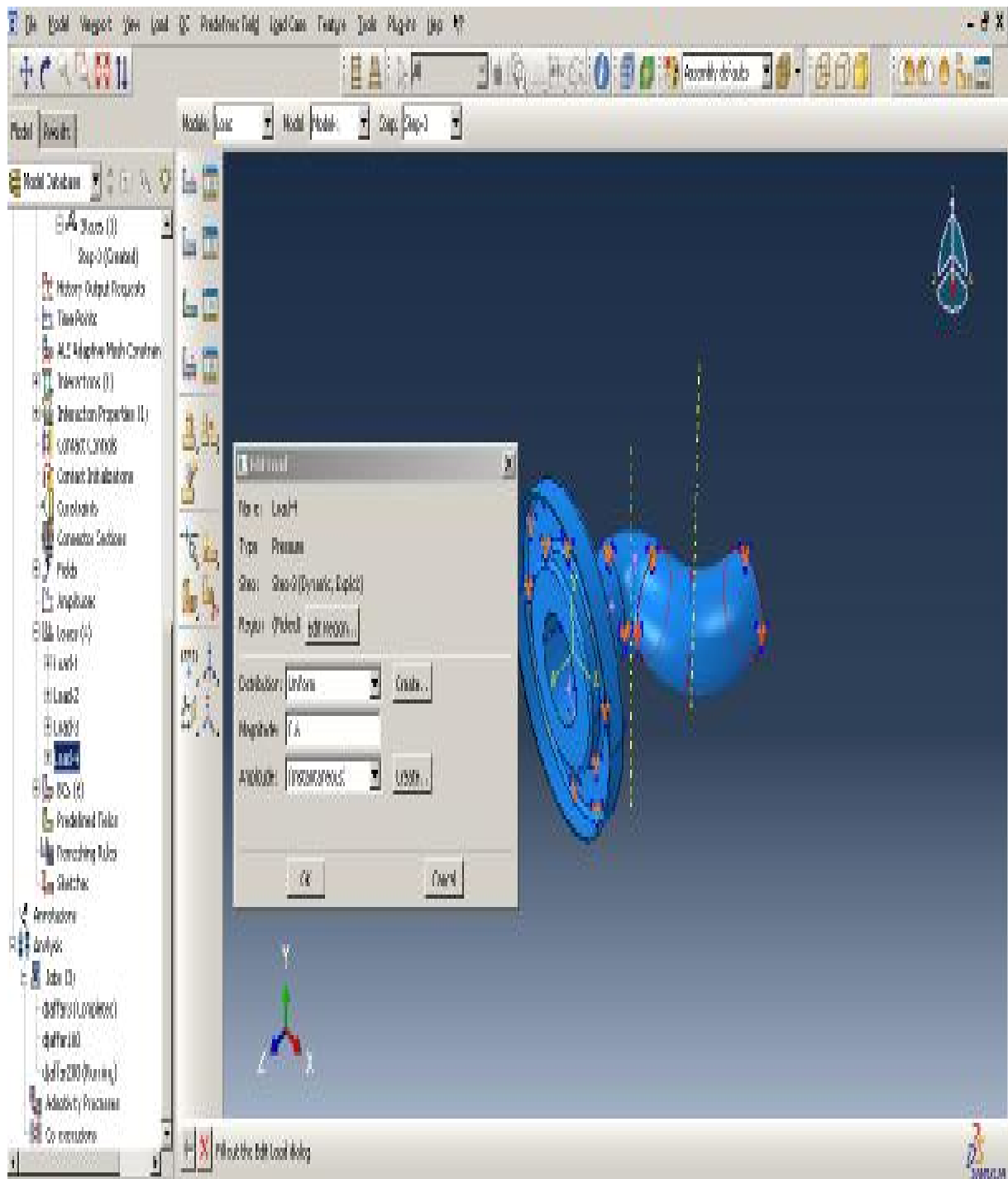


Fig.IV.11 : conditions aux limites.

**b. Chargement :**

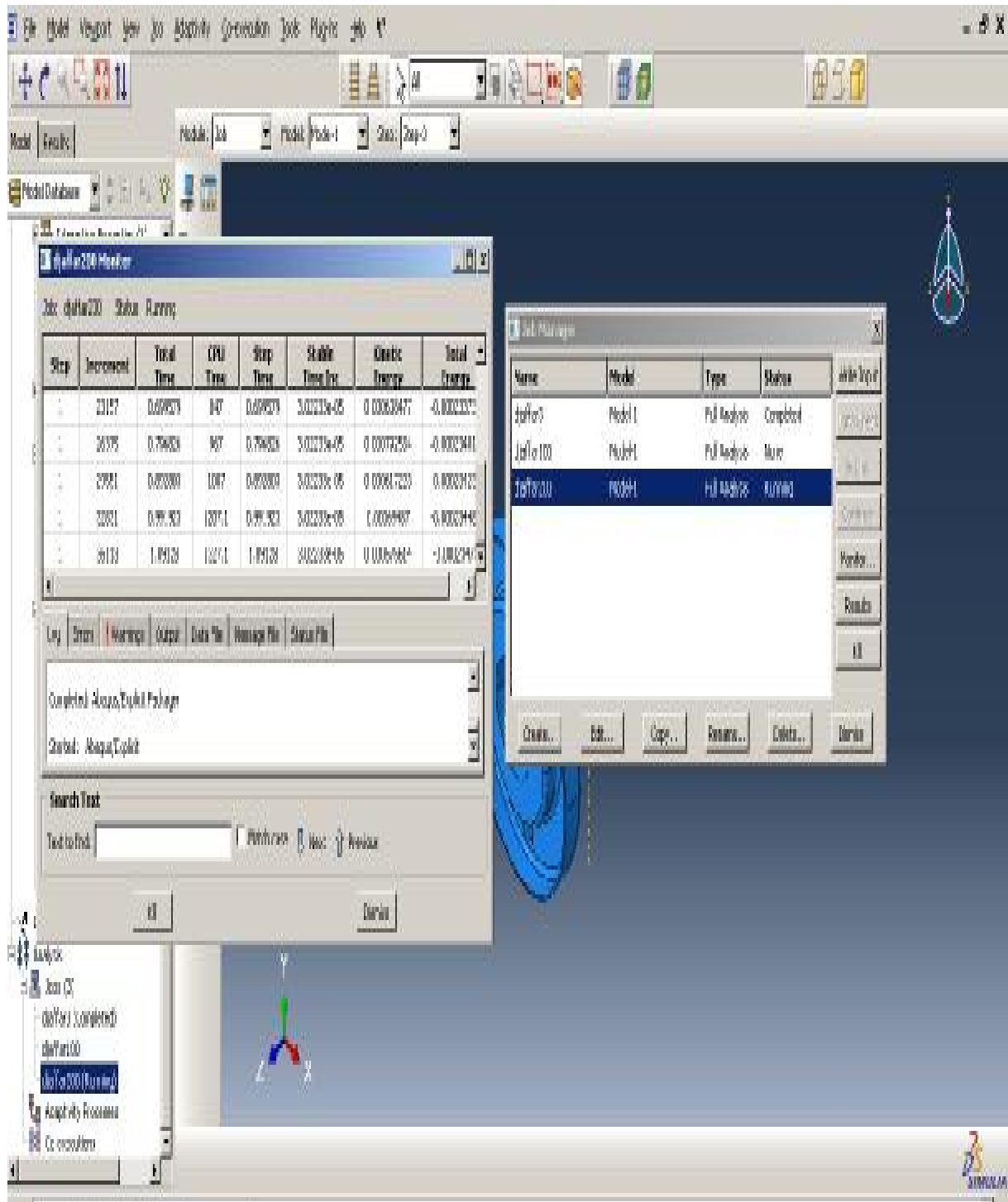
Conformément aux conditions de fonctionnement de la pompe, nous avons appliqué une pression uniforme à l'intérieure de la conduite égale à 6 bars.



**Fig.IV.12 :** application du chargement.

### IV.3.6. Simulation (Job) :

Cette étape nous a permis de lancer l'analyse du modèle après la définition d'un job, en cliquant sur « submit ».



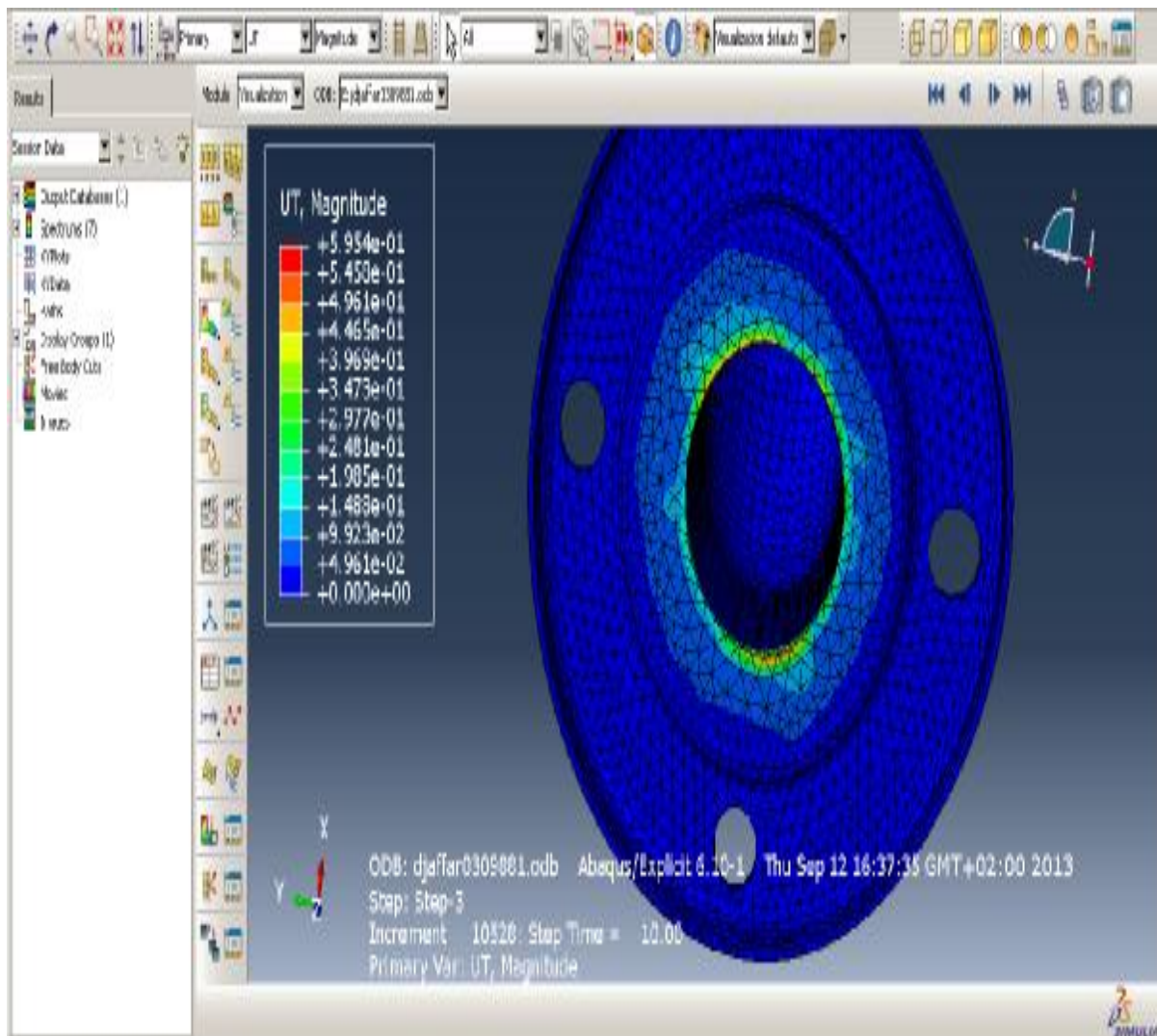
figIV.13 : lancement de l'analyse.

### IV.3.7. Visualisation :

ABAQUS nous permet de voir la propagation des contraintes ou des déformations en fonction du temps de calcul, aussi de tracer n'importe qu'elle courbe, soit une variable en fonction du temps ou bien en fonction d'une autre variable.

Dans notre cas on a calculé les déformations, les déplacements, les contraintes et les Forces de réactions.

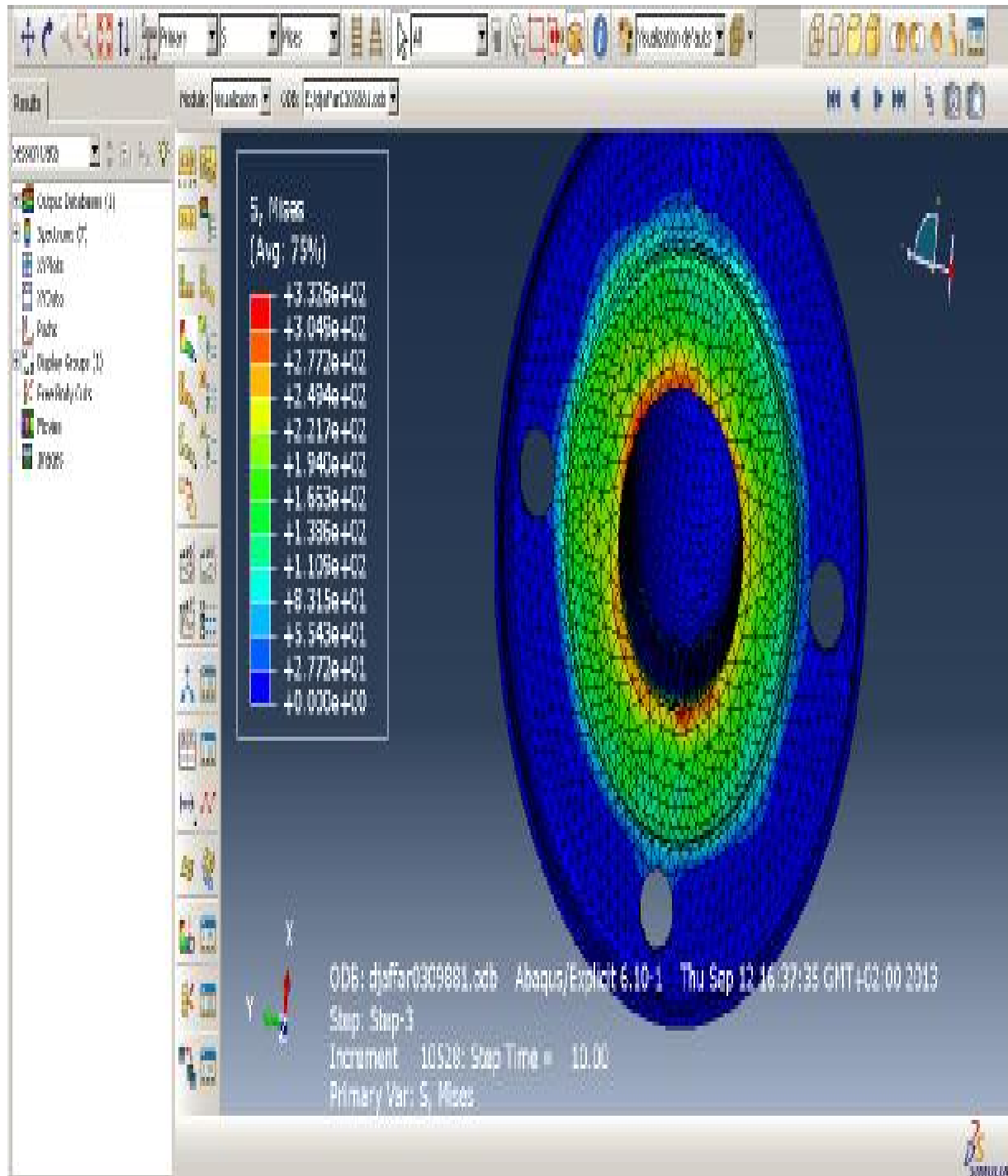
#### a. Les déplacements :



figIV.14 : les déplacements.

On remarque d'après le calcul fait par ABAQUS que la zone la plus influencé en terme de déplacement se situe sur la rainure ou les deux parties sont assembler.

**b. Contraintes S de Von mises :**



**Fig.IV.15 :** les contraintes de von mises.

Les contraintes de Von mises se concentre sur la zone d`assemblage des deux parties.  
Plus particulièrement sur le coté concerné par la fissure.

La courbe suivante représente les contraintes de Von mises en fonction du temps sur le coté concerné. Il est clair qu'un niveau assez important de ces contraintes est atteint au bout d' un temps très rapide :

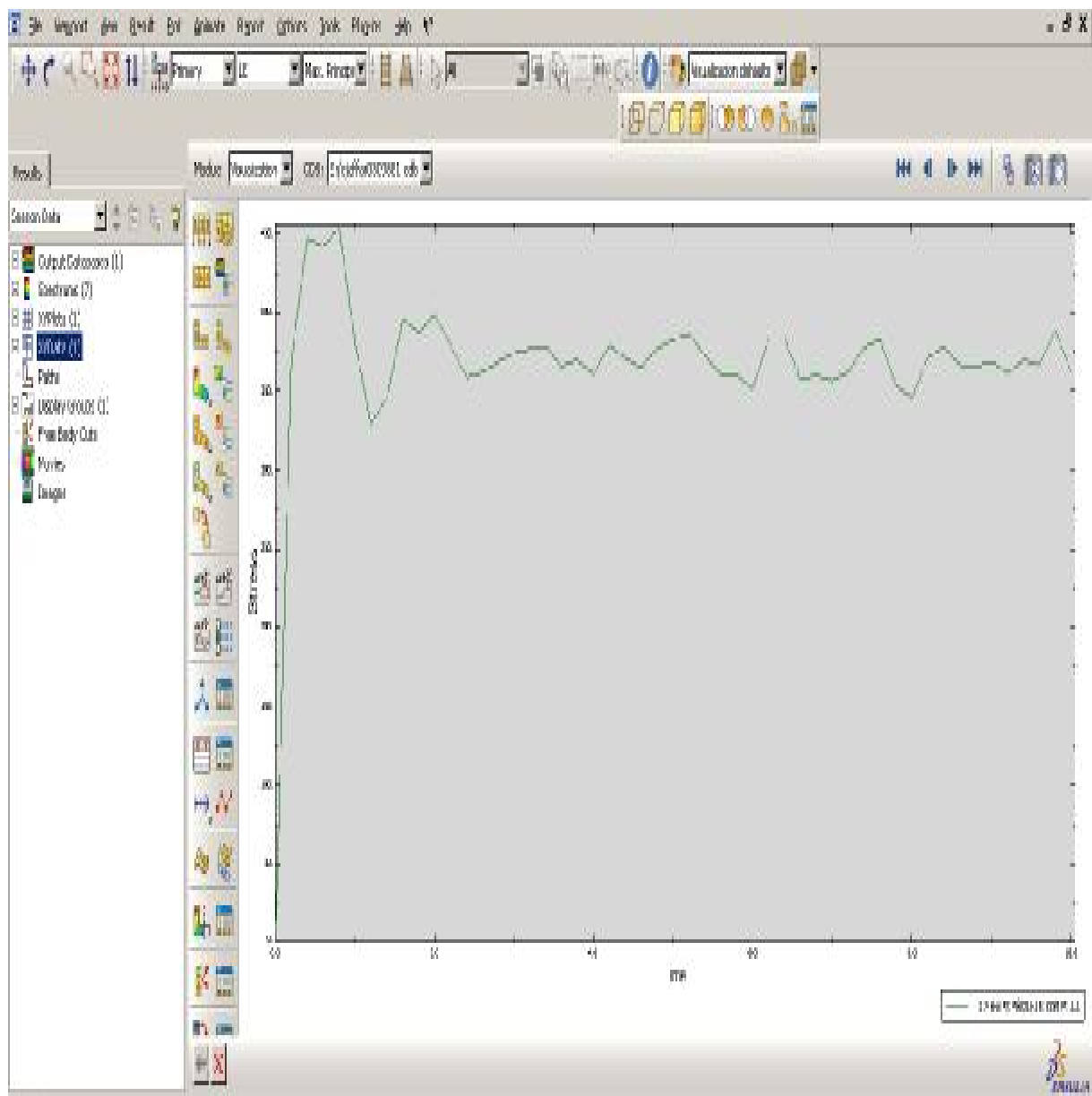


Fig.IV.16 : courbe des contraintes de van mises sur un élément.

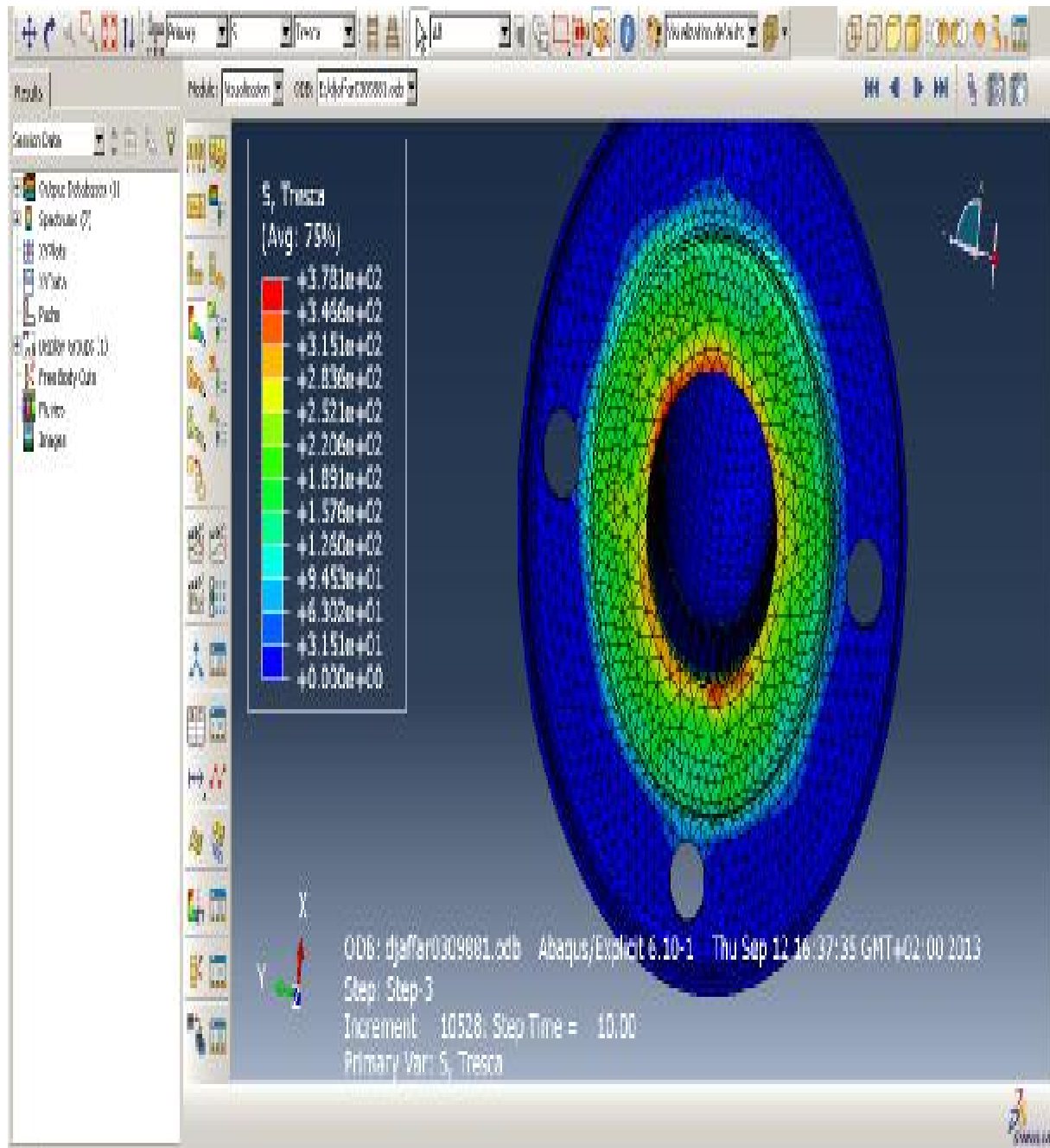
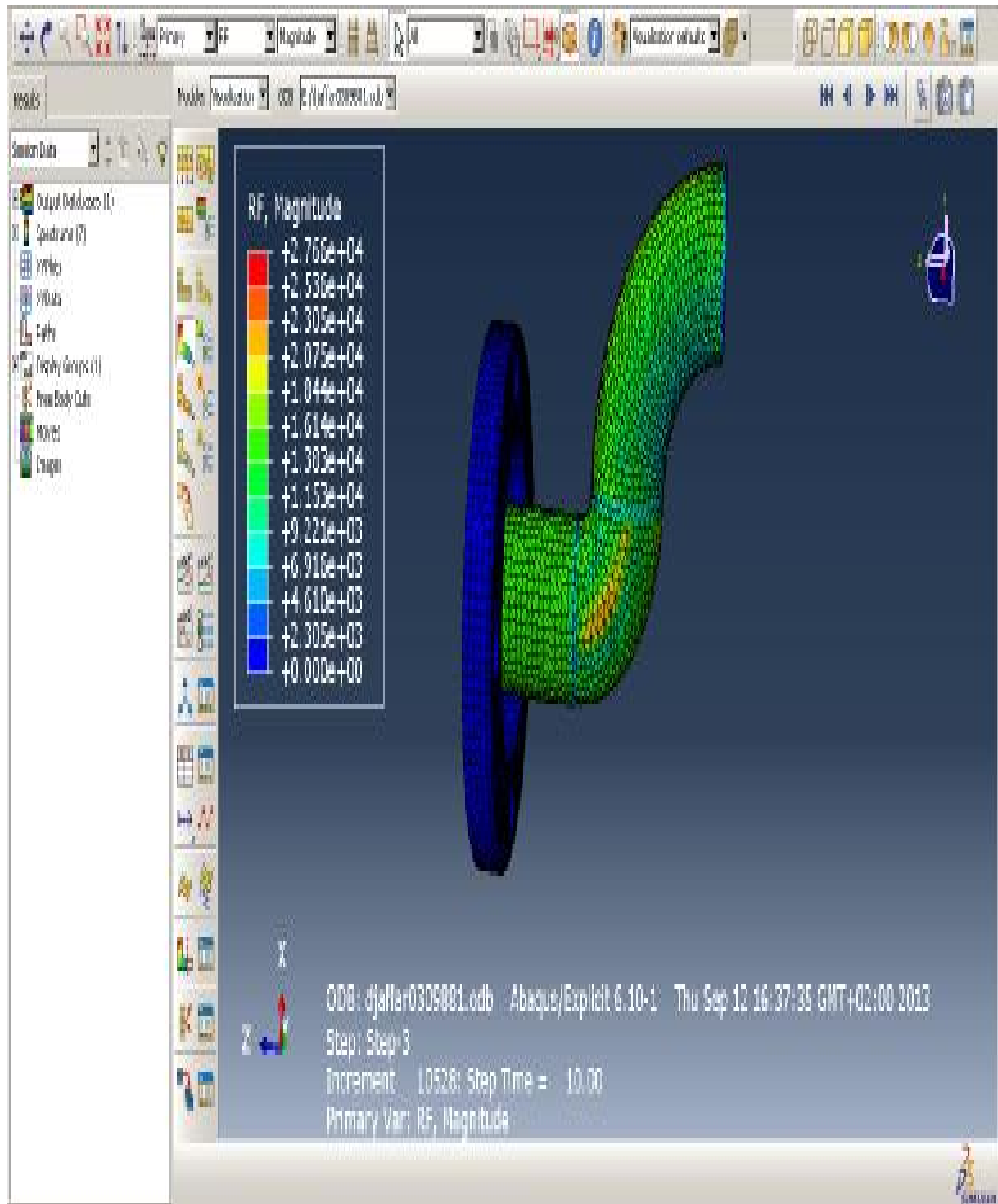
c. Les contraintes s Tresca :

Fig.IV.17 : les contraintes de tresca.

Les contraintes de Tresca se concentrent elles aussi sur la même zone que celle de Von mises.

**d. Les forces de réactions :****Fig.IV.18** : les forces de réactions.

La concentration des forces de réaction les plus importantes se remarque sur la zone coudée du tube.

e. Les déformations :

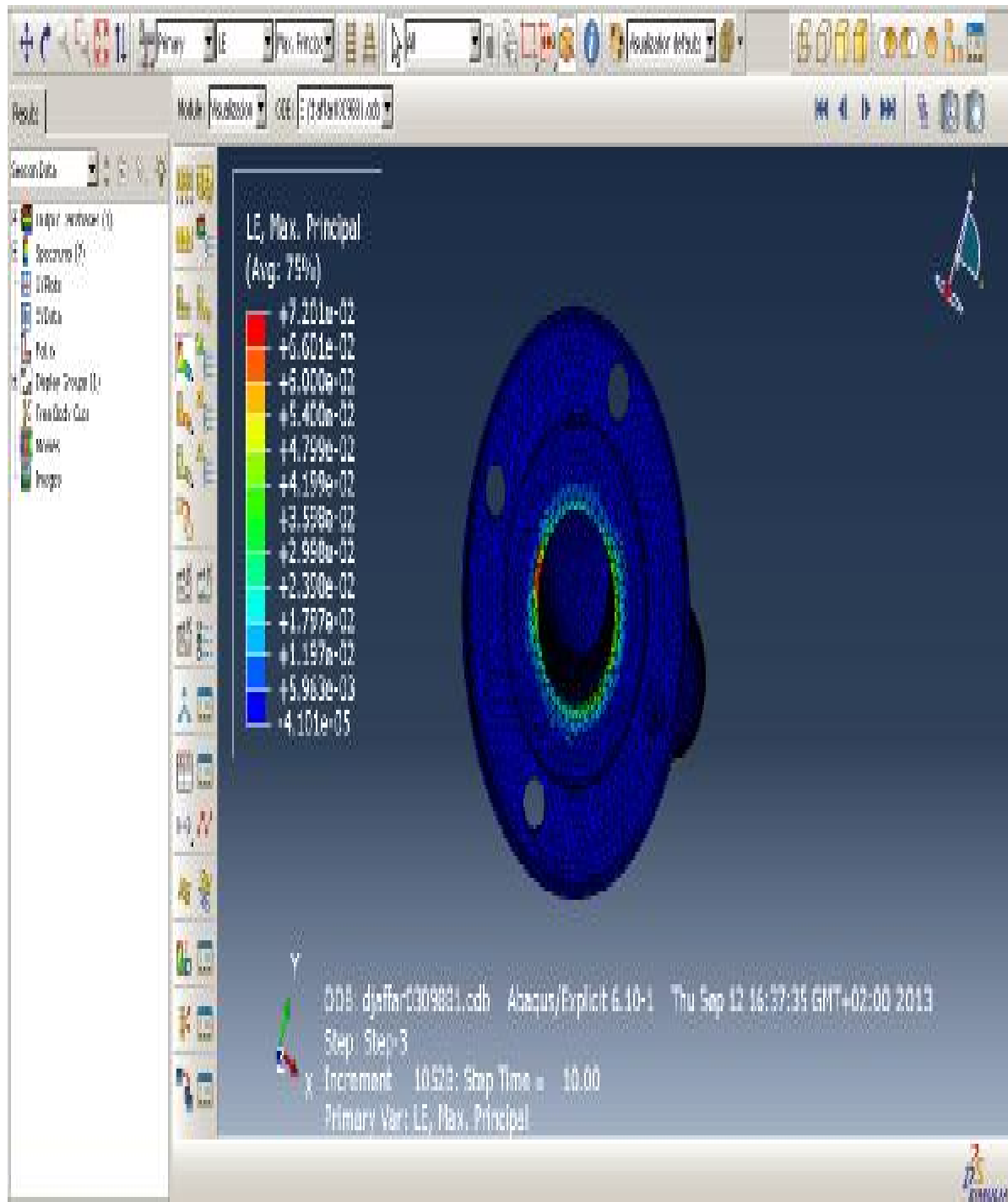


Fig.IV.19 : les déformations.

Les plus importantes déformations se localisent sur une zone où la volute et le tube sont assemblés. Cette zone là, est bien spécifiée avec la couleur rouge sur la figure IV.19.

Le résultat obtenu avec cette simulation concernant les déformations confirme la zone de rupture identifié sur la bride de refoulement.

On a sur la figure suivante IV.20. le diagramme des déformations en fonction du temps sur un élément choisi parmi les éléments les plus influencé par ces déformations (zone coloré en rouge).

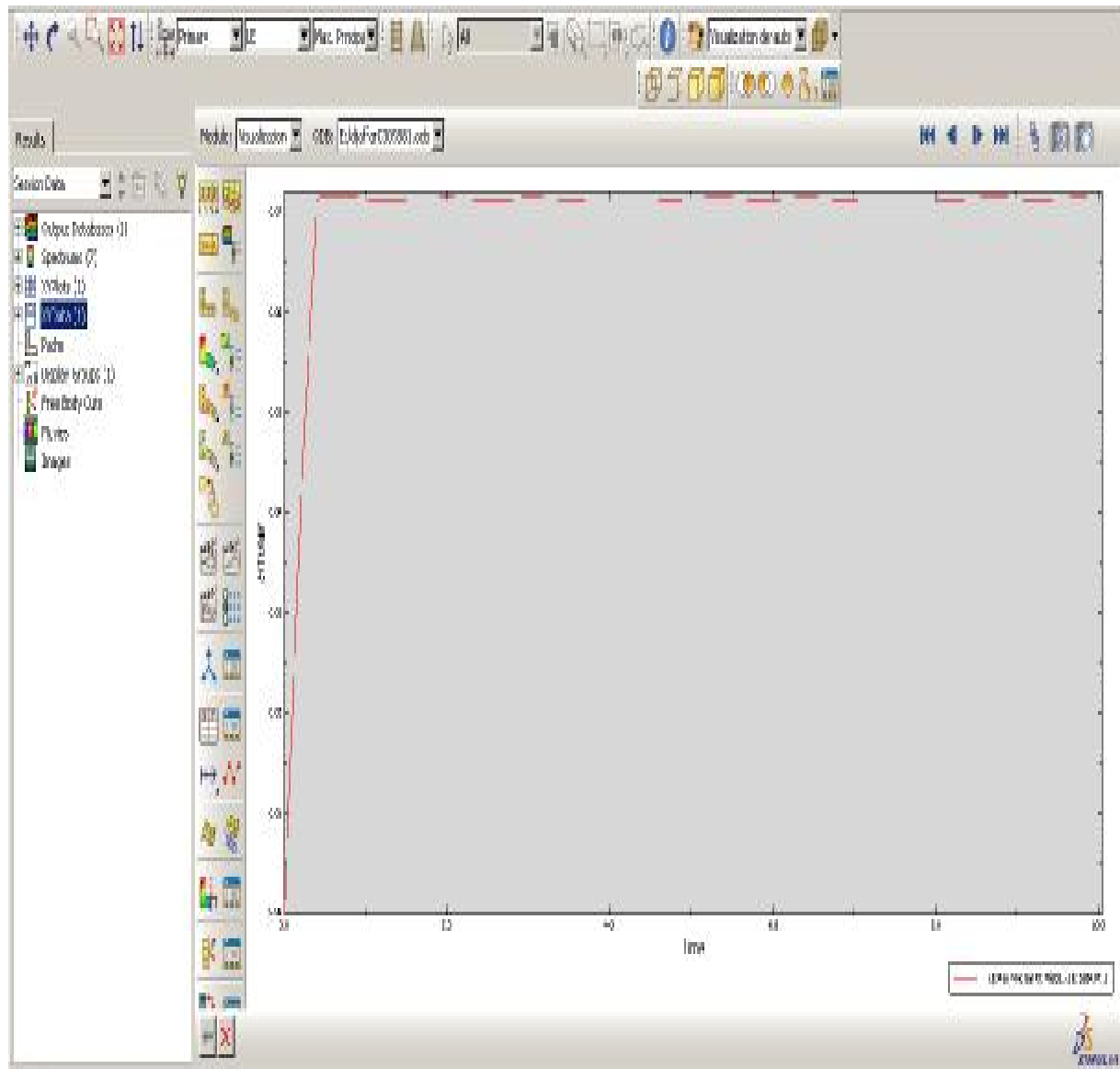


Fig.IV.20 : courbe des déformations en fonction du temps sur un élément.

D`prés la courbe précédente nous avons remarqué que le seuil de déformation de l`élément choisi atteint une grande amplitude en une courte durée du chargement.

## **Conclusion :**

Dans ce chapitre on a fait une simulation d`un modèle situe sur la pompe, ou on a détecté une fissure.

D`âpres notre simulation nous sommes arrivé à avoir des résultats qui prouve que la zone la plus dangereuse du modèle est celle ou les deux partie (tube et volute) sont assemblée et plus exactement au même niveau où la bride cède. Donc effectivement cette rupture est due à un mauvais montage de la pompe en question. Il est donc recommandé de reprendre l` installation de la pompe suivant les conditions de montage en question.

### **Conclusion générale:**

Dans notre travail, nous avons effectué une simulation numérique de la bride de refoulement d'une pompe centrifuge monobloc. Le fait de détecter une fissure sur cette bride, d'une manière répétitive, nous a poussés à effectuer cette étude en se servant du logiciel de calcul par éléments finis ABAQUS.

Avec des paramètres bien choisis, ABAQUS permet de simuler le comportement mécanique du matériau constituant la bride. Nous avons pu constater que ce logiciel est capable de simuler les essais mécaniques avec une précision relativement proche de la réalité.

Grâce à ce travail de simulation effectué, nous sommes parvenus à avoir des résultats qui confirment l'anomalie rencontrée au niveau du système de refroidissement de l'unité verre à couche.

Le système de refroidissement est constitué de trois pompes identique, étant donné que le problème réside au niveau d'une seule pompe ce qui mène à mettre en évidence l'hypothèse d'une mauvaise installation (désaxement par-rapport à la vertical) de la pompe. Chose confirmée par les ingénieurs en place, et confirmée par le calcul numérique.

Au final, il est recommandé à l'entreprise de procéder à la vérification de l'installation de la pompe et éventuellement sa réinstallation suivant les exigences du constructeur.