REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Yahia Fares – Medea

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE

Mémoire

présenté en vue de l'obtention du diplôme de

Master

GENIE MECANIQUE

Spécialité : ingénierie des matériaux et surfaces (IMS)

Thème

Détermination de la température de transition ductile-fragile TTDF par simulation d'un fonte FGS40-12 pour application cryogénique

Présenté par :

- **YKHLEF Hamza**
- **KHLIFATI Chahinaz**

Encadré par:

Dr. REBHI Redha

Année universitaire 2019/2020

Remerciement

C’est un plaisir et un moment très agréable de rendre hommage et de former de remerciements aux personnes qui d’une manière ou d’autre ont apporté leur soutien et contribué à finaliser ce travail.

Avant tout, nous devons remercier dieu le tout puissant qui nous a donné la force pour mener à terme ce dur travail.

Nous souhaitons également remercier Dr. REBHI pour ces conseils considérables, ses orientations et sa disponibilité. Et tous les amis et professeurs du lycée et CEM qui m'ont étudié.

Enfin nous remercions toute personne ayant participé à la réalisation de ce travail de prés ou de loin.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

A celle qui a inséré le goût de la vie et le sens de la Responsabilité….merci MERE.

A celui qui a été toujours la source d'inscription et de courage ….merci PERE.

A mon frère MOHAMDE

Et à toute ma famille YKHLEF et LOUZRI.

A monsieur l'encadreur Dr. R.REBHI pour son aide et ses orientation dans mon domaine

A tous mes professeurs au CEM et au lycée (M'hidi, Rabiai, Maouchi, Khoukhi et les restes), surtout professeurs A.BOUCIF et mon prof DOUIFI.

A toutes mes amis: TAREK , AHMED, KADER, MSTPHA, SIDALI BS.

Et mon binôme Chahinaz

HAMZA

rawpixel

Dédicace

Je dédie ce travail à :

A celle qui a inséré le goût de la vie et le sens de la Responsabilité….merci MERE.

A celui qui a été toujours la source d'inscription et de courage ….merci PERE.

A mes frères ABDELKARIM, MOURAD et FAISAL

Et à toute ma famille KHELIFATI.

Et mes sœurs RAZIKA, ZAHRA, MASAOUDA et Djamila avec leurs maris et leurs enfants

Et Saliha

A monsieur l'encadreur Dr. R.REBHI pour son aide et ses orientation dans mon domaine

A toutes mes amis : Khalida, Karima. Samiha, Imane, Ahlem, Ratiba et Lamia

Et mon binôme HAMZA.

CHAHINAZ

Résumer :

Aux basses température, la fonte à graphite sphéroïdal a une bonne ductilité. Où nous pouvons l'utiliser à la place d'acier pour faciliter le processus de coulée.

Dans cette étude, nous faisons une simulation de cette fonte pour connaître sa résistance a basse température dans l'application cryogénique en appliquant différentes forces.

Enfin, nous comparons la fonte a graphite sphéroïdal et la font grise.

Summary :

At low temperatures, spheroidal graphite cast iron has good ductility. Where we can use the steel square to facilitate the casting process.

In this study, we simulate this cast iron to find out its resistance at low temperature in cryogenic application by applying different forces.

Finally, we compare spheroidal graphite cast iron and make it gray.

ملخص:

في درجات الحرارة المنخفضة ، يكون الحديد الزهر الغرافيتي الكروي ذا ليونة جيدة. حيث يمكننا استخدامه مكان الصلب لتسهيل عملية الصب.

في هذه الدراسة، نقوم بمحاكاة هذا الحديد الزهر لمعرفة مقاومته عند درجة حرارة منخفضة في التطبيق المبرد عن طريق تطبيق قوى مختلفة.

أخيرًا ، نقارن حديد الزهر الغرافيتي الكروي بحديد الزهر الرمادي.

Sommaire

Listes des figures ……..I

Listes des tableaux …….. IV

Introduction générale ……..…1

Chapitre I : Recherche bibliographique

I.2. Mouton pendule de Charpy ……... 3

I.2.1. Introduction ……..…….3

I.2.2. Principe de l'appareil ……4

I.2.3. Description de l'appareil ……...4

Chapitre II : généralité sur les fontes

II.1. Définition ……6

II.2. Classification des fontes ……6

II.2.1. Fonte blanche ……..6

II.2.2. Fonte grise ……..…… 7

II.2.2.1. Famille de fonte grise ……..…… 9

II.3. Fonte à graphite sphéroïdal ……. 11

II.3.1. Définition ……...……11

II.3.2. Famille de fonte à graphite sphéroïdal ……12

II.3.2.1. Fonte GS ferritique ……..……12

II.3.2.2. Fonte GS ferritique / perlitique ……..……12

II.3.2.3. Fonte GS perlitique ……12

II.3.2.4. Fonte GS martensitique ……..…12

II.3.2.5. Fonte GS bainitique ……...….13

II.3.2.6. Fonte GS austénitique ……..…..13

II.3.2.7. Fonte ADI ……..….13

II.3.3. Composition chimique ……..14

II.3.4. Les propriétés de fonte GS ……...….15

II.3.5. Domaine d'utilisation de fonte GS ……....16

I.1. Fontes malléables ……..… 16

I.1.1. Malléabilisation par graphitisation (fonte malléable à cœur noir) ……... 17

I.1.2. Malléabilisation par décarburation (fonte malléable à cœur blanc) ……. 19

Chapitre III :transition de la température

III.1. Historique ……20

III.2. Introduction ……...……..20

III.3. Traitement thermique appliqués aux FGS ……

III.3.1. Généralité ……...…..21

III.3.1.1. Diagrammes T R C ……...…22

III.3.1.2. Diagrammes T.T.T ……23

III.3.2. Traitements thermiques de ferritisation ……..….25

III.3.2.1. Description du traitement thermique ……..…25

III.3.2.2. Influence du recuit de ferritisation sur le comportement mécanique ……26

III.4. La cryogénie ……

III.4.1. Introduction ……..27

III.4.2. Historique et domaine d'utilisation de la cryogénie ……28

III.4.3. Propriétés physiques aux basses températures …….

III.4.3.1. Propriétés des matériaux ……..30

III.4.3.1.1. Propriétés thermiques ……30

III.4.3.1.2. Propriétés mécaniques ……32

III.4.4. Transferts thermiques ……..…….33

III.4.4.1. Conduction ……..……..33

III.4.4.2. Convection ……33

Chapitre IV: simulation

IV.1. Définition ……35

IV.2. Principaux produits …….……36

IV.3. Environnements logiciels ……...…….37

IV.4. Partie simulation ……...……38

IV.4.1. Les déplacements et contraintes de fonte grise et FGS…….

IV.4.1.1. Fonte grise …….……38

IV.4.1.2. FGS ……...……39

IV.4.2. Effets de la température et de la force sur les déplacement et les contraintes ……...44

IV.4.3. Comparaison entre FGS et Fonte grise…….……47

IV.4.3.1. FGS……53

IV.4.3.2. Fonte grise …….……54

IV.5. Partie de conception ……53

Conclusion générale ……...……...……57

Bibliographie ……. V

Listes figures

Figure I.1.....**4**

Figure I.2 : Microstructure de la fonte malléable x 500 …….……**5**

Figure I.3 : Représentation du mouton pendule de Charpy et hauteurs à prendre en compte pour le calcul de l'énergie absorbée……**7**

Figure I.4 : Schématisation de détermination de la résilience……**8**

Figure II-1 : Influence de C et Si sur la structure de la fonte

Fontes blanches (I), fontes grises (II) et domaine (F + G)……**12**

Figure II-2 : Influence de la vitesse de refroidissement (de l'épaisseur de la pièce coulée) et de la somme C + Si sur la structure de la fonte……**13**

Figure II-3 : Microstructure de la fonte grise x 500……..……..**14**

Figure II-4 : Microstructure micrographique de la fonte à haute résistance à graphite sphéroïdal x250…….**15**

Figure II-5 : Microstructure de divers types de fonte à graphite sphéroïdal……...….**18**

Figure II-6 ; Micrographie de fonte à graphite Sphéroïdal avec matrice ferritique……..…..**19**

Figure III-1 : Diagramme T.R.C pour les fontes G.S. ← et ↑ avec 3,3 et 2,3 % de Si (refroidissement continu effectué après un traitement d'austénitisation à 875°C durant 10minutes)…….**23**

Figure III-2 : (a) Fonte GS avec 2,4 % de Si, matrice ferrito-perlitique……..…….....**24**

Figure III-3 : Diagramme T.T.T d'une fonte perlitique non alliée (austénitisation à 900°C, 10 minutes)…….**25**

Figure IV-1 : schéma de pièce utilise……..……**38**

Figure IV-2 : Le déplacement à f= 135 N et T^o= 20^{o}C……...……**39**

Figure IV-3 : Le déplacement à f= 135 N et T^o= 0^{o}C……...……..**39**

Figure IV-4 : La contrainte à f= 135 N et T^o= 20^{o}C……..…….**40**

Figure IV-5 : La contrainte à f= 135 N et T°= 0°C……..……...**40**

Figure IV-6 : Le déplacement à T°= -20°C et f= 135 N……..**41**

Figure IV-7 : Le déplacement à T°= -20°C et f= 126 N……..**41**

Figure IV-8 : Le déplacement à T°= -20°C et f= 118 N……..……**42**

Figure IV-9 : La contrainte T°= -20°C et f= 135 N ……**42**

Figure IV-10 : La contrainte T°= -20°C et f= 126 N……...**43**

Figure IV-11 : La contrainte T°= -20°C et f= 118N……**43**

Figure IV-12 : Le déplacement à f= 135 N et T°= 20°C……**44**

Figure IV-13 : Le déplacement à f= 135 N et T°= -20°C……**44**

Figure IV-14 : La contrainte à f= 135 N et T°= 20°C……**45**

Figure IV -15 : La contrainte à f= 135 N et T°= -20°…….……**45**

Figure IV -16 : Le déplacement en fonction de la longueur lorsque la force change ……..**46**

Figure IV -17 : La contrainte en fonction de la longueur lorsque la force change ……...**47**

Figure IV -18 : Le déplacement en fonction da longueur lorsque la température change …**48**

Figure IV -19 : La contrainte en fonction de la longueur lorsque la température change …**49**

Figure IV -20 : Le déplacement maximale en fonction de la force ……..**50**

Figure IV -21 : Le déplacement maximale en fonction da la température ……...**51**

Figure IV -22 : Le déplacement en fonction de la longueur à [-20°C ; 20°C] ……..**52**

Figure IV -23 : La contrainte en fonction de la longueur à [-20°C ; 20°C] ……..**52**

Figure IV -24 : Le déplacement en fonction de la longueur à [-20°C ; 20°C] ……..**53**

Figure IV -25 : La contrainte en fonction de la longueur à [-20°C ; 20°C] ……..**53**

Figure IV -26 : Conception de la pièce en U sur solidworks……...**54**

Figure IV -27 : Conception du support sur solidworks……**55**

Figure IV -28 : conception plaque de base sur solidworks……..**59**

Figure IV -29 : Conception pendule attaquant sur solidworks…….……...**56**

Figure IV.30 : Assemblage sur solidworks……..…….……...**57**

Listes tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau II-1	Caractéristiques mécaniques de certaines nuances des fontes GS	18
Tableau III-1	Caractéristiques des matériaux utilisés	22
Tableau III-2	Propriétés mécaniques sous sollicitations monotones, traction et ténacité, de fontes G.S. brutes de coulée et après traitement thermique de ferritisation	27
Tableau IV-1	caractéristique	37

Introduction générale

La fonte est un alliage métallique dont l'élément essentiel est le fer et dont la teneur en carbone est supérieure à 2%. Dans la pratique les pourcentages de carbone se situent le plus souvent entre 3 et 4%. Les fontes sont obtenues par des appareils de fusion qui garantissent une bonne homogénéité de leur composition chimique dont on cite les fours à arc et les fours à inductions, etc.

Les fontes constituent une famille de métaux ferreux avec une large gamme de propriétés mécaniques. Elles sont coulées dans des moules. On utilise beaucoup la fonte pour son coût peu élevé et sa large gamme des propriétés physiques et mécaniques.

Les fontes sont utilisées pour la réalisation de pièces de formes complexes en raison de leur remarquable aptitude à la coulabilité. Parmi cette famille de matériaux, la fonte à graphite sphéroïdal (fontes G.S. ADI) qui nous intéresse plus particulièrement. [1]

Les fontes à graphite sphéroïdal (Fontes GS) sont des fontes spéciales dans lesquelles la cristallisation du carbone a été ralentie pour obtenir des caractéristiques mécaniques de résistance qui en font un matériau proche de l'acier et facile à usiner.

Les études de la caractéristique de fragilité-ductilité du matériau ont été menées, dans un premier temps, en recourant à des dispositifs expérimentaux rudimentaires. Parmi les premiers savants à avoir proposé un dispositif permettant l'obtention de résultats suffisamment fiables, Georges Charpy a conçu un pendule-mouton permettant d'impacter brusquement une éprouvette entaillée au niveau de la zone d'entaille de telle sorte à provoquer sa rupture (cassure) et calculer ensuite l'énergie de rupture du matériau. Ce pendule constitue aujourd'hui l'appareil de caractérisation de la résistance au choc (résilience) d'un matériau. [2]

Pour rapporter l'essentiel de notre travail, nous avons scindé ce mémoire en quatre (04) chapitres. Après une introduction générale au sujet, le premier chapitre présente deux types de fonte malléable (cœur blanc et cœur noir) et décrit le mouton pendule Charpy avec le principe. Le deuxième semestre est structuré essentiellement pour les généralités de tous les types de fonte, en particulier la fonte à graphite sphéroïdal qui est le matériau de la pièce que nous utiliserons dans notre étude. Ensuite, un troisième chapitre portera essentiellement sur la température de la transition fragile-ductile pour un fonte à graphite sphéroïdal et la cryogénie avec leurs propriétés.

Le dernier chapitre portera sur la conception de notre pièce. Nous rapportons les résultats étude par simulation par logicielle ANSYS. En plus de conception le mouton Charpy.

Nous terminons cette mémoire par une conclusion générale les principaux résultats de cette étude.

Chapitre I

RECHERCHE BIBLIOBRAPHIQUE

I. Mouton pendule de Charpy à de placer

I.1.1. Introduction

Le mouton pendule Charpy se compose d'un couteau fixé sur un marteau qui oscille dans un plan vertical autour d'un axe. Une partie de l'énergie emmagasinée dans la chute du pendule est utilisée pour rompre l'éprouvette. Le centre de gravité du pendule est toujours très voisin de l'arête du couteau du pendule, Fig 2.4.

Pour exécuter l'essai Charpy, le couteau est écarté de la verticale d'une hauteur h_0 correspondant à une énergie de départ (en général proche de W0 = 300 joules). On libère le couteau, qui dans sa chute, en passant à la verticale, rompt l'éprouvette. On mesure alors la hauteur h1 à laquelle remonte le pendule pour calculer l'énergie non absorbée W1. L'énergie absorbée par l'éprouvette est représentée par la différence W0 – W1. [1]

Avec, W0 = PM *hi et W1= PM*hf.

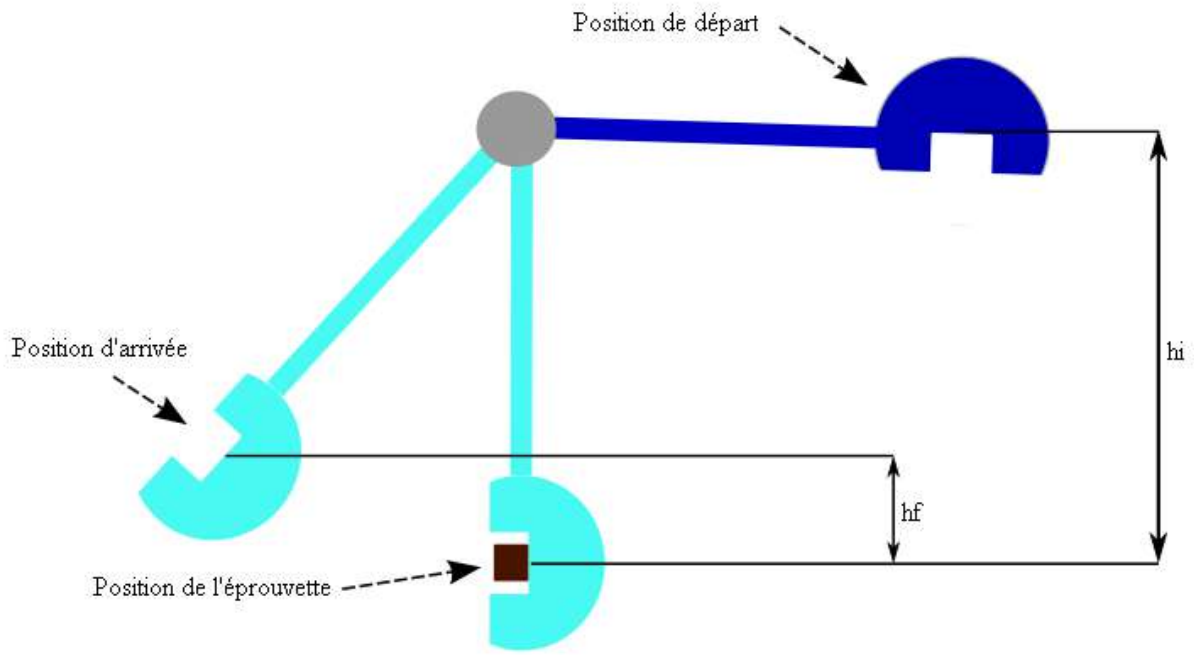


Figure I.3 : Représentation du mouton pendule de Charpy et hauteurs à prendre en compte pour le calcul de l'énergie absorbée.

I.1.2. Principe de l'appareil :

En usage industriel, les matériaux ont souvent sollicité à des contraintes multidirectionnelles et aussi à des contraintes d'impact multidirectionnel sans fracturation. Les valeurs caractéristiques des matériaux obtenus dans l'essai de traction sont soit totalement inadaptées ou adapté uniquement avec une réservation pour assurer les performances de la matière dans ces conditions.

Ce fait a été reconnu dès le début, et les méthodes d'essai qui permettent de déterminer la performance d'un matériau dans des conditions de stress de l'impact ont été développées.

En raison de sa simplicité le test de résilience est le plus important des différents essais d'impact disponibles pour les essais de matériaux. Le test de résilience, dont le principe est illustré à la figure (I.4), est effectué à l'aide d'un testeur de choc à pendule.

L'attaquant du pendule frappe une éprouvette entaillée avec une énergie cinétique prédéterminée et provoque une distribution de contrainte dynamique, multiaxiale. L'énergie entraînant l'éprouvette à se briser est considérée comme une mesure de la ténacité du matériau. Ceci est généralement indiqué directement par un pointeur de fin.

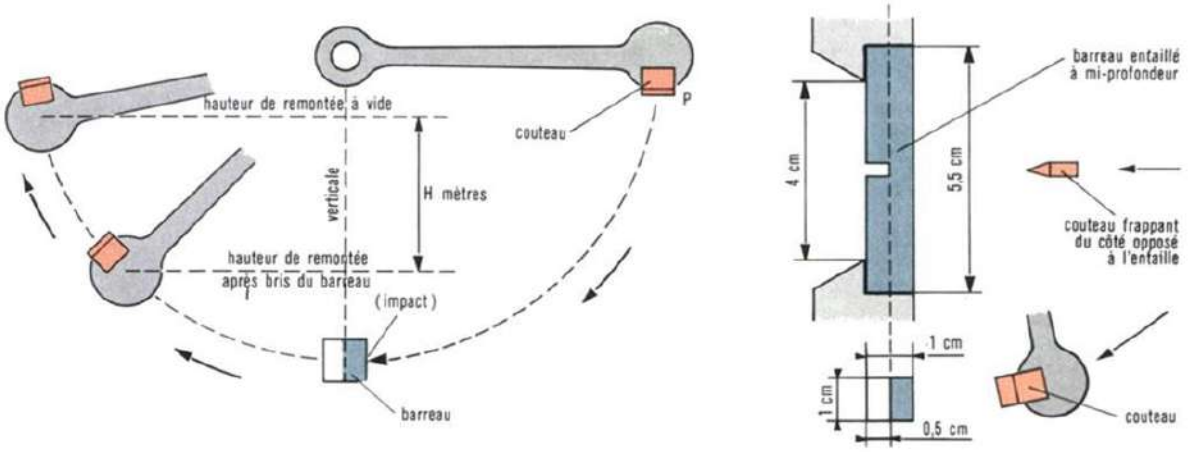


Figure I.4: Schématisation de détermination de la résilience

I.1.3. Description de l'appareil:

La machine d'essai de choc pendulaire se compose d'un châssis robuste stable, une unité indiquant l'énergie d'impact absorbée, le pendule ainsi que le mécanisme de verrouillage avec deux leviers de dégagement.

Le pendule est monté dans roulement sans friction; la double échelle de l'unité de l'indicateur peut être lue facilement, même à une distance considérable.

Le pendule est intégrée dans les parties supérieures du cadre; la partie inférieure abrite les supports et repose pour l'échantillon d'essai ainsi qu'un frein robuste pour arrêter le balancement pendulaire gratuités- dos.

Les supports de fond et le dos sont réglables et fritté avec un arrêt. Pourvu que la durée de palier soit symétrique par rapport à la pointe de l'attaquant, le spécimen est alors frappé au milieu.

La caractéristique particulière de construction de la nouvelle machine d'essai de choc pendulaire est le fait qu'il offre la possibilité de changer l'énergie potentielle de 15 Nm à 25 Nm et vice versa.

L'énergie d'impact est modifiée en ajoutant ou en enlevant les quatre poids supplémentaires, dont chacun est fixé à l'attaquant avec deux vis. Cette modification remplit ainsi l'une des exigences de din53 453 / ISO, à savoir, que l'énergie maximale admissible du testeur de choc à pendule dépasse pas 15 Nm.

La sécurité est assurée par la disposition des deux leviers de dégagement et un garde de sécurité qui empêche l'accès involontaire à la région où le pendule frappe. Ce dernier recueille et fragments qui peuvent voler au cours de l'essai également [2].

Chapitre II

Généralité sur les fontes

II.1. Définition :

La fonte est un alliage de fer et de carbone. Cet alliage est obtenu en incorporant au fer au moins 2.11% de carbone.

Le carbone est un élément non métallique que l'on trouve en général dans le charbon. En fusion, la fonte liquide se moule facilement et prend très fidèlement la forme des moules correspondant aux pièces que l'on veut fabriquer.

La fonte est très utilisée dans la fabrication de mobilier urbain, elle est également utilisée dans de nombreuses pièces industrielles et domestiques. [1]

II.2. Classification des fontes :

Les alliages de fer et de carbone dont la teneur en carbone est supérieure à 2,11% s'appellent fontes. Outre ces deux éléments, elles contiennent essentiellement du Si, Mn, P, S, dans le cas des fontes non alliées et de plus du chrome, du molybdène, de l'aluminium, etc…, dans le cas des fontes alliées.

Dans une fonte, le carbone peut se présenter sous deux formes :

- ✓ **Cémentite :** l'aspect de la cassure est clair d'où l'appellation de fonte blanche.
- ✓ **Graphite :** l'aspect de la cassure est gris d'où l'appellation de fonte grise.

D'après la forme du graphite et les conditions de sa formation, les fontes sont classées de la façon suivante :

- Fonte blanche.
- Fonte grise.
- Fonte malléable.
- Fonte à graphite sphéroïdal.

II.2.1. Fonte blanche :

La majorité du carbone se trouve sous forme de cémentite, ce qui donne à la cassure une couleur claire spécifique, c'est pourquoi elle est dite blanche. Elle est caractérisée par des teneurs en carbone et au silicium relativement faibles et par une teneur élevée en manganèse. Ces fontes sont obtenues lorsque le refroidissement est assez rapide et la température de coulée est assez basse. La cémentite n'a pas de temps pour se décomposer et l'on obtient une

fonte sans graphite. Ces types de fontes sont obtenus dans le haut fourneau et sont généralement utilisés pour l'élaboration de l'acier ou de la fonte grise.

La fonte blanche présente un retrait élevé, ce qui oblige à prévoir des formes simples des sections uniformes sous angles vifs. Les caractéristiques physiques et mécaniques moyennes des fontes blanches brutes et coulées sont les suivantes :

- Masse volumique : (7,5 à 7,8) g/cm^3.
- Coefficient de dilatation à (0 à 300) °C : (9 à 11).10^{-6} ;
- Résistivité électrique : 80 μΩcm ;
- Résistance à la compression : (1500 à 1800) N/mm² ;
- Module d'élasticité : (168000 à 183000) N/mm² ;
- Résistance à la flexion : (350 - 750) N/mm² ;
- Dureté Brinell (350HB à 500HB) ;
- Retrait de moulage (13 à.21) mm/m.

La fonte blanche est parfois appelée ''fonte trempée'' car elle présente un état trempé (hors d'équilibre) par rapport à la fonte grise (état stable). La fonte blanche est obtenue par un moulage en coquille métallique entraînant un refroidissement plus rapide. Ainsi, l'extérieur de la pièce est en fonte blanche (12 à 40) mm alors que le cœur est en fonte grise. Ces deux parties sont séparées par une zone mixte en fonte truitée.

Les principaux domaines d'emploi des fontes blanches sont les suivants :

- Galets de dressage, cylindres de broyage, boulets.
- Blindage des broyeurs, pièces de pompes, de ventilateurs.
- Cames, poussoirs, guides.
- Rouleaux pour le travail des métaux, du caoutchouc et des matières plastiques.

Pour obtenir des pièces en fontes blanche, légèrement plus dure qu'a l'état brut, on utilise des additions modérées de nickel, chrome ou de nickel-chrome. La dureté atteint jusqu'à 600 HB. Si l'emploi des fontes blanches, exige des caractéristiques de résistance à la chaleur et aux corrosions sévères, on ajoute jusqu'à 35 % Cr, (supports des pièces du four de recuit, pièces de moteurs diesel,. de chaudières, d'échangeurs).

II.2.2. Fonte grise :

La dénomination de fonte grise, fait allusion à l'aspect de la cassure grise. Dans ce type de fonte, la majeure quantité du carbone se trouve sous forme de graphite. Au fond, c'est un alliage Fe-C-Si, contenant comme impuretés inévitables du Mn, S et P.

Une coupe métallographique montre que le graphite se présente sous formes de lamelles, ce qui caractérise particulièrement ces fontes, et ce qui détermine leurs propriétés principales. Les plus utilisées sont les fontes hypoeutectiques, titrant de (2,4 à 3,8 % C,) plus cette teneur est grande, plus il se forme du graphite et plus les propriétés mécaniques de la fonte sont faibles.

Le silicium dont la teneur dans les fontes grises varie le plus souvent de 1,2 à 3,5 % influe fortement sur leur structure et par suite sur leurs propriétés. L'introduction du silicium diminue la solubilité du carbone dans le fer; il en résulte que le domaine de l'austénite se rétrécit. Le silicium favorise la graphitisation et agit dans le même sens que le ralentissement du refroidissement. En modifiant d'une part la teneur en carbone et de l'autre, la vitesse de refroidissement, on peut obtenir des matrices métalliques à structure différente.

Le diagramme structural des fontes, traduisant la structure des pièces moulées aux parois de 50 mm d'épaisseur en fonction de la teneur en silicium et carbone est représenté sur la figure 140 b, ci-dessous. La teneur en carbone étant donnée, plus le titre de silicium est élevé, plus le processus de graphitisation est complet. Plus la teneur en carbone est grande, il faut moins de silicium pour obtenir une structure donnée.

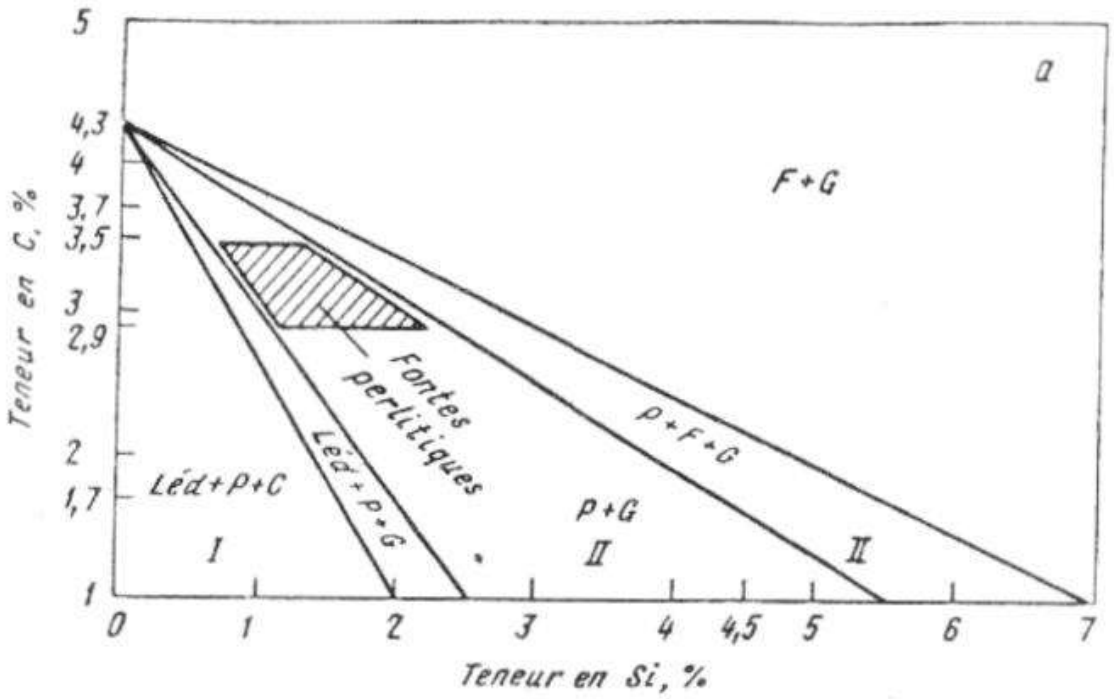


Figure II-1: Influence de C et Si sur la structure de la fonte

Fontes blanches (I), fontes grises (II) et domaine (F + G)

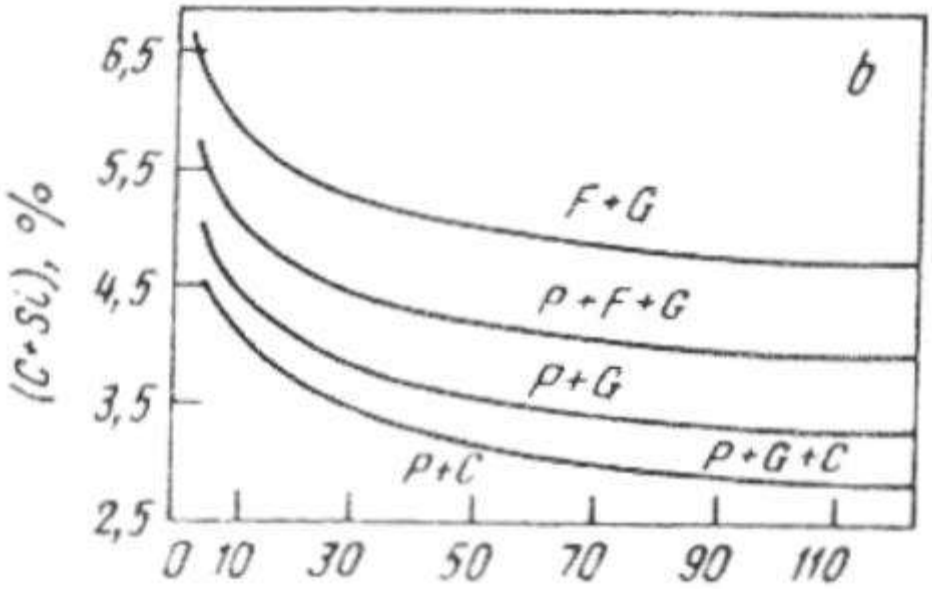


Figure II-2: Influence de la vitesse de refroidissement (de l'épaisseur de la pièce coulée) et de la somme C + Si sur la structure de la fonte.

Fontes blanches (I), fontes grises (II) et domaine (F + G)

II.2.2.1. Famille de fonte grise :

a) Fonte demi-truitée : La fonte demi-truitée est celle dont la plus grande partie du carbone (> 0,8 %), se trouve sous forme de Fe3C, et dont la structure est composée de : lédéburite + perlite + graphite lamellaire.

b) Fonte grise perlitique : Les 0,7 à 0,8 % C de cette fonte se trouvent sous forme de cémentite qui fait partie de la perlite et dont la structure se compose de : perlite + graphite lamellaire.

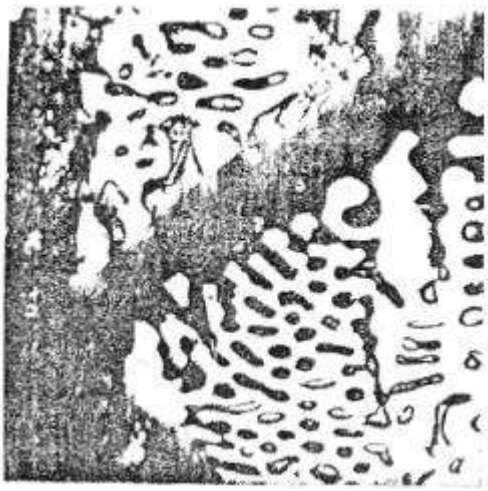
c) Fonte grise ferrito-perlitique : La décomposition de la cémentite eutectoïde détermine pour cette fonte la teneur en carbone lié, qui varie de 0,1 à 0,7 %. La structure étant : perlite + ferrite+ graphite lamellaire.

d) Fonte grise ferritique : Dans ce cas, tout le carbone se trouve sous tortue de graphite et la structure est composée de : ferrite + graphite lamellaire.

e) Fonte GL (graphite lamellaire) : C'est la plus courante des fontes grises. Le graphite s'y trouve sous forme de lamelles.

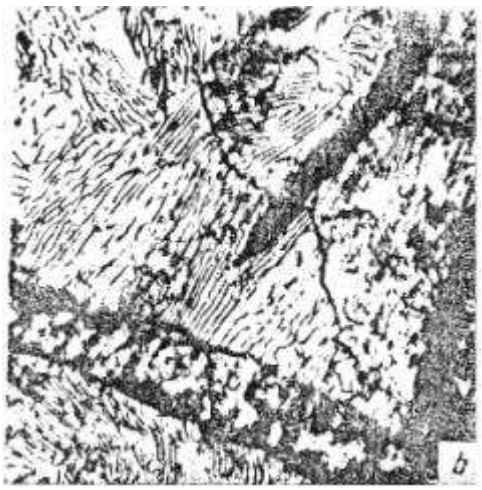
Les propriétés de la fonte à graphite lamellaire :

- facilité d'usinage.
- très bonne résistance à la corrosion et à la déformation à chaud.
- stabilité dimensionnelle (réalisation de machine-outil silencieuse et stable géométriquement).
- excellente coulabilité.
- prix du métal peu élevé.[2]

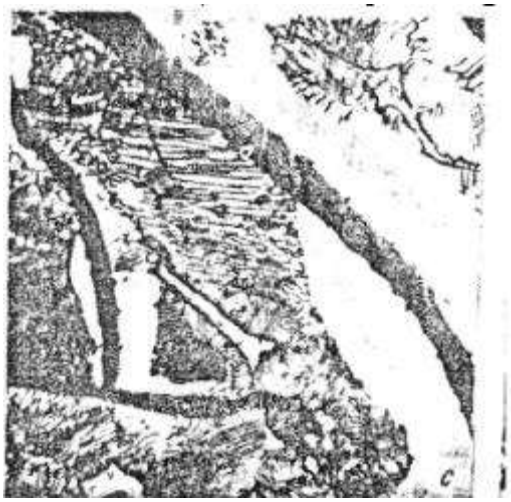


a. Fonte demi-truitée

(Iédéburite + perlite + graphite)



b. Fonte perlitique



c. Fonte ferrito-perlitique



d. fonte ferritique

Figure II-3: Microstructure de la fonte grise x 500

II.3. Fonte à graphite sphéroïdal :

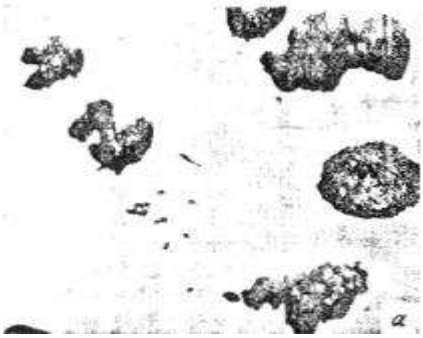
Dans les fontes à graphite sphéroïdal la teneur en carbone est de 3,5 à 4%, appelées aussi fontes ductiles. Ces fontes sont obtenues par l'addition d'éléments spéciaux, le plus souvent à base de magnésium dans le bain de la fonte liquide (dans une poche de traitement sandwich), qui transforme le graphite en sphères ou bien nodules [3]

II.3.1. Définition :

les fonte à graphite sphéroïdal sont des alliages fer-carbone-silicium, appelées aussi fonte ductile, dans lesquelles le carbone graphitique se présente directement, après coulée et refroidissement dans le moule sous forme de petits sphéroïdes compacts assez régulièrement répartis dans une matrice d'acier [4]

Comme il a été déjà noté le graphite lamellaire rend la fonte fragile. Ainsi, pour améliorer la résistance mécanique de la fonte grise, on ajoute des éléments d'addition tels que le Ni, Cr, Mn ou bien on cherche à améliorer l'effet du graphite sphérique. Dans ce cas, la fonte est appelée fonte à graphite sphéroïdal. [5]

La fonte à graphite sphéroïdal s'obtient par addition de magnésium à la fonte liquide.



Coupe non soumise à l'attaq



Fonte perlitique.

Fonte ferritique.

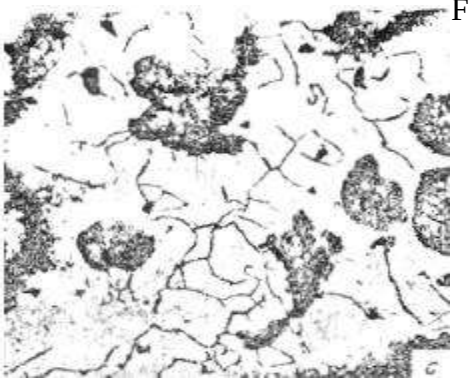


Figure II-4: Microstructure micrographique de la fonte à haute résistance à graphite sphéroïdal x250.

II.3.2. Famille de fonte à graphite sphéroïdal :[6]

La fonte à graphite sphéroïdal n'est pas un matériau unique, mais une famille de matériaux qui présente une vaste gamme de propriétés obtenues par le contrôle de sa microstructure.

La caractéristique commune à toutes les fontes à graphite sphéroïdal est la forme à peu près sphérique des nodules de graphite, qui ont des propriétés anti-fissuration et donnent à la fonte GS sa ductilité. Ces caractéristiques essentielles à la qualité et à l'homogénéité de la fonte GS sont mesurées et réglées avec un grand degré de précision par les maîtres fondeurs.

II.3.2.1. Fonte GS ferritique :

Dans une matrice de ferrite, les sphéroïdes de graphite donnent à la fonte de bonnes propriétés de ductilité, de résistance à l'impact et de résistance à la traction, ainsi qu'une limite d'élasticité équivalente à celle d'un acier à faible teneur en carbone. On peut couler directement les pièces en fonte GS ferritique brute, mais on peut aussi les soumettre à un traitement thermique supplémentaire de recuit afin de maximiser leur ductilité et leur ténacité à basse température.

II.3.2.2. Fonte GS ferritique / perlitique :

Ce type de fonte GS est le plus commun, habituellement, on coule directement les pièces à l'état brut. Les sphéroïdes de graphite sont dans une matrice contenant de la ferrite et de la perlite, et on obtient des propriétés intermédiaires entre celles des fontes ferritiques et perlitiques, avec de bonnes caractéristiques d'usinabilité et de faibles coûts de production.

II.3.2.3. Fonte GS perlitique :

Les sphéroïdes de graphite dans une matrice de perlite donnent une fonte à haute résistance dotée d'une bonne résistance à l'usure et à caractéristiques moyennes de ductilité et de résistance à l'impact. Son usinabilité est également meilleure que celle des aciers à propriétés physiques comparables. Les trois types de fonte GS ci-dessus sont les plus communs, et on les utilise habituellement pour couler des pièces moulées à l'état brut, mais on peut également allier la fonte GS et/ou la soumettre à un traitement thermique pour obtenir les types ci-dessous, qui servent à de nombreuses autres applications.

II.3.2.4. Fonte GS martensitique :

Pour obtenir ce type de fonte GS, il faut éviter la formation de perlite en ajoutant des proportions adéquates d'alliages, et utiliser un traitement thermique de trempe. La matrice de martensite trempée en fait un matériau à haute résistance mécanique et d'une grande résistance à l'usure, mais à plus faible ductilité et ténacité.

II.3.2.5. Fonte GS bainitique :

On peut obtenir ce type de fonte par traitement thermique mais sans maintien de la température intermédiaire, la fonte obtenue est un matériau dur et d'une grande résistance à l'usure.

II.3.2.6. Fonte GS austénitique :

Allié de façon à obtenir une matrice austénitique, ce type de fonte GS présente de bonnes caractéristiques de résistance à la corrosion et à l'oxydation, de bonnes propriétés magnétiques, ainsi qu'une bonne résistance et une grande stabilité dimensionnelle aux températures élevées.

II.3.2.7. Fonte ADI :

Le type de fonte GS le plus récent, la fonte ADI, est un sous-groupe de fontes GS produites en donnant à de la fonte GS ordinaire un traitement bainitique étagé spécial. Presque deux fois plus robuste que la fonte GS perlitique, la fonte ADI conserve ses caractéristiques de forte dilatation et de grande ténacité, qui font d'elle un matériau à caractéristiques supérieures de résistance à l'usure et de résistance à la fatigue.

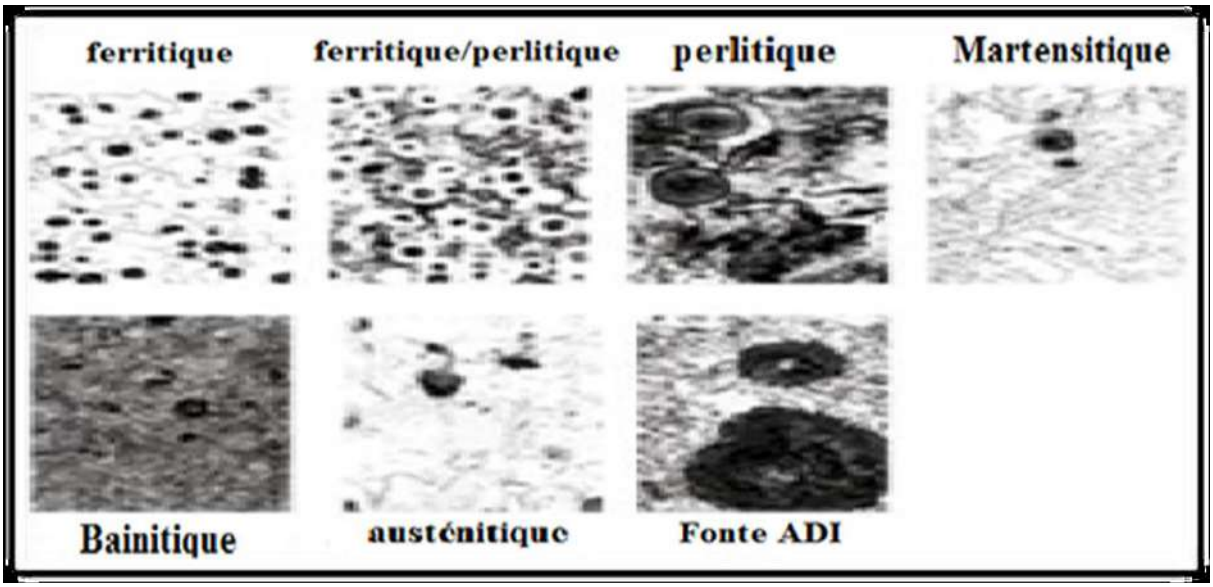


Figure II-5: Microstructure de divers types de fonte à graphite sphéroïdal.

II.3.3. Composition chimique :

La composition chimique de la fonte à graphite sphéroïdal non alliée correspond généralement à des pourcentages compris dans les plages suivantes :

$\mathbf{C_{totale}}$ varie de 3.4 à 4.0 % ;

Si varie de 2.0 à 3.0 % ;

Mn varie de 0.10 à 0.80 % ;

P < 0.10 % ;

S < 0.02 % (le plus bas possible, après désulfuration si nécessaire) ;

Mg varie de 0.02 à 0.10 % ;

Le pourcentage de certains éléments dits nocifs (Bi, Sb, Pb, Ti) ne doit pas dépasse certaines valeurs généralement très basse. Pour certaines applications, la teneur en silicium peut être comprise entre 1 et 1.5 %. Dans la recherche de l'obtention d'une structure ferritique sans avoir recours aux traitements thermiques, il peut être nécessaire de maintenir le pourcentage en manganèse à une valeur inférieure à 0.15% et de veiller à ce que les teneurs en certains éléments ne dépassent pas une valeur déterminée (0.07% pour le chrome, 0.02% pour l'étain, 0.50 % pour le cuivre).

Certains éléments d'alliage peuvent être ajoutés, en quantité modérée, a la composition de base en vue d'améliorer la tenue de la pièce à la chaleur (Cr, Mo….), à l'usure (Ni, Cr…), à la

corrosion (Cu…) ou encore de réduire la sensibilité à l'épaisseur (Ni). En quantités élevées, la présence d'éléments d'alliage entraine la formation de structures particulières.

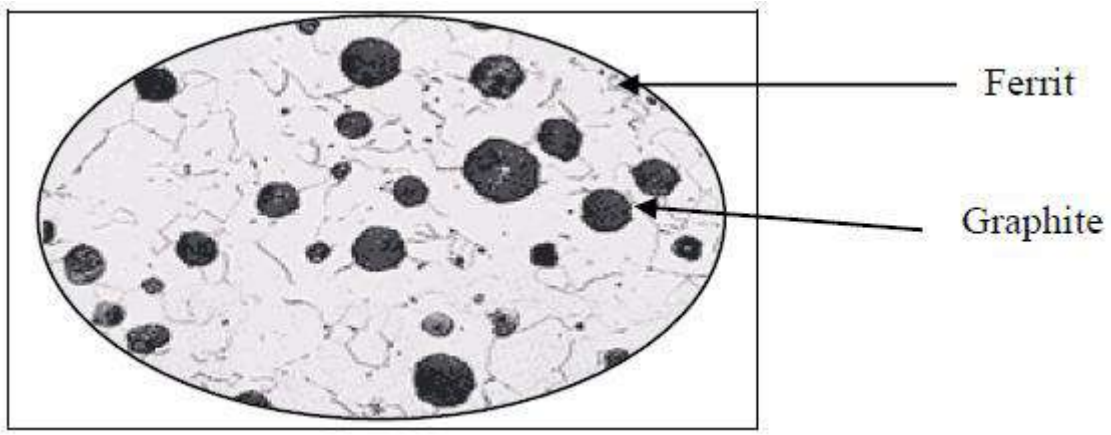


Figure II-6: Micrographie de fonte à graphite Sphéroïdal avec matrice ferritique **[3]**

Variété	Nuance	R mini (da N /mm2)	Re (da N /mm2)	A (%)	Dureté (HB)
Fonte à Graphite Sphéroïdal	**FGS 800-2**	80	48	2	248 à 352
	FGS 700-2	70	42	2	229 à 302
	FGS 600-3	60	37	3	192 à 269
	FGS 500-7	50	32	7	170 à 241
	FGS 400-12	40	25	12	≤201
	FGS 370-17	37	23	17	≤179

Tableau II-1 : Caractéristiques mécaniques de certaines nuances des fontes GS.

II.3.4. Les propriétés de fonte GS :

Les fontes à graphite sphéroïdal présentent :

- Bonne coulabilité permettant l'obtention de formes complexes.

- Résistance à la traction comparable à celle des aciers mais qui s'usinent facilement, qui présentent des allongements qui peuvent dépasser les 20%, et qui ont une bonne capacité d'amortissement des vibrations.
- Un module d'élasticité voisin de celle des aciers.
- Bonne résistance aux chocs.
- Bonnes propriétés de frottement.
- Capacité de déformation avant rupture plus élevée que celle des fontes à graphite lamellaire.
- Une résistance à la rupture par traction ou par flexion deux à trois fois supérieure à celle des fontes à graphite lamellaire.
- Une limite de fatigue importante lors d'efforts cycliques. [7]

II.3.5. Domaine d'utilisation de fonte GS :

La fonte à graphite sphéroïdal est très utilisée dans les diverses branches de l'industrie comme :

- Pièces de construction automobiles (vilebrequins, culasses, …) ;
- Pièces pour l'industrie lourde (cylindres de laminoirs, pièces pour presses ;
- Pièces pour l'industrie chimique et pétrolière (conduite, pompes, valves, …).[6]

II.4. Fontes malléables

La fonte malléable s'obtient par le maintien prolongé aux températures élevées (recuit) des pièces en fonte blanche. Le recuit produit un graphite nodulaire déchiqueté, qui, par rapport au graphite lamellaire, diminue beaucoup moins la résistance et la plasticité de la matrice métallique.

La matrice métallique d'une fonte malléable est constituée de ferrite (fonte malléable ferritique ou à cœur noir, Figure I.1) et plus rarement. de perlite (fonte malléable perlitique ou à cœur blanc). La fonte malléable à cœur noir est largement employée dans l'industrie, car elle est la plus plastique.

La composition chimique d'une fonte blanche, prévue pour malléabilisation par recuit, peut varier dans les limites de tolérances suivantes : (2,5 à 3) % C, (0,7 à 1,5) % Si, (0,3 à 1)% Mn, 0,12 % S et ≤ 0,18 P, en fonction de la structure imposée du métal de base.

La teneur de la fonte en carbone et en silicium est. réduite. Un plus faible titre de carbone améliore la plasticité du fait de la diminution de la quantité de graphite qui se dégage au recuit, alors que la teneur en silicium élimine la précipitation éventuelle au refroidissement du graphite lamellaire dans la structure des moulages.

L'épaisseur de la section des pièces coulées ne doit pas dépasser 40 à 50 mm. Lorsqu'elle est plus grande, l'âme de la pièce peut devenir le siège de formation du graphite lamellaire qui rend la fonte inapte au recuit.

Il existe deux procèdes pour malléabiliser les fontes. Ces deux procédés s'appliquent à des pièces de formes définitives compliquées et qui seraient difficiles à obtenir en acier (par coulée ou par forgeage). La matière à traiter, est la fonte blanche et le produit obtenu est doux et tenace. Le premier procédé, étant de loin, le plus employé[1].

Une fonte malléable est une fonte blanche qui a subi l'un des traitements thermiques tels que :

- Un recuit de graphitisation pour la transformation de la cémentite en graphite nodulaire (malléable à cœur noir).
- Un recuit de décarburation dans le but d'éliminer le carbone de la couche superficielle (malléable à cœur blanc). [2]

II.4.1. Malléabilisation par graphitisation (fonte malléable à cœur noir)

L'opération consiste à placer les pièces en fonte blanche dans des caisses, souvent remplies de sable et chauffées jusqu' environ 950°C, avec un maintien suffisant : c'est la graphitisation primaire qui correspond à la décomposition de la cémentite contenue dans le lédéburite (A + Cm), et l'établissement d'un équilibre stable (austénite + graphite).

$$Fe3C \rightarrow C + 3.Fe$$

Le produit de la décomposition est du graphite nodulaire déchiqueté. A partir de 950°C, on peut obtenir deux types de fontes malléables.

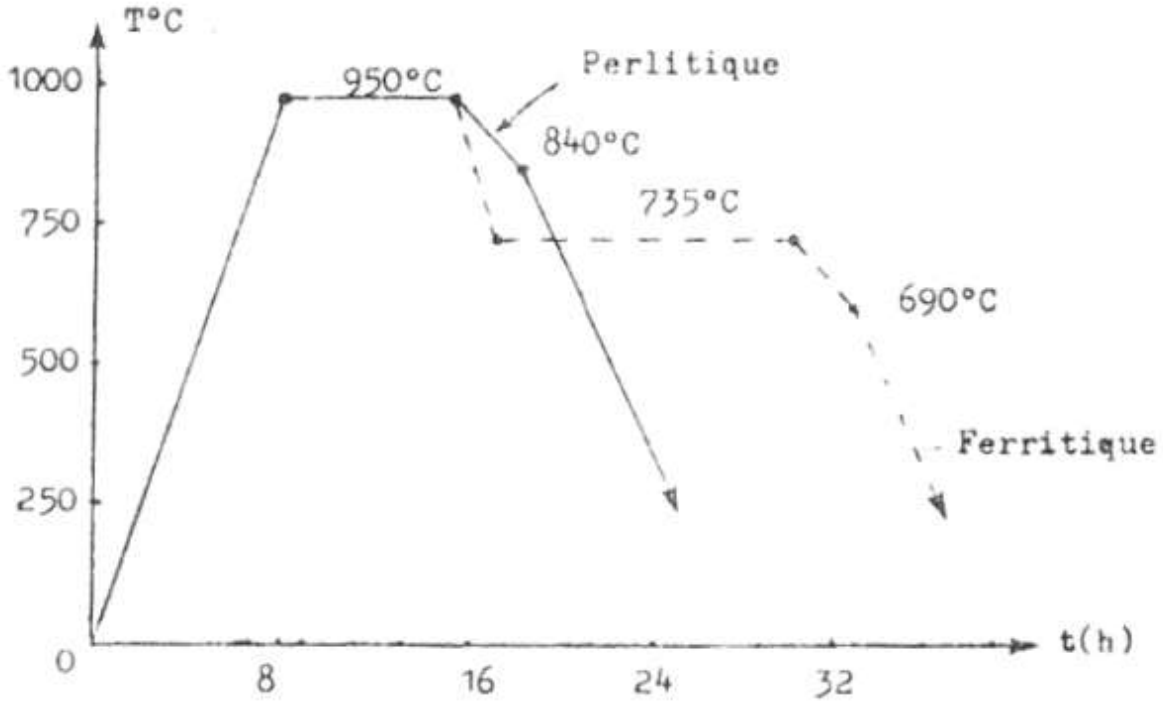


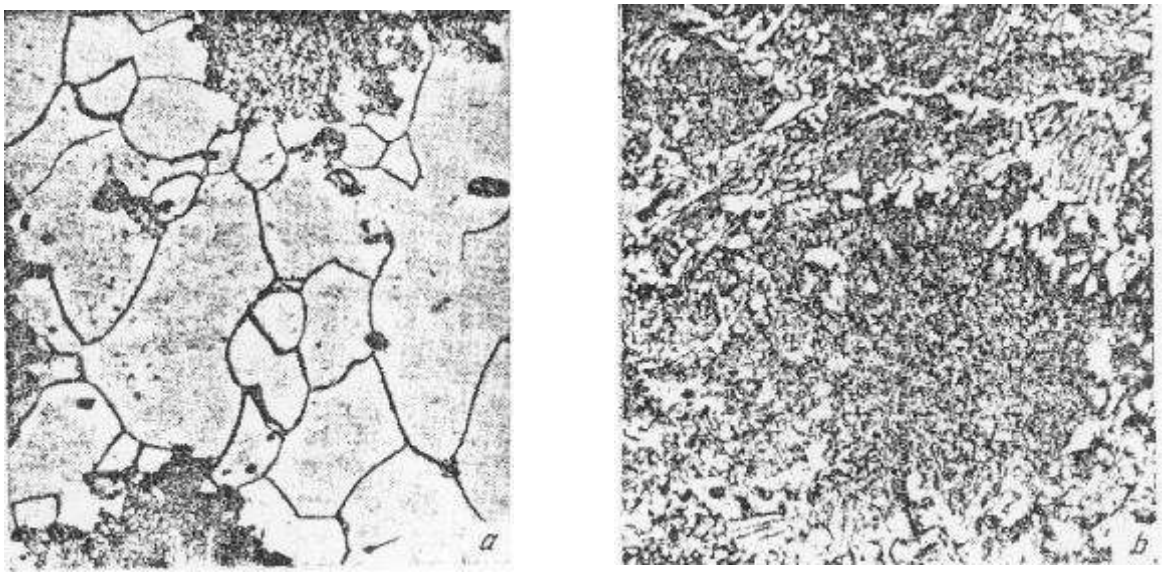
Figure I.1

a. Fonte malléable ferritique :

On refroidit les pièces jusqu'à environ 735°C pendant 12 heures pour avoir un graphite secondaire : l'austénite se décompose en ferrite et graphite. A partir de 690°C, les pièces peuvent être refroidies à l'air.

b. Fonte malléable perlitique :

La nature de la fonte est la même, mais le mode de refroidissement est différent. La décomposition de la cémentite est suivie d'un refroidissement à l'air à partir de 840°C, on obtient ainsi une matrice entièrement perlitique pour des pièces minces (perlite + graphite).



a. Fonte ferritique. b. Fonte perlitique

Figure I.2 : Microstructure de la fonte malléable x 500.

II.4.2. Malléabilisation par décarburation (fonte malléable à coeur blanc)

Si dans le cas précédent de la malléabilisation par graphitisation, on procède par un traitement thermique, dans ce cas de malléabilisation par décarburation, on procède par un traitement mixte thermochimique. Il consiste à chauffer la fonte à 960°C, durant (50 à 100) heures dans un milieu oxydant constitué de minerai de fer, de manière à éliminer le carbone de la fonte sous forme de gaz.

L'oxydation du charbone se déroule comme suit :

- L'oxygène ambiant de la caisse réagit avec le carbone de la surface des pièces en donnant les gazs CO et CO_2.
- L'oxyde de carbone réagit avec le minerai de fer en donnant du CO_2.
- Le gaz CO_2formé, agit sur le carbone de la fonte suivant la réaction :

$$C + CO_2 \longrightarrow 2\,CO$$

Ainsi, l'oxydation port sur le carbone de l' austénite de la surface de la pièce et le carbone diffuse du centre vers la périphérie pour remplacer la carbone oxydé, et la cémentite entre en solution. [3]

Chapitre III

TTDF

CH III : transition de la température

III.1. Historique:

La notion de température de transition fragile-ductile a été découverte durant la Seconde Guerre mondiale, à cause de la rupture de barge de débarquement et des liberty ships en Mer du Nord. La méconnaissance de ce phénomène est également une des causes du naufrage du Titanic.

III.2. Introduction

La ductilité d'un matériau dépend de nombreux paramètres, dont notamment la température et la vitesse de déformation.

Concernant la température, de nombreux matériaux cristallins sont fragiles à basse température et deviennent ductiles au-dessus d'une certaine température (mais certains matériaux restent fragiles jusqu'à la fusion, comme le graphite et les céramiques et d'autres restent ductiles à basse température comme les aciers inoxydables austénitiques). Cette température est la température de transition fragile-ductile (en anglais : brittle-to-ductile transition température, BDTT, ou bien ductile-to-brittle transition température, DBTT).

Les métaux sont couramment utilisés par des applications à basse température, la question de leur fragilité est donc fondamentale dans ces conditions. La température extérieure sur Terre peut descendre jusqu'à −90 °C aux pôles et −60 °C dans les zones continentales. Cela concerne les véhicules, les gazoducs et oléoducs, réservoirs et de manière générale toutes les constructions métalliques et machines mécaniques. En mer, la température de l'eau peut descendre en dessous de 0 °C ; par exemple, lors du naufrage du Titanic, la température de l'eau était de −2 °C.

Les machines frigorifiques domestiques (congélateurs) fonctionnent typiquement à −18 °C. Dans le domaine industriel et de la recherche, on cherche parfois à atteindre des températures très basse. L'azote liquide permet de refroidir à −195 °C et l'hélium liquide à −269 °C.

Ce phénomène est utilisé par la police scientifique pour déterminer si une lampe à incandescence était allumée ou éteinte au moment de sa rupture ; typiquement, cela peut permettre de savoir si les phares d'une voiture étaient allumés ou éteints au moment de l'accident.[1]

III.3. Traitement thermique appliqués aux FGS :

III.3.1. Généralité :

Les fontes sont constituées d'une matrice analogue à un acier mais à teneur variable en carbone, dans laquelle se trouvent des particules de graphite de forme sphéroïdale dans le cas des alliages qui nous concernent.

Cette matrice, qui, brute de coulée peut être composée de ferrite et d'une certaine quantité de perlite est modifiable par traitement thermique suivant les mêmes principes qu'un acier : trempe, revenu, recuit, etc. Il convient toutefois de souligner le rôle important joué par le graphite au cours des transformations de la matrice des fontes :

- le graphite est une réserve de carbone qui permet à la matrice de se saturer par dissolution et diffusion en tendant vers l'état d'équilibre prévu par les diagrammes, notamment en phase austénitique au cours d'un maintien au-dessus du point de transformation Ac3,
- par le processus inverse, lorsque la solubilité du carbone décroît, l'austénite rejette cet élément qui tend à précipiter sous forme de graphite (formation d'une coquille sur les sphéroïdes préexistants ou bien parfois formation de nouveaux sphéroïdes) ou d'un autre composé selon le cycle thermique utilisé.[2]

Cela permet de dire que les matrices des fontes se transforment par traitement thermique comme des aciers, mais dont la teneur en carbone varierait en fonction de la température et du temps. Il est ainsi possible d'obtenir, à partir d'un même alliage, une très large gamme de propriétés mécaniques, qui va de la ductilité élevée, propre aux aciers bas carbone jusqu'aux résistances importantes, caractéristiques des aciers à haute teneur en carbone.

Pour définir précisément les traitements thermiques appropriés afin d'obtenir les caractéristiques mécaniques souhaitées, il est important de disposer des diagrammes de transformation de type T.R.C (Transformation en Refroidissement Continu) et T.T.T (Transformation-Température-Temps). Des travaux entrepris par A. Ikhlef et al. ont permis d'établir un certain nombre de diagrammes relatifs à différentes nuances de fontes GS. Les caractéristiques des 3 alliages utilisés sont répertoriées dans le Tableau III-1.[3]

Matériaux	Principaux éléments d'alliages (% poids)				Dureté Hv 30
	C	Si	Cu	Mn	
←Fonte ferritique	3.8	3 – 3.3	/	0.25	160
↑Fonte ferrito-perlitique	3.8	2.3	/	0.25	260
→ Fonte perlitique	3.8	2.6 – 2.7	0.6	0.3	270

Tableau III-1: Caractéristiques des matériaux utilisés.

III.3.1.1. Diagrammes T R C :

La Figure III-1 : présente un diagrammes T.R.C de 2 nuances de fonte G.S. ayant des teneurs en silicium différentes (matériaux ← et ↑).

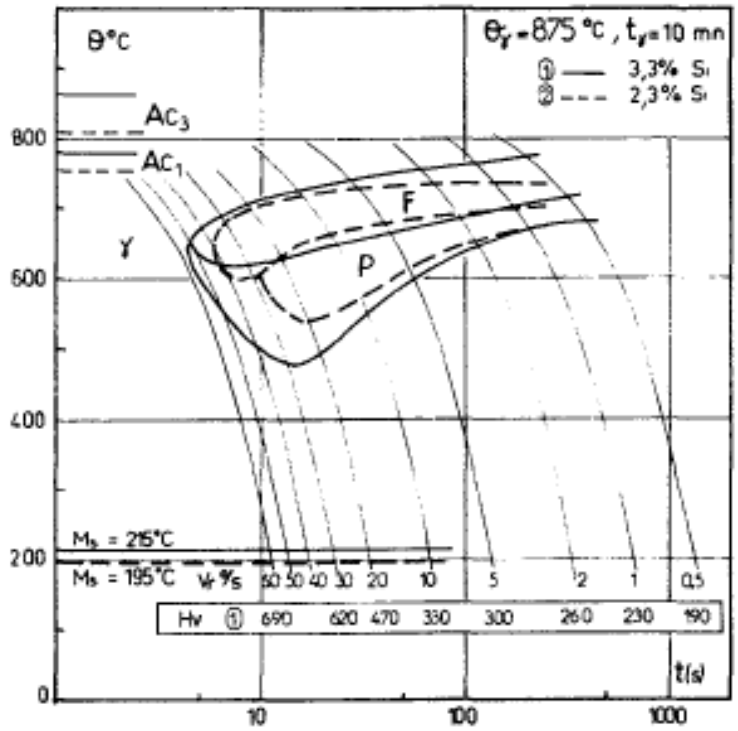


Figure III-1 : Diagramme T.R.C pour les fontes G.S. ← et ↑ avec 3,3 et 2,3 % de Si (refroidissement continu effectué après un traitement d'austénitisation à 875°C durant 10 minutes).

Pour des vitesses de refroidissement Vr inférieures à 50°C/s il y a formation de ferrite (F) puis de perlite (P). La quantité de perlite, pratiquement inexistante aux faibles vitesses (Vr < 100°C/h), s'accroît progressivement lorsque Vr augmente, et ce aux dépens de celle de la ferrite qui se forme alors principalement dans les régions entourant les sphéroïdes de graphite (structure appelée "bull's eyes″ figure III-2). Pour les vitesses de refroidissement très rapide (Vr > 50°C/s) la structure est constituée de martensite. Notons que pour ces alliages, et dans ces conditions de traitement la transformation bainitique n'est pas observée.

La teneur nominale en silicium n'exerce qu'un effet limité, notamment sur la vitesse de trempe : les diagrammes de la figure III-1 : ne révèlent pas de différence significative pour cette variation de la teneur en Si.

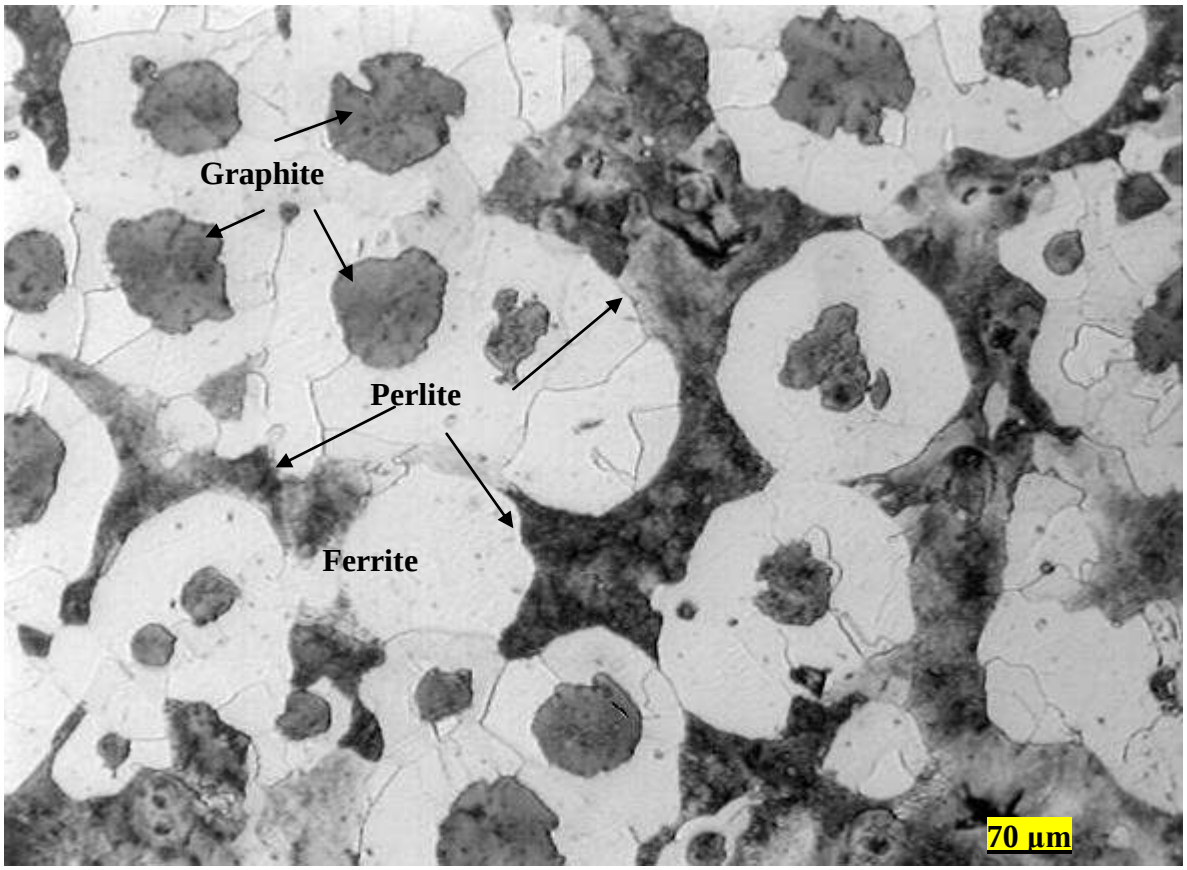


Figure III-2: (a) Fonte GS avec 2,4 % de Si, matrice ferrito-perlitique.

III.3.1.2. Diagrammes T.T.T :

La figure III-3 représente le diagramme T.T.T d'une fonte perlitique (matériaux →) qui indique les transformations microstructurales intervenant lors de traitements isothermes succédant à une trempe depuis 900°C.

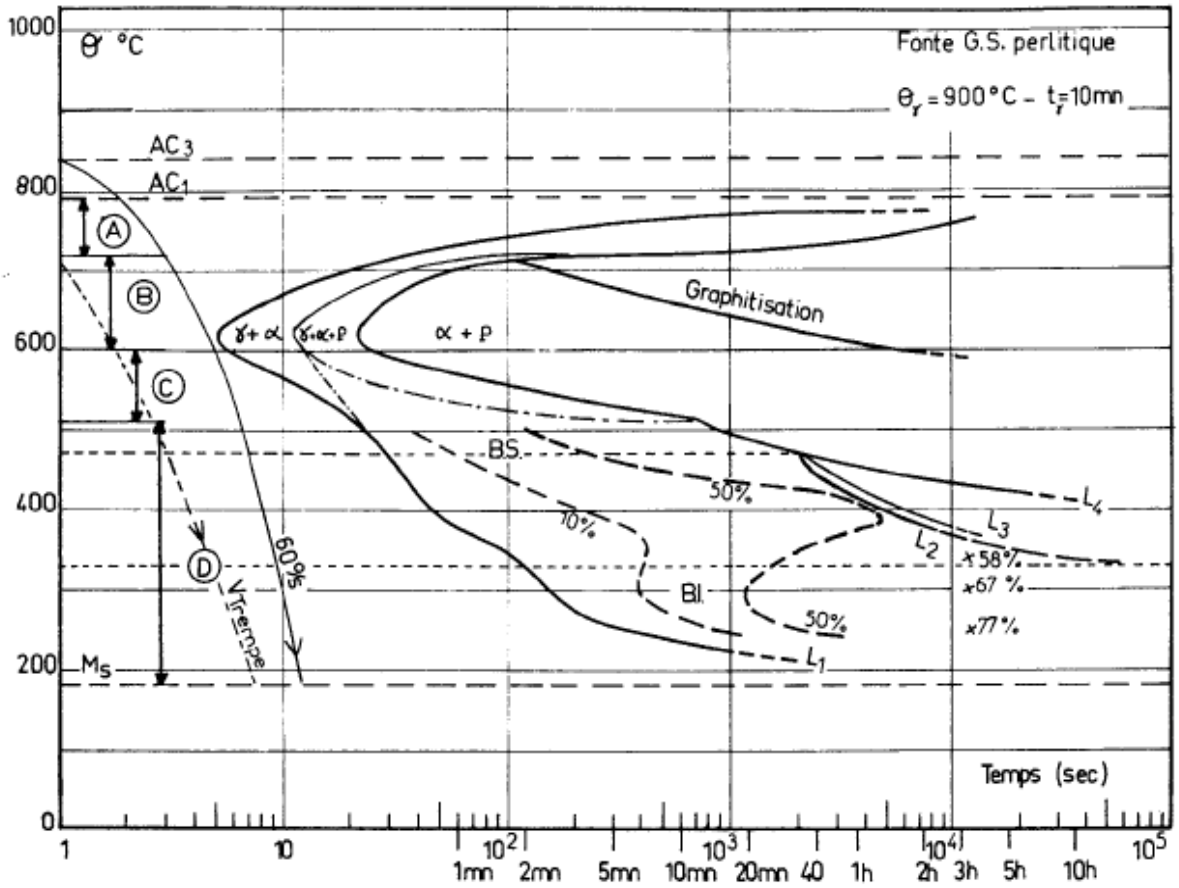


Figure III-3 : Diagramme T.T.T d'une fonte perlitique non alliée (austénitisation à 900°C, 10 minutes).

Ce diagramme T.T.T présente 2 grands domaines de transformation qui se chevauchent aux températures moyennes (600 - 500°C) ; ils se différencient essentiellement par la nature des produits formés et les processus mis en jeu au cours de la transformation isotherme de l'austénite.

Domaine supérieur : 510°C < θiso < Ac_1 ⇒ Transformations ferritique et perlitique :

Dans ce domaine l'austénite évolue, soit uniquement en ferrite équiaxe, soit en ferrite puis en perlite.

- Les plus hautes températures (θ > 710°C) favorisent la diffusion du carbone (provenant de la décomposition de l'austénite) vers les sphéroïdes de graphite. Il se forme, en conséquence, une matrice entièrement ferritique.
- Pour les plus basses températures (600°C < θ < 710°C), la phase mère se transforme successivement en ferrite et en perlite au cours des premiers instants du maintien

isotherme. Lorsque ce maintien est prolongé, la perlite formée est susceptible d'évoluer par graphitisation.

- Pour les températures inférieures à 600°C, le processus de graphitisation n'a plus lieu.

Domaine de la transformation bainitique $M_S < \theta_{iso} < 510°C$:

Une transformation de type bainitique plus ou moins complexe intervient lors de trempe interrompue à des températures comprises entre 510°C et le point M_S (Température de début de transformation martensitique). La microstructure de la bainite va dépendre de la température de maintien. Ainsi il est possible de distinguer deux variantes, la bainite supérieure qui se forme dans une gamme de température comprise entre 470 et 330°C et la bainite inférieure obtenue pour des températures inférieures (entre 330°C et le point M_S).

III.3.2. Traitements thermiques de ferritisation

Il n'est pas évident d'obtenir, brut de coulée, une fonte G S avec une matrice entièrement ferritique. Il est donc nécessaire dans certains cas d'avoir recourt à un traitement thermique supplémentaire, appelé recuit de ferritisation, son but étant d'éliminer la perlite contenue dans la matrice.

III.3.2.1. Description du traitement thermique

Le recuit de ferritisation est un traitement thermique qui comprend un chauffage jusqu'à un palier effectué à une température généralement comprise entre 700 et 900°C. La température et le temps de maintien sont choisis en fonction de la composition, des dimensions et de la proportion de carbures dans la microstructure de la pièce [4].

Recuit à des températures situées entre 820°C et 900°C

Cette gamme de température, située juste au-dessus de l'intervalle de transformation α/γ (la température est ajustée selon la teneur en silicium) est utilisée pour assurer la ferritisation totale de la matrice. Lors du traitement thermique, nous allons passer d'une matrice ferritique pauvre en carbone et contenant de la cémentite et du graphite à une matrice austénitique pouvant accueillir une quantité plus importante de C (de 0,8 à 2,1% selon la température). Lors du maintien à la température d'austénitisation, le système va se mettre en équilibre et l'austénite va s'enrichir en carbone. Ce carbone provient de la décomposition de la cémentite et également d'une remise en solution partielle des sphéroïdes de graphite [5].

Afin d'obtenir une matrice 100% ferritique, il est important de refroidir la pièce lentement autour de Ac_1 (voir diagramme T.R.C, Figure III-1). Cette vitesse de refroidissement est fonction de la microstructure du graphite et de la teneur en Si. Plus le

graphite est grossier et la teneur en Si faible, plus cette vitesse devra être lente. Il faut déssaturer l'austénite γ lentement pour ne pas former de Fe3C. Si l'espace entre les sphéroïdes est important de nouvelles sphères de graphite peuvent nucléer et croître. Toutefois la formation de nouveaux sphéroïdes est rare et le carbone diffuse de nouveau vers les sphéroïdes de graphite ce qui provoque l'incorporation de particules de matrice à leurs circonférences, au niveau des zones de dissolution préférentielle [6].

Recuit à une température comprise entre 730 et 790°C

La transformation de la perlite en ferrite et graphite peut également être provoquée par chauffage des pièces, juste au-dessous de l'intervalle de transformation, suivi d'un refroidissement lent. Au cours de ce traitement, la cémentite de la perlite est décomposée, et la graphitisation s'opère par une diffusion progressive des atomes de carbone vers les sphéroïdes de graphite (voir diagramme T.T.T, Figure I.7). En général, le chauffage est effectué à une température comprise entre 730 et 790°C, avec un temps de maintien prolongé par rapport au traitement à plus haute température, suivi d'un refroidissement à une vitesse de 55°C par heure environ. La vitesse de ferritisation est fonction de la teneur en silicium, de la température de chauffage et de la forme du graphite. Lorsque la température du traitement est abaissée, la vitesse de ferritisation diminue rapidement et, au-dessous de 650°C, elle devient trop lente pour que le traitement puisse être réalisé dans des conditions économiques.[7]

Bien que la ferritisation au-dessous de l'intervalle de transformation puisse être complète, le recuit à température plus élevée, avec un maintien dans le domaine austénitique, est parfois privilégié pour s'assurer de la dissolution de tous les carbures libres qui pourraient se trouver accidentellement présents [8].

III.3.2.2. Influence du recuit de ferritisation sur le comportement mécanique

Les effets d'un traitement thermique de ferritisation vis-à-vis des propriétés mécaniques ont fait l'objet de différentes études. Le Tableau III-2 regroupe les propriétés obtenues à partir d'essais de traction (limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % $\sigma_{0,2}$, contrainte de rupture σ_r et allongement à la rupture A), de ténacité J_{IC} (calculée à partir de l'intégrale J) et de dureté réalisés sur deux nuances de fontes qui diffèrent par leurs teneurs en silicium, à l'état brut de coulée et après recuit de ferritisation. La dissolution de la perlite lors du traitement de ferritisation permet d'améliorer la ductilité et la ténacité, les valeurs de A et J_{IC} étant plus élevées, par rapport à l'état brut de coulée, pour les deux nuances de fonte. La

diminution de la proportion de perlite dans la matrice à tout de même pour conséquence l'abaissement de la résistance en traction ($\sigma_{0,2}$ et σ_r) et de la dureté.

Nuance	**état**	**Matrice**	$\sigma_{0,2}$ **(MPa)**	σ_r **(MPa)**	**A (%)**	**J_{IC} (KJ/m2)**	**Dureté Hv 30 Kg**
Si : 2,6 %	Brut de coulée	50 % perlite 50 % ferrite	327	513	14	28.5	183
	ferritisé à 880°C	2 % perlite 98 % ferrite	277	413	25	61.5	147
Si : 3,2 %	Brut de coulée	5 % perlite 95 % ferrite	350	492	21	44	185
	ferritisé à 880°C	2 % perlite 98 % ferrite	315	463	24	55	161

Tableau III-2: Propriétés mécaniques sous sollicitations monotones, traction et ténacité, de fontes G.S. brutes de coulée et après traitement thermique de ferritisation.

Le recuit de ferritisation utilisé dans le cadre de ces essais comporte un palier dans le domaine austénitique, à 880°C, ce qui provoque l'apparition des particules circonférentielles de ferrite à l'intérieur du graphite mentionnée au III.2.2.1. On leur attribue un effet de fragilisation des sphéroïdes de graphite en traction, la décohésion le long de ce liseré de particules intervenant pour des contraintes appliquées plus faibles que dans le cas des fontes brutes de coulée [9].

III.4. La cryogénie

III.4.1. Introduction

La cryogénie, science et technologie des températures inférieures à 120 K, a entamé son deuxième siècle d'existence. Elle est le résultat d'une conjonction historique du progrès scientifique (déplacement progressif de la thermodynamique au cours du XIXe siècle, de la théorie macroscopique de l'énergie de J Joule et S Carnot , à la mécanique statistique des particules microscopique de L Boltzmann et J W Gibbs) et du progrès technologique (poursuite de la liquéfaction des gaz atmosphériques jusque-là considérés comme « non condensables » , faisant appel aux études des propriétés des substances chimiques pures et de leurs mélanges ,les appareils de compression , l'écoulement et les transferts de chaleur des fluides et les techniques d'isolation thermique).

Les développements simultanés de la technologie et de la physique aux basses températures sont intimement liés à la « course » à la liquéfaction des gaz appelés «permanents» ; hydrogène, azote, oxygène...[10]

L'hydrogène , malgré sa faible masse moléculaire, devenait un vecteur énergétique courant « l'économie de l'hydrogène » est souvent citée comme solution à l'augmentation de la consommation d'énergie et à la protection de l'environnement dans les pays industrialisés l'hydrogène sous forme de liquide cryogénique aurait très certainement un rôle important à jouer comme aujourd'hui dans les réservoirs des prototypes de voitures et de véhicules commerciaux équipés de moteurs à combustion interne ou de piles à combustible.[11]

Parmi les secteurs qui passionnent le public, la conquête de l'espace représente une des grandes réalisations de ce siècle, ces développements ont été rendus possibles pour l'utilisation de l'oxygène et de l'hydrogène stockés sous forme liquide, pour alimenter les moteurs fusés Grâce à la cryogénie, on peut produire à grande échelle de l'oxygène et de l'azote à partir de l'air. On peut utiliser l'oxygène de différentes façons, entre autres dans les moteurs de fusées, dans les chalumeaux pour couper et souder pour permettre la vie dans les vaisseaux spatiaux et la plongée sous- marine. L'azote est utilisé dans la fabrication de l'ammoniac contenu dans les engrais et dans le conditionnement des aliments congelés en les refroidissant rapidement afin d'éviter la destruction des tissus cellulaires [12].

La cryogénie a aussi rendu possible le transport commercial des gaz naturels Liquéfiés, sans la cryogénie la recherche nucléaire manquerait d'hydrogène Et d'héliums liquides utilisés dans les détecteurs de particules, Les appareils à infrarouge, les masers et les la surs peuvent également utiliser les températures cryogéniques.[13]

Vu la diversité de domaines d'application des liquides cryogéniques, on doit donc être soucieux pour avoir une grande quantité des gaz liquéfiés consommant le minimum d'énergie.

III.4.2. Historique et domaine d'utilisation de la cryogénie

Avoir de très basses températures, c'était l'objectif de grands nombres de chercheurs scientifiques et des physiciens. Commençant par la première liquéfaction de l'air (L.Cailletet et R.Picret 1877) [14],[15] et la première séparation de l'oxygène et de l'azote (K.Olszewski et S.Wroblewsks 1883)[16] furent rapidement suivies par la liquéfaction de l'hydrogène , rendu possible par l'invention d'un réservoir isolé sous vide avec écran de rayonnement (J.Dewar ,1898)[17],[18].

Cependant , ce fut la première liquéfaction de l'hélium (H.Kamerlingh onnes ,1908) qui ouvrit la voie de la recherche sur la matière condensée aux basses températures, un

domaine qui est aujourd'hui encore un aspect majeur de la recherche et qui engendra la découverte de nouveaux phénomènes tels que la supraconductivité (H.Kamerlihgh Onnes ,1911) et la superfluidité (W.Hkeesom,1928) qui ne furent expliques qu'au cours de la deuxième moitie du xxe siècle, avec l'émergence de la mécanique quantique .il est intéressant de rappeler qu'a l'époque où la plupart des expériences en physique étaient menées par des chercheurs indépendants travaillant avec de petits appareils , le laboratoire de H.Kamerlingh onnes à Leyde fut le premier exemple de recherche scientifique à « grande échelle » depuis, la cryogénie n'a cessé de progresser vers des températures de plus en plus basses (figures 2 .1et 2.2) atteignant aujourd'hui des valeurs d'environ 0.1 *nK* dans les laboratoires spécialisés grâce à l'association de techniques de dilution de l'hélium et de désaimantation adiabatique.[19],[20]

De très nombreuses branches d'activité scientifiques et techniques utilisent actuellement la cryogénie [21] :

- les sciences physiques étudient des phénomènes spécifiques des basses températures ou qui exigent d'y travailler : supraconductivité, physique nucléaire, magnétisme, technique des gyroscopes de haute précision, électronique appliquée, etc.
- l'industrie chimique fait un usage croissant de l'oxygène pour les réactions et surtout de l'azote pour l'inertage des atmosphères. La production en quantité massive de l'éthylène ne peut se faire qu'à l'aide des basses températures pour sa séparation et sa purification finale.
- La biologie utilise le froid pour conserver divers produits (par Iyophilisation), pour la préparation de produits pharmaceutiques et pour de nombreuses autres opérations.
- La médecine et la chirurgie emploient depuis longtemps des produits de base préparés grâce à la cryogénie : oxygène, protoxyde d'azote, plasma sanguin, etc.
- Les liquides cryogéniques usuels tels que l'oxygène et l'azote et les gaz rares de l'air sont employés en quantités massives dans la sidérurgie et la métallurgie (notamment argon/hélium pour la soudure)
- Quant aux industries spatiales, on sait que l'oxygène, l'hydrogène, l'azote et l'hélium liquide sont à la base même de leur existence. l'oxygène et l'hydrogène liquides assurent la propulsion des fusées, l'azote et l'hélium sont indispensables pour assurer l'inertage et le bon fonctionnement notamment des pompes d'alimentation à grand débit des moteurs de fusées.

L'utilisation du froid pour le traitement, la production ou la transformation des gaz constitue donc actuellement un des fondements essentiels de l'industrie moderne.

III.4.3. Propriétés physiques aux basses températures

III.4.3.1. Propriétés des matériaux

Les techniques de réalisation des matériaux cryogéniques et la préparation d'ensembles expérimentaux aux basses températures mettent en oeuvre des matériaux très variés : Matériaux isolants, conducteurs, voire surproducteurs électriques, Matériaux de structure.

III.4.3.1.1. Propriétés thermiques

Les Propriétés thermiques sont associés aux vibrations des atomes autour de leur position d'équilibre, aux mouvements des électrons, etc. L'amplitude des vibrations diminue avec la température. D'autres effets peuvent aussi contribuer aux propriétés thermiques (caractéristiques magnétiques, état supraconducteur, etc.)

a) **Capacité thermique massique :** la Capacité thermique massique d'un matériaux peut être considérée comme la somme de plusieurs contributions (contribution associée au réseau cristallin, cristaux isolants, contribution associée aux électrons libres c'est le cas des métaux conducteurs), telle que

$C = \sum i\ Ci\ (T) = CPh + Ce$

Cph : la capacité thermique massique associée au réseau cristallin en fonction de la température de DEBYE. A basse température, elle varie comme le cube de la température [22],[25]

$$C_{ph} = \beta . T^3 \quad \text{.....Eqt III-1}$$

Avec T : température absolue $\beta = \frac{12\pi^4 . R}{5.\theta_D^3}$ .....Eqt III-2

Où R : Constante universelle des gaz parfaits.

θ_D : Température de Debye qui est une caractéristique du matériaux et qui est obtenue généralement par voie expérimentale, son expression théorique est donnée par :

$$\theta_D = \frac{hv}{\sigma}\left(\frac{3.N}{3\pi.V}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{.....Eqt III-3}$$

Où h : Constante de PLANCK,

s : Constante de STEFAN – BOLTZMANN.

v : Vitesse du son dans le solide.

N/V : nombre d'atomes par unité de volume du solide.

Ce : Capacité thermique massique des électrons. La capacité thermique massique des électrons peut s'écrire [21] :

$$C_e = \gamma . T \quad \text{.....Eqt III-4}$$

Où γ: coefficient du terme électronique.

Ainsi, à basse température $\left(T > \frac{\Theta_D}{10}\right)$, la capacité thermique massique d'un métal conducteur peut se mettre sous la forme :

$$c = \beta . T^3 + \gamma . T \quad \text{.....Eqt III-5}$$

b) Conductivité thermique :

On définit deux conductivités thermiques :

K_{ph} : la Conductivité thermique du réseau.

K_e : la Conductivité électronique.

Et la Conductivité thermique peut être représentée par la somme des deux contributions [21] :

$K = K_{ph} + K_e$

Avec

$K_{ph} = 1/3 . C_{ph}.V.L_{ph}. \rho$

V : vitesse du son dans le solide.

ρ : Masse volumique

L_{ph} : libre parcours moyen des phonons

A basse température ($T << \theta_D$), V, ρ et Lph peuvent être considérés comme constants et $K_{ph} / T^3 = cte$

Et

$K_e = 1/3\ C_e\ V_F\ L_e\ \rho = \pi^2\ n\ K_B^2 T\tau / 3me$

me. : Masse de l'électron.

n : nombre d'électrons libre par unité de volume.

V_F : la vitesse de fermi.

L_e : le parcours moyen des éléctons.

τ : Temps moyen de diffusion ($\tau = L_A / V_F$)

A basse température τ = cte, donc $K_e \alpha T$

c) Dilatation thermique :

A basse température, l'existence de contraintes thermiques différentielles peut être la source d'efforts mécaniques pouvant entraîner des ruptures d'assemblage.

Le coefficient de dilatation linéaire α est défini par :

$$\alpha = \frac{1}{L}\left(\frac{dL}{dT}\right) \quad \text{.....Eqt III-6}$$

D'après la définition de a , on peut en déduire la variation de longueur relative $\Delta L / L$:

$$\Delta L/L = \int_{T_i}^{T_f} \alpha(T)dT \quad \text{.....Eqt III-7}$$

A haute température, cette variation est proportionnelle à T, par contre à basse température, elle est proportionnelle à T4.

III.4.3.1.2. Propriétés mécaniques

Lorsqu'on construit une « structure » cryogénique, il est essentiel de prendre en compte les propriétés mécaniques des matériaux utilisés à la température de fonctionnement. [21]

La plupart des matériaux ductiles à température ordinaire deviennent fragiles à basse température.

Le comportement aux basses températures des différents métaux et alliages dépend de leur structure cristalline. Parmi les systèmes cubiques à face centrées (C.F.C) on peut citer le cuivre, nickel et ses alliages, l'aluminium et ses alliages, les aciers inoxydables (série 300), l'argent, le plomb, le laiton, L'or, le platine, en général ils restent ductiles jusqu'aux très basses températures.

Les systèmes cubiques centrées (C. C) tels que le fer a , les aciers ferritiques ; les aciers au carbone, Les aciers au nickel (< 10 %) , le molybdène , le niobium , le chrome , le tungstène deviennent souvent Fragiles aux basses températures.

Dans les structures hexagonales compactes , on peut citer le zinc , le béryllium , le titane, le cobalt , le magnésium sont parfois fragiles , (zinc) , parfois ductiles (titane) , leur ductilité étant toutefois diminuée par la présence d'impuretés et principalement par l' O2, N2, H2 ,…

III.4.4. Transferts thermiques

L'enthalpie de formation des fluides cryogéniques est faible, la capacité thermique massique des matériaux tend vers zéro, la conséquence immédiate est que toute entrée de

chaleur va entraîner une évaporation notable des fluides cryogéniques et/ ou des échauffements importants

La connaissance des caractéristiques à basse température des processus de Transfert thermique nécessite donc une approche particulière. [21], [22]

III.4.4.1. Conduction

C'est le procède de transfert de chaleur à l'intérieur de la matière sans transfert de masse. Il est décrit par la loi de FOURIER

$$\varphi' = -KS\frac{dt}{dx} \quad \text{.....Eqt III-8}$$

Avec φ': flux de chaleur en W passant à travers la section S en m2 au gradient de température dt /dx.

La conductivité thermique K en W/m.K est une propriété extrêmement importante en cryogénie : dans certains cas, il faut qu'elle soit très bonne (contact thermique) et, dans d'autres il faut qu'elle soit particulièrement faible pour éviter les transferts de chaleur parasites (isolement des cryostats).

III.4.4.2. Convection

C'est le transfert d'énergie thermique par déplacement macroscopique de matière. On peut écrire. $$\varphi' = h_c.S(T_p - T_f) \text{.....Eqt III-9}$$

Avec: h_c *:* coefficient de convection en W/m2.K

S : surface d'échange en m2

T_p *:* température de la paroi en K

T_f :température du fluide loin de la paroi en K

Chapitre IV

simulation et conception

IV. ANSYS :

IV.1. Définition :

Est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. L'entreprise a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie aux États-Unis. ANSYS développe, promeut et assure le support de ses logiciels de simulation servant à prédire le comportement d'un produit dans son environnement. Ses produits majeurs sont des logiciels qui mettent en œuvre la méthode des éléments finis, afin de résoudre des modèles préalablement discrétisés. La société possède de nombreuses filiales à travers le monde, notamment en Europe et en Asie.

Fiche technique :

Création : 1970 à Canonsburg

Dates clés 1970 : Création de Swanson Analysis Systems

2000 : acquisition de ICEM CFD Engineering

2001 : acquisition de CADOE S.A

2003 : acquisition de CFX

2005 : acquisition de Century Dynamics

2006 : acquisition de Fluent Inc.

2008 : Acquisition de Ansoft Corporation



Personnages clés : John A. Swanson, fondateur

Forme juridique : Société de capitaux

Action : NASDAQ : ANSS (http://finance.google.com/finance?q=ANSS)

Slogan : Incredible things happen when creativity and technology converge

Siège social : Canonsburg, Pennsylvanie États-Unis

Direction : Ajei S. Gopal

Activité : éditeur de logiciels

Produits : ANSYS Multiphysics

ANSYS CFX

ANSYS Fluent

ANSYS Workbench

HFSS

Gambit

Ansoft

Filiales : Ansys (United Kingdom) (**d**), Ansys (Canada) (**d**) et ANSYS Software Pvt. Ltd. (**d**)

Effectif : 3 400 environ (2018)

TVA européenne : DE131171831 (Https://tools.wmflabs.org/wikidata-externalid-url/?p=3608&url_prefix=http://ec.europa.eu/taxation_customs/vies/vatResponse.html?memberStateCode=&id=DE13171831)

Site web : www.ansys.com. (http://www.ansys.com)

Capitalisation : USD 19 598 millions (2019)

Chiffred'affaires : USD 1 303 millions (2018)

Résultat net : USD 419 millions (2018)

IV.2. Principaux produits :

IV.2.1.ANSYS Structural : ce produit permet d'effectuer des simulations mécaniques en calcul de structures. Ses principales capacités sont :

- l'analyse statique ;
- l'analyse modale ;
- l'analyse harmonique (réponse forcée) ;
- l'analyse temporelle ;
- la gestion de différentes situations non-linéaires (contacts, plasticité matériaux, grands déplacements ou grandes déformations).

IV.2.2.ANSYS Mechanical : ce produit dispose des mêmes capacités qu'ANSYS structural, en y ajoutant notamment un solveur thermique, avec modélisation du rayonnement.

IV.2.3.ANSYS CFX et Fluent : ces deux logiciels permettent d'effectuer des simulations en matière de mécanique des fluides. Ils portent le nom des compagnies qui les ont développés, rachetées par ANSYS.Inc respectivement en février 2003 et en février 2006 . *Fluent* est un solveur : il ne comporte pas de mailleur (le maillage doit être réalisé avec un logiciel de maillage, Gambit par exemple, qui est également édité par ANSYS). Fluent est un solveur très utilisé dans l'industrie et la R&D à travers le monde.

Il est souvent considéré comme une référence dans le domaine de la modélisation fluide. Le paramétrage du modèle se fait par une interface graphique. Il dispose d'une interface de scripts pour automatiser les processus de calcul. L'un des intérêts de ce logiciel de

simulation généraliste, est qu'il dispose d'un nombre relativement important de modèles, pouvant faire face à divers aspects de la mécanique des fluides : écoulements diphasiques (miscible, non miscible, cavitation, solidification), turbulence (LES, KE, Kw, SA, Reynolds stress…), combustion (pré-mélangé et non pré-mélangé), transport de particules, écoulements en milieux poreux, maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage, entre autres.

Les schémas numériques temporels et spatiaux peuvent être modifiés pour améliorer la convergence. Fluent est parallélisé et permet de tirer parti de systèmes multiprocesseurs aussi bien au sein d'une seule machine qu'en réseau (cluster, dualcore, plateforme multi-CPU).

- **Gambit :** Un logiciel de maillage édité par la société ANSYS depuis 2006 (l'éditeur historique du logiciel était la société *Fluent*). Ce mailleur permet de créer géométries et maillages avec un grand degré de liberté et une grande précision. Le domaine géométrique peut aussi être importé depuis un fichier CAO. Il assure également le maillage automatique de surfaces et de volumes en parallèle de l'introduction de conditions aux limites. Gambit est souvent considéré comme un mailleur de référence par les modélisateurs utilisant Fluent.
- **ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA:** ces logiciels possèdent des solveurs utilisant les formulations explicites des équations à résoudre, contrairement aux produits précédemment cités. Leur domaine d'application est réservé aux modélisations mettant en jeu des situations mécaniques aux très larges déformations.
- **ANSYS Electromagnetics et Ansoft :** ce produit permet de résoudre des modélisations mettant en jeu des phénomènes électromagnétiques.
- **ANSYS Multiphysics :** ce produit rassemble l'ensemble des capacités d'ANSYS en matière de simulation numérique implicite.

IV.3. Environnements logiciels :

Deux environnements logiciels permettent de mettre en oeuvre le code ANSYS :

IV.3.1.ANSYS classic : première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en utilisant le langage de script APDL (ANSYS Parametric Design Language).

ANSYS classic est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.

IV.3.2.ANSYS Workbench : cette plate-forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en ré-utilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. La plateforme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution. Le modèle éléments finis généré reste.

IV.4. Partie simulation :

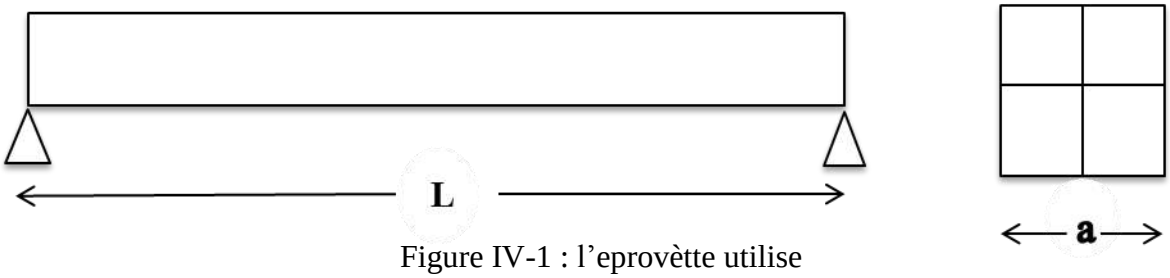


Figure IV-1 : l'eprovètte utilise

	valeur	unité
Long L	55	mm
Force	118 – 119 – 126 - 135	N
Module de Young E	Fonte grise : 1,10E+11 FGS : 1.68E+11	Pa
Distance des fibres extrême de l'axe neutre C	5	mm
Moment d'inertie I	833,33	mm4
Module de section Z	166,67	mm3
Température utilisé	40 – 30 -20 – 10 – 0/ -10/ -20/ -30/ -40	°C
a	10	mm

Tableau IV-1 : caractéristique de de matériaux et l'éprouvette utilisé

$$Z = \frac{a^3}{6} \quad \text{……..Eqt IV-1}$$

$$I = \frac{1}{12} a^4$$ ……..Eqt IV-1

$$C = \frac{a}{2}$$ ……..…..Eqt IV-1

IV.4.1.Les déplacements et contraintes de fonte grise et FGS :

IV.4.1.1. Fonte grise :

- La force : f= 135 N, la T°= [40 ; -40] °C

Dans ce cas, nous fixons la force et modifions la température. Les résultats sont les suivants:

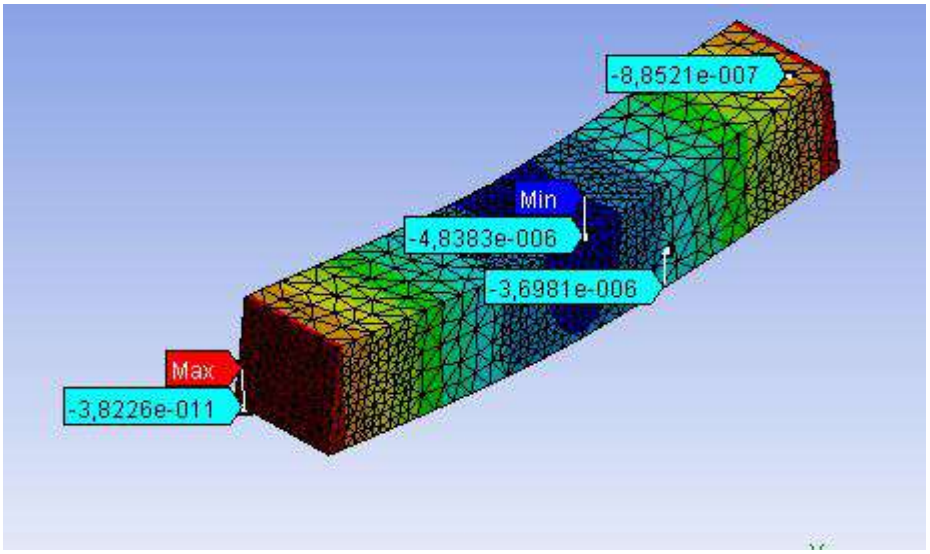


Figure IV -2: Le déplacement à f= 135 N et T°= 20°C

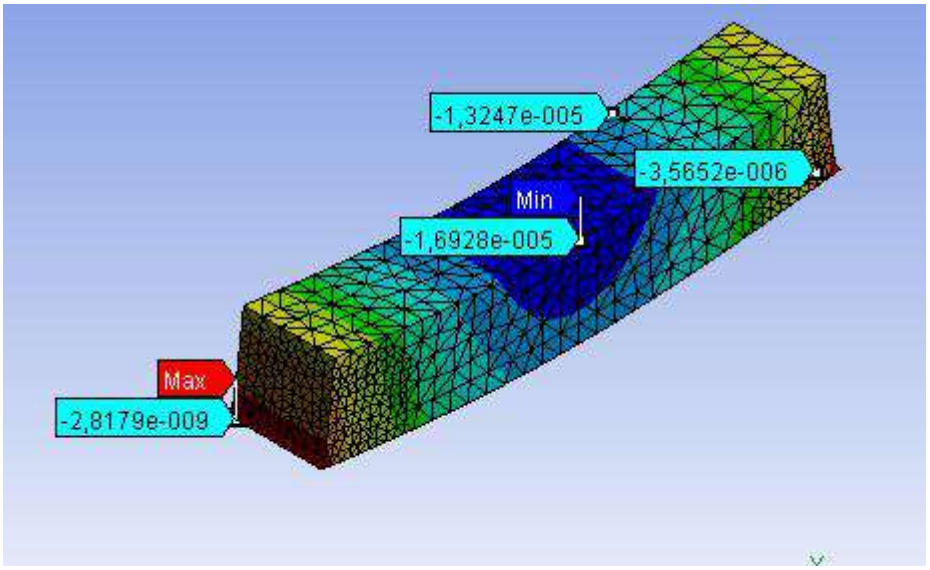


Figure IV -3 : Le déplacement à f= 135 N et T°= 0°C

Les figures IV-1, IV-2 et IV-5 représentes les déplacements directionnel dans l'axe Y. Nous pouvons voir que nous avons un déplacement directionnel en Y de $-2.90.10^{-5}$ mm qui est le maximum à la f= 135 N et T= -20°C (figures IV -5), et aussi les bords sont nuls.

Ainsi, on peut dire qu'il existe une relation inverse entre le déplacement directionnel et la température, car plus la température est basse plus le déplacement augmente dans le sens négatif.

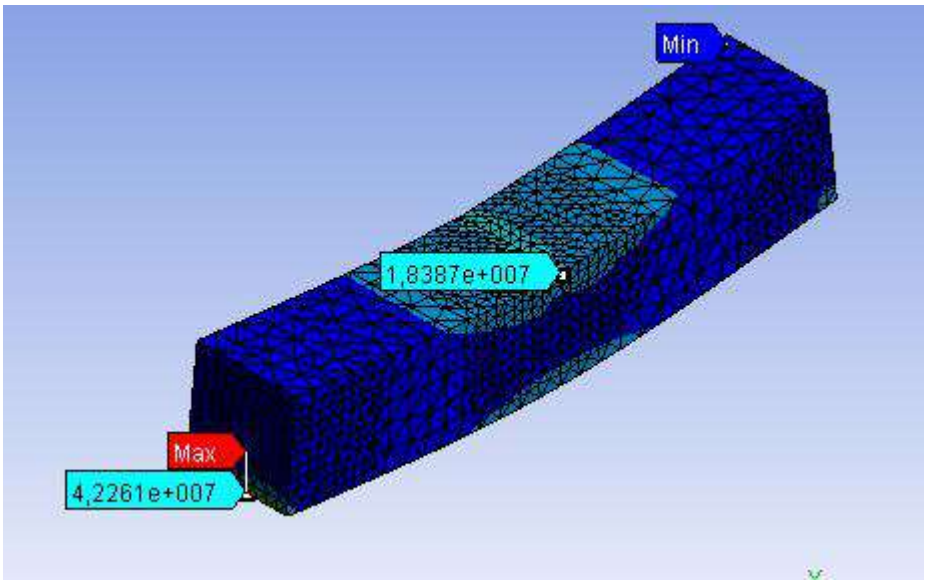


Figure IV -4 : La contrainte à f= 135 N et T°= 20°C

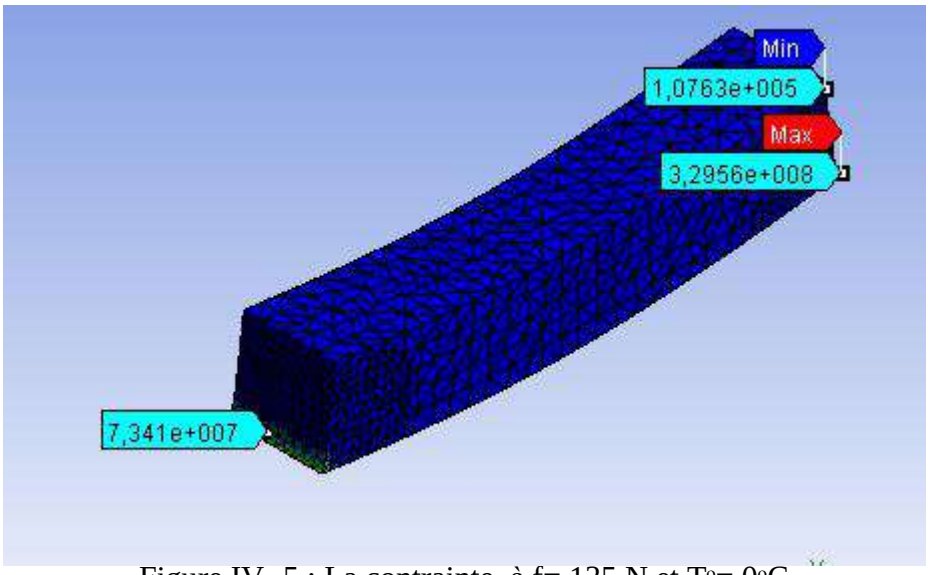


Figure IV -5 : La contrainte à f= 135 N et T°= 0°C

Les figures IV-3, IV-4 et IV-8 représentes les contraintes dans l'axe Y, Nous pouvons voir que nous avons la contrainte en Y de 669 MPa qui est le maximum à la f= 135 N et T= -20°C (figures IV-8). elle doit être au niveau des bords de la pièce fixe. Et chaque fois que la température est élevée, cela a un effet sur le milieu de la pièce où nous avons appliqué la force (Figure IV -3).

Ainsi, on peut dire qu'il existe une relation inverse entre la contrainte et la température, car plus la température est basse plus la contrainte augmente,

- La T°= -20 , la force : f= [118 ; 135] N

Dans ce cas, nous fixons la température et modifions la force appliquée. Les résultats sont les suivants:

Le déplacement directionnel :

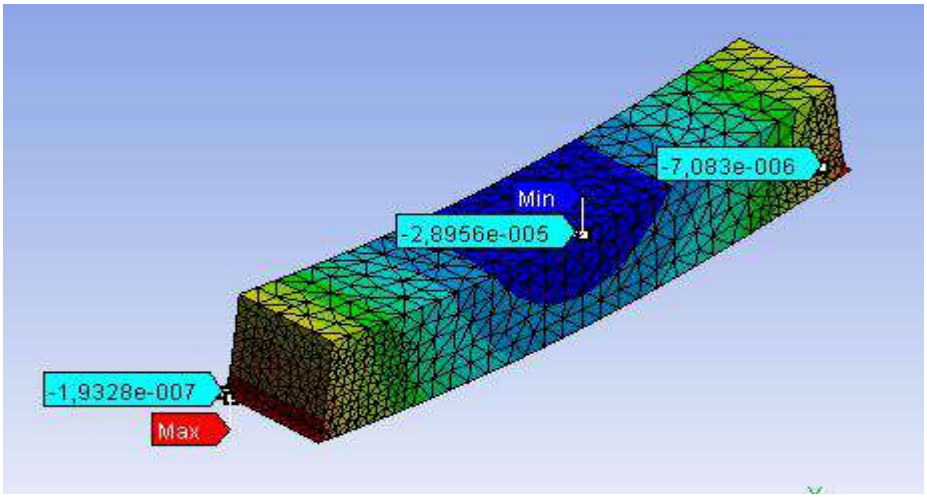


Figure IV -6 : Le déplacement à T°= -20°C et f= 135 N

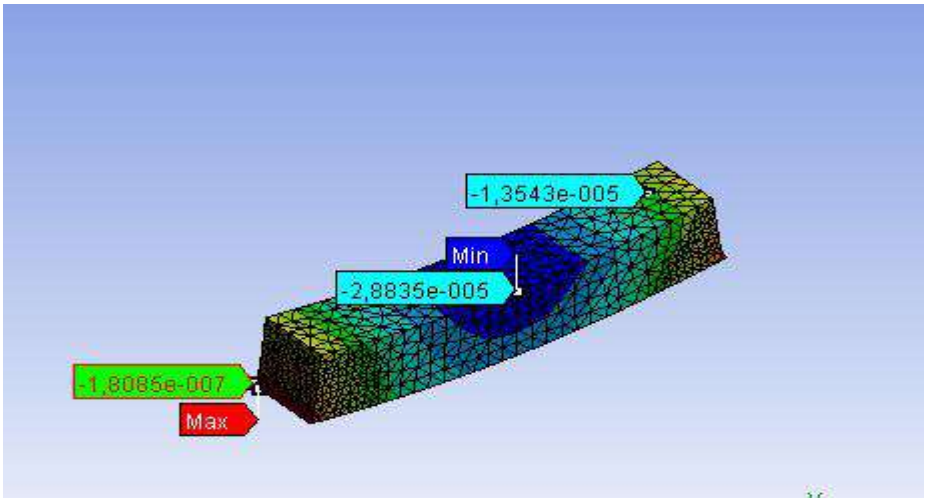


Figure IV -7 : Le déplacement à T°= -20°C et f= 126 N

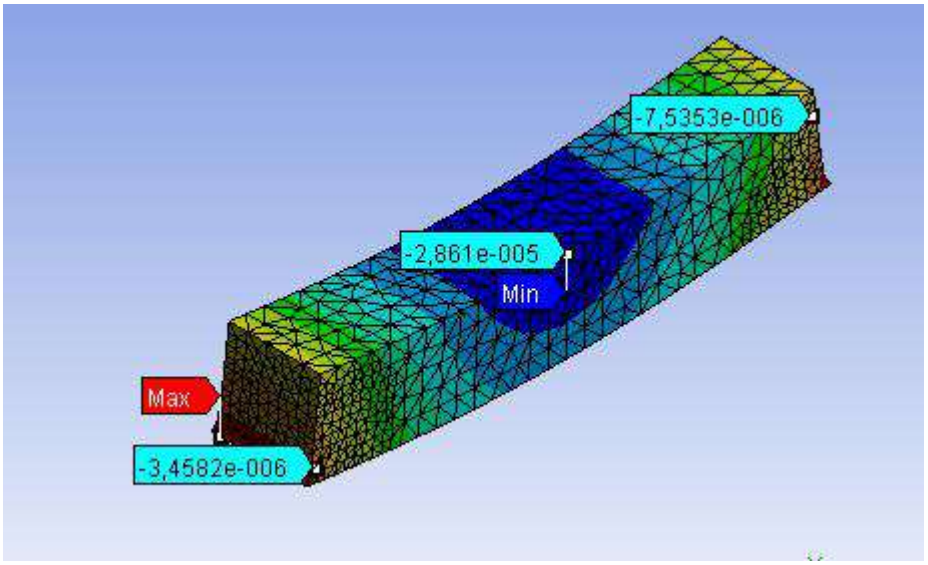


Figure IV -8 : Le déplacement à T°= -20°C et f= 118 N

Les figures IV-5, IV-6 et IV-7 représentes les déplacements directionnel dans l'axe Y. Nous pouvons voir que nous avons un déplacement directionnel en Y de $-2.90.10^{-5}$ mm qui est le maximum à la f= 135 N et T= -20°C (figures IV -5), et aussi les bords sont nuls.

Ainsi, on peut dire qu'il existe une relation directe entre le déplacement directionnel et la force, parce que plus la force appliquée à une pièce est grande, plus le déplacement dans le sens négatif est important.

La contrainte :

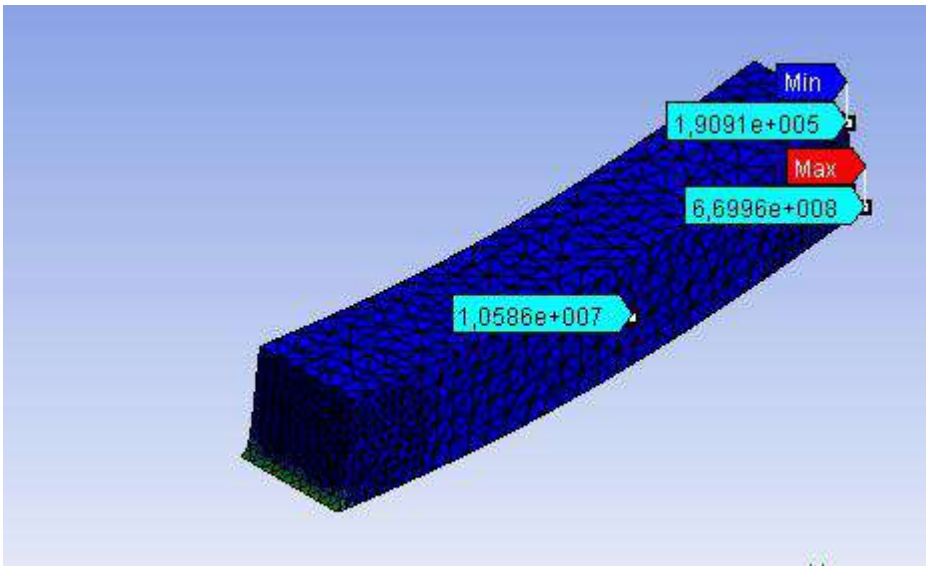


Figure IV -9 : La contrainte à T°= -20°C et f= 135 N

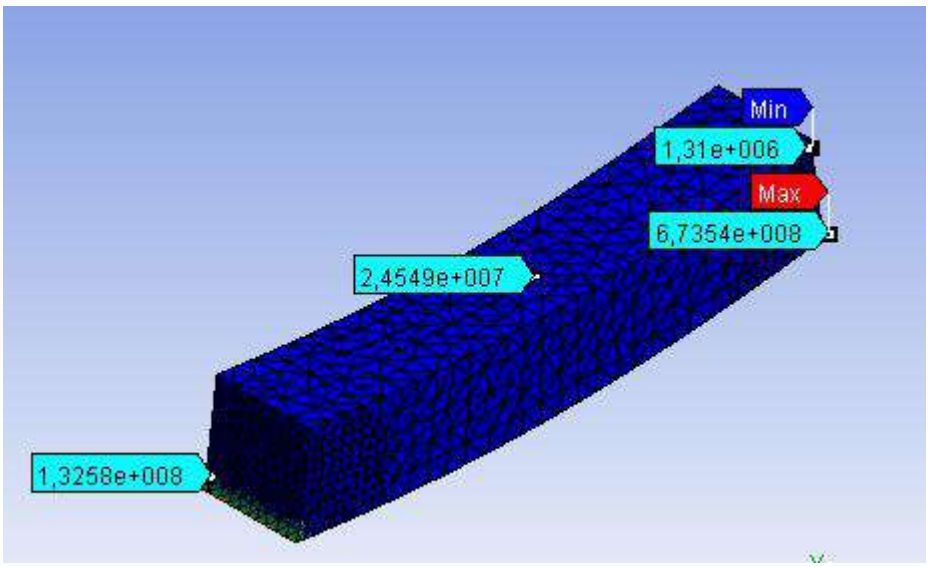


Figure IV -10 : La contrainte à T°= -20°C et f= 126 N

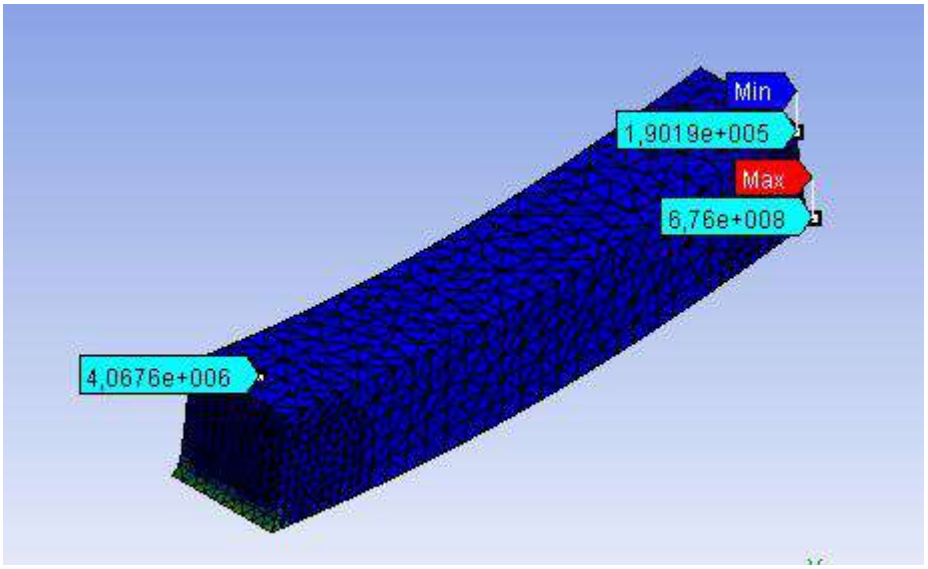


Figure IV -11 : La contrainte à T°= -20°C et f= 118 N

Les figures IV-8, IV-9 et IV-10 représentes les contraintes dans l'axe Y, Nous pouvons voir que nous avons la contrainte en Y de 676 MPa qui est le maximum à la f= 118 N et T= -20°C (figures IV-10). elle doit être au niveau des bords de la pièce fixe.

Ainsi, on peut dire qu'il existe une relation inverse entre la contrainte et la force, Parce que plus la force appliquée à la pièce est grande, plus la restriction est faible.

IV.4.1.2. FGS :

- La force : f= 135 N, la T°= [20 ; -20] °C

Déplacement :

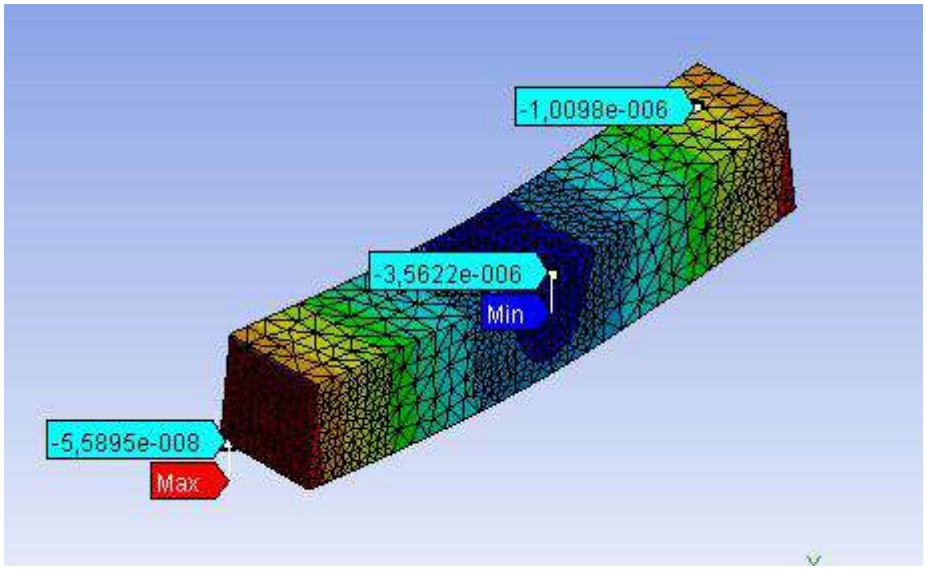


Figure IV -12: Le déplacement à f= 135 N et T°= 20°C

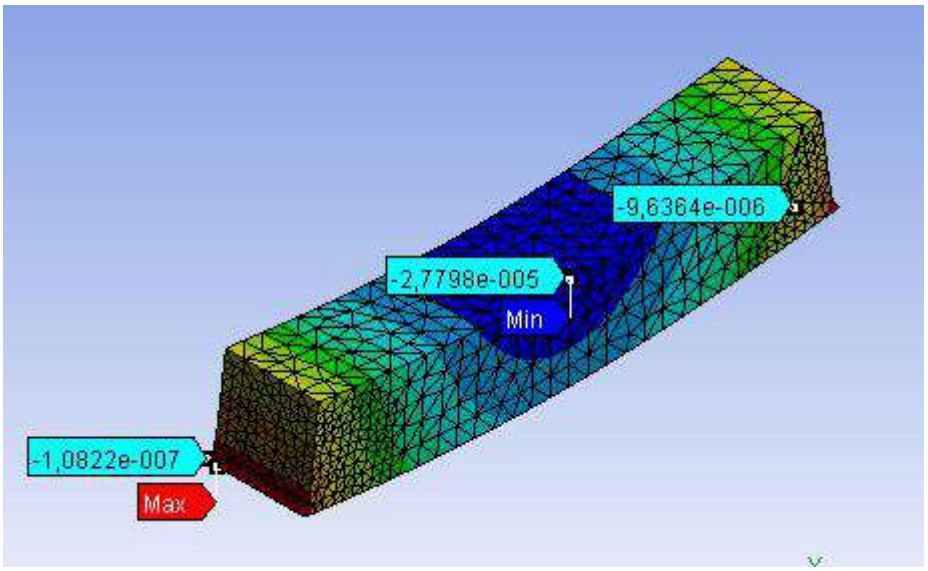


Figure IV -13: Le déplacement à f= 135 N et T°= -20°C

Les figures IV-11 et IV-12 représentes les déplacements directionnel dans l'axe Y. Nous pouvons voir que nous avons un déplacement directionnel en Y de $-2.7.10^{-5}$ mm qui est le maximum à la f= 135 N et T= -20°C (figures IV -12), et aussi les bords sont nuls (0 mm).

Ainsi, on peut dire qu'il existe une relation inverse entre le déplacement directionnel et la température, car plus la température est basse plus le déplacement augmente dans le sens négatif.

Contrainte :

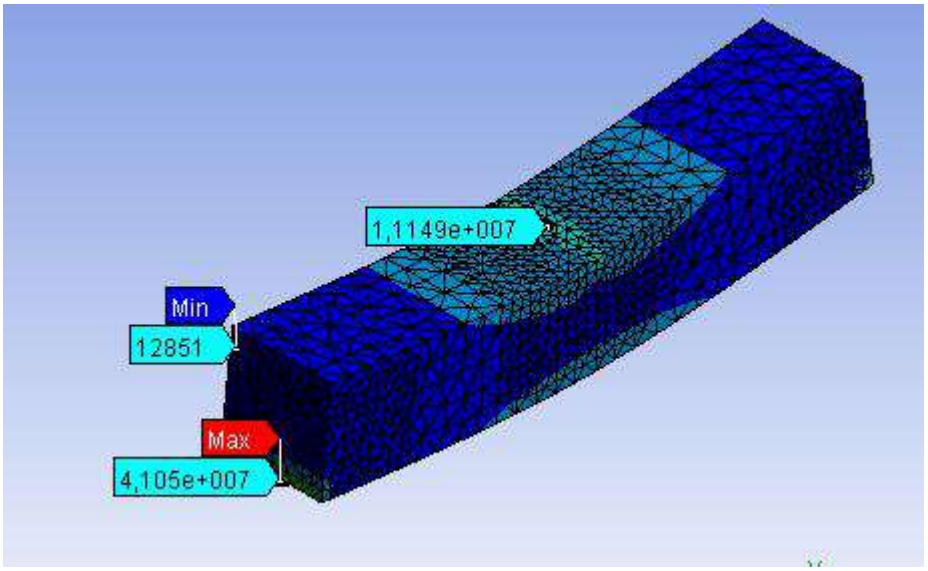


Figure IV -14 : La contrainte à f= 135 N et T°= 20°C

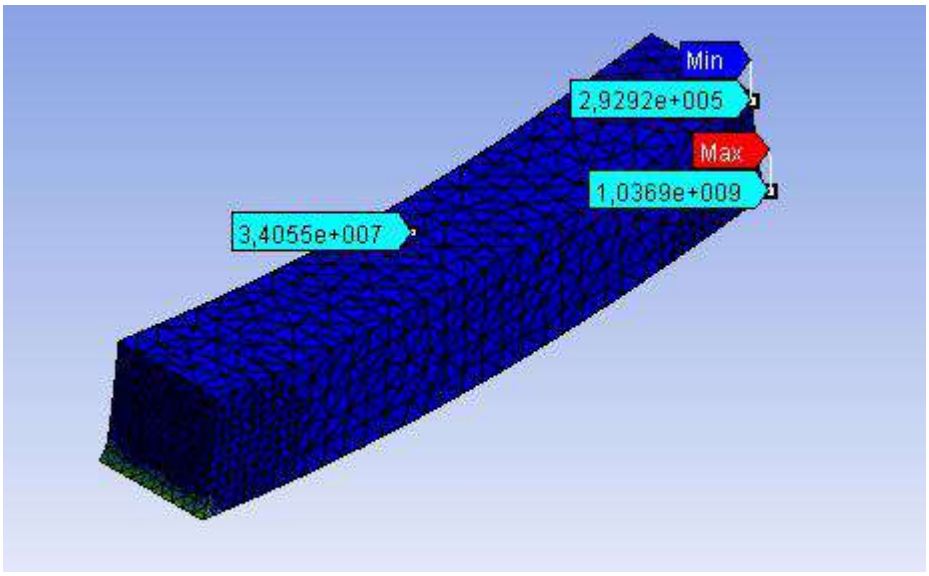


Figure IV -15 : La contrainte à f= 135 N et T°= -20°C

Dans les figures des contraintes IV-13, IV-14 dans l'axe Y, Nous pouvons voir que nous avons la contrainte en Y de 1 GPa qui est le maximum à la f= 135 N et T= -20°C (figures IV-14). elle doit être au niveau des bords de la pièce fixe. Et chaque fois que la température est élevée, cela a un effet sur le milieu de la pièce où nous avons appliqué la force

(Figure IV -13). Ainsi, on peut dire qu'il existe une relation inverse entre la contrainte et la température, car plus la température est basse plus la contrainte augmente,

Et quand on fait une comparaison entre fonte grise et FGS à la même température et force, on note que la contrainte maximale pour le FGS beaucoup plus gros que la fonte grise.

IV.4.2. Effets de la température et de la force sur les déplacement et les contraintes :

déplacement: T= -20°C / f= [118 ; 135] N

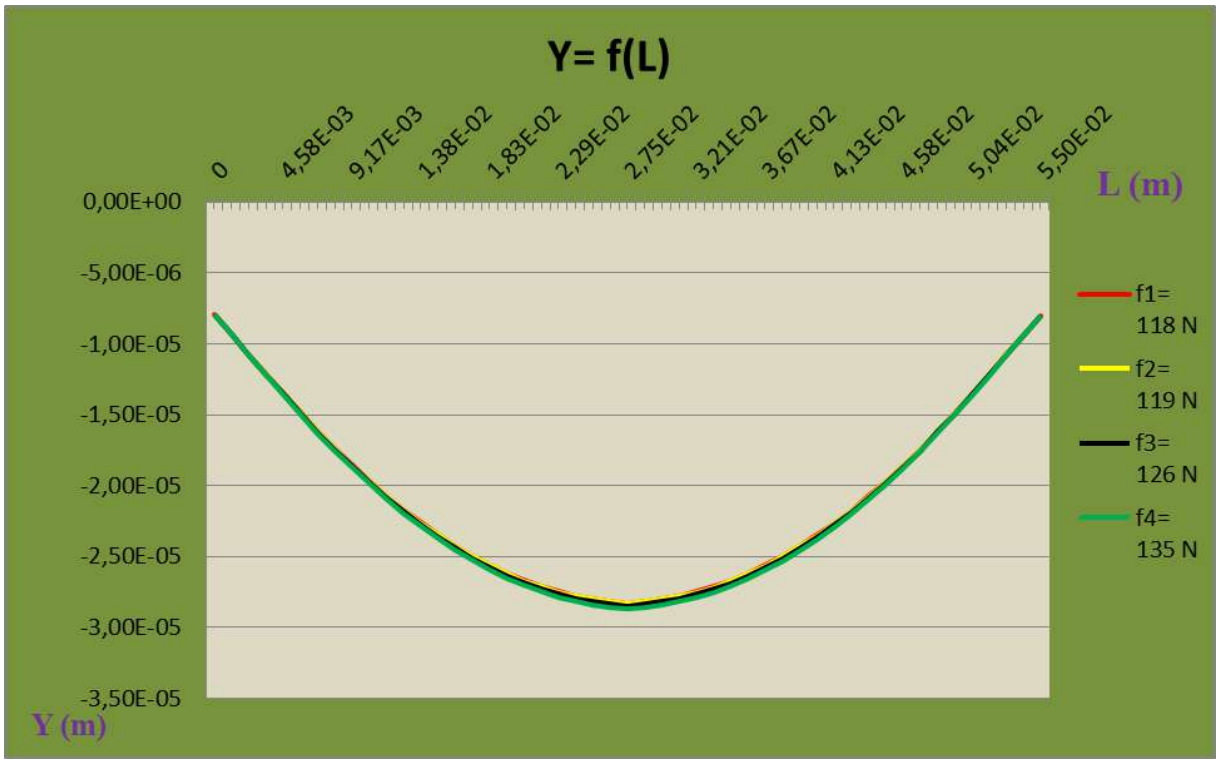


Figure IV -16 : Y= f(L)

La figure représente la déplacement en fonction de la longueur à travers quatre courbes, où dans chaque courbe nous avons changé la force à la pièce avec même température fixe (-20 °).

Il existe une relation directe entre le déplacement et la force appliquée à la pièce où l'on observe un déplacement croissant dans le sens négatif avec une force croissante sur l'intervalle [0mm à 30mm].

Contrainte: T= -20°C / f= [118 ; 135] N

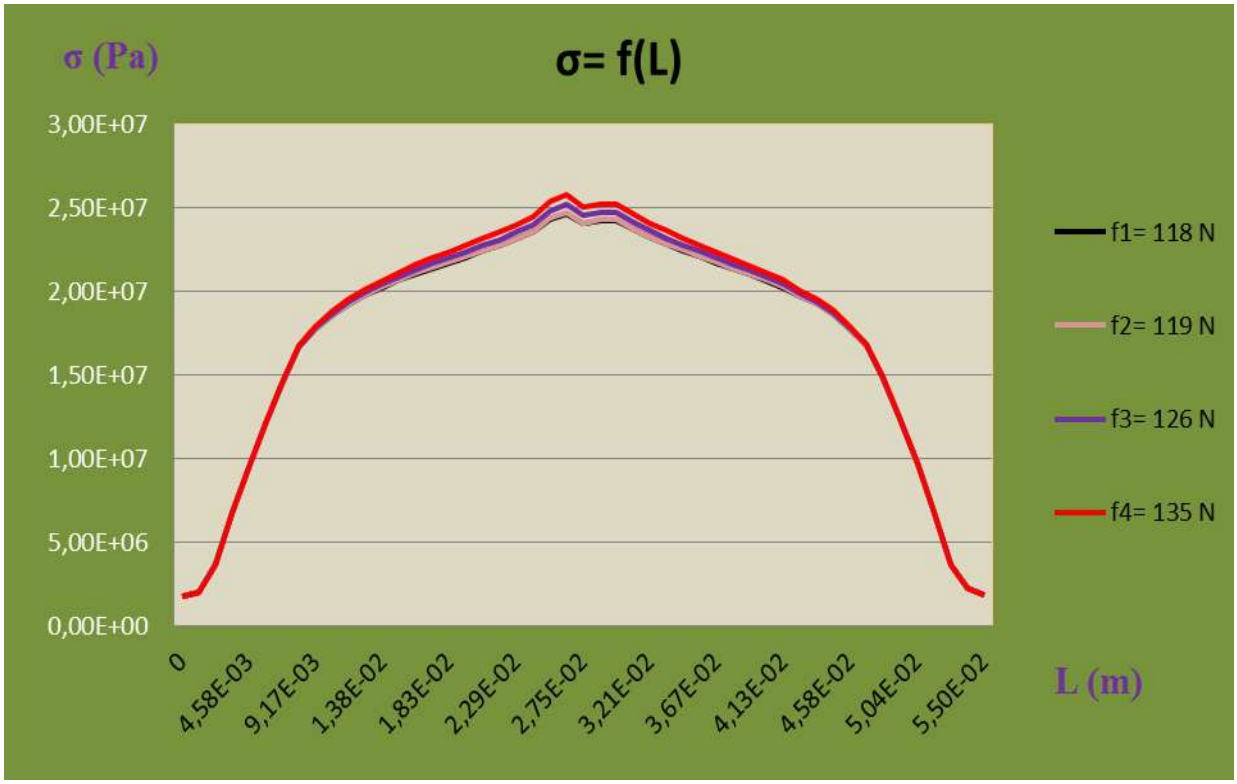


Figure IV -17 : σ= f(L)

La figure représente la contrainte en fonction de la longueur à travers quatre courbes, où dans chaque courbe nous avons changé la force appliquée à la pièce avec même température fixe (-20 °).

Et à partir de cela, nous notons que plus la force appliquée est grande, plus la contrainte est grande, la limite maximale atteint environ 26 MPa au milieu du pièce (25 mm) en appliquant la force 135 N. Ensuite, la contrainte diminue après le temps et à la fin de la pièce.

déplacement: f= 135 N / T= [20 ; -20] °C

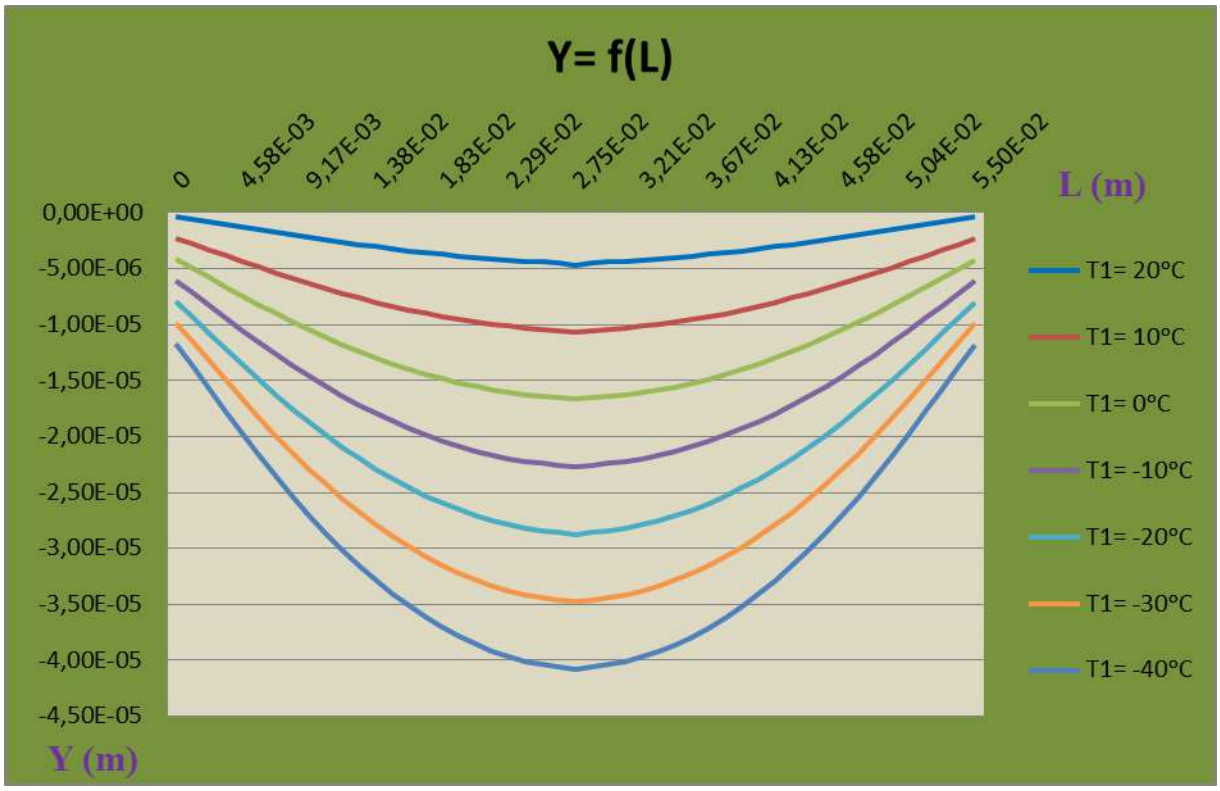


Figure IV -18 : Y= f(L)

La figure représente la déplacement en fonction de la longueur à travers neuf courbes, où dans chaque courbe nous avons changé la température à la pièce avec même force fixe (135 N).

Le déplacement augmente dans le sens négatif dans l'intervalle [0 mm à 28 mm] de la pièce, et diminue sur l'autre intervalle. On remarque sur la figure pour différentes courbes que le milieu de la pièce est très solidifié.

contrainte: f= 135 N / T=]40 ; -40[°C

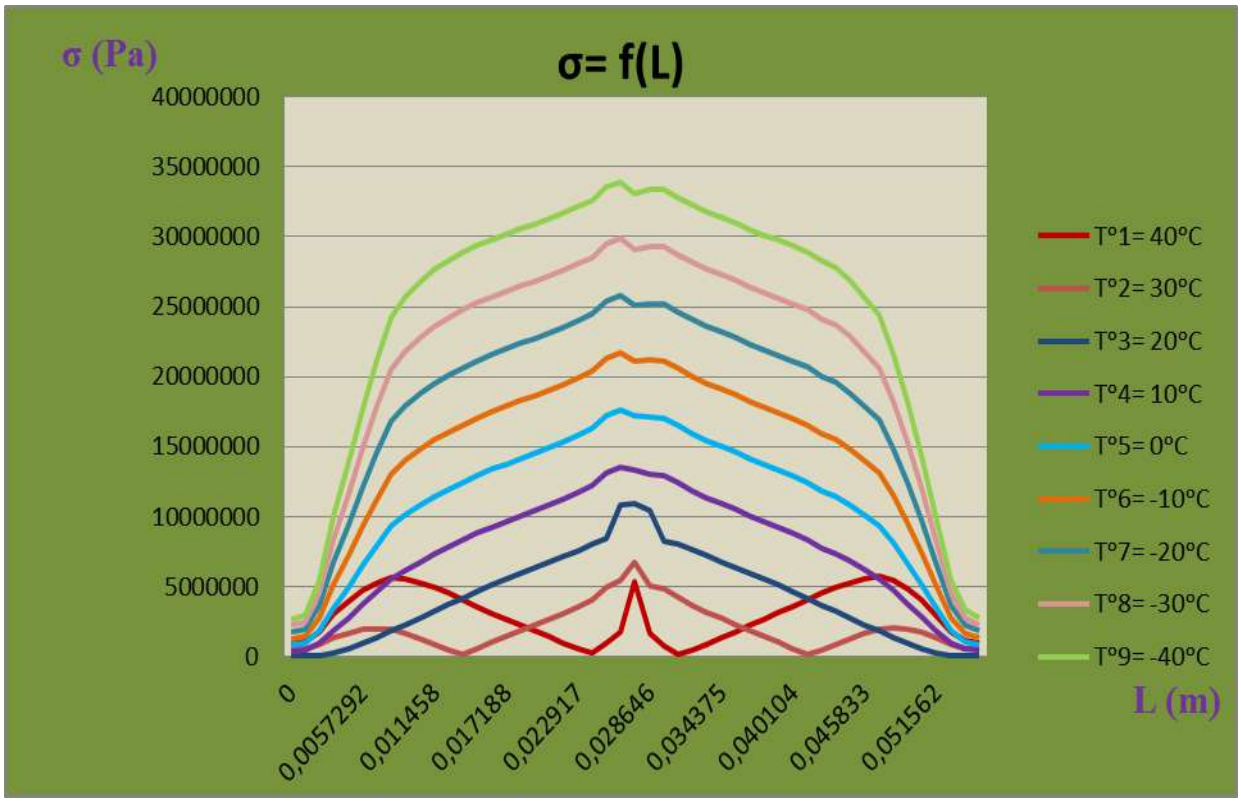


Figure IV -19 : σ= f(L)

La figure représente la contrainte en fonction de la longueur à travers neuf courbes, où dans chaque courbe nous avons changé la température à la pièce avec même force fixe (135 N).

Et il existe un relation inverse entre la contrainte et la température, Où plus la température est basse, la contrainte est élevée (Surtout dans l'intervalle [25 mm à 28 mm] à chaque température appliquée, où la contrainte est maximale puis décroît dans le reste de la pièce.

la déplacement maximale:

la courbe Ymax= f(f) :

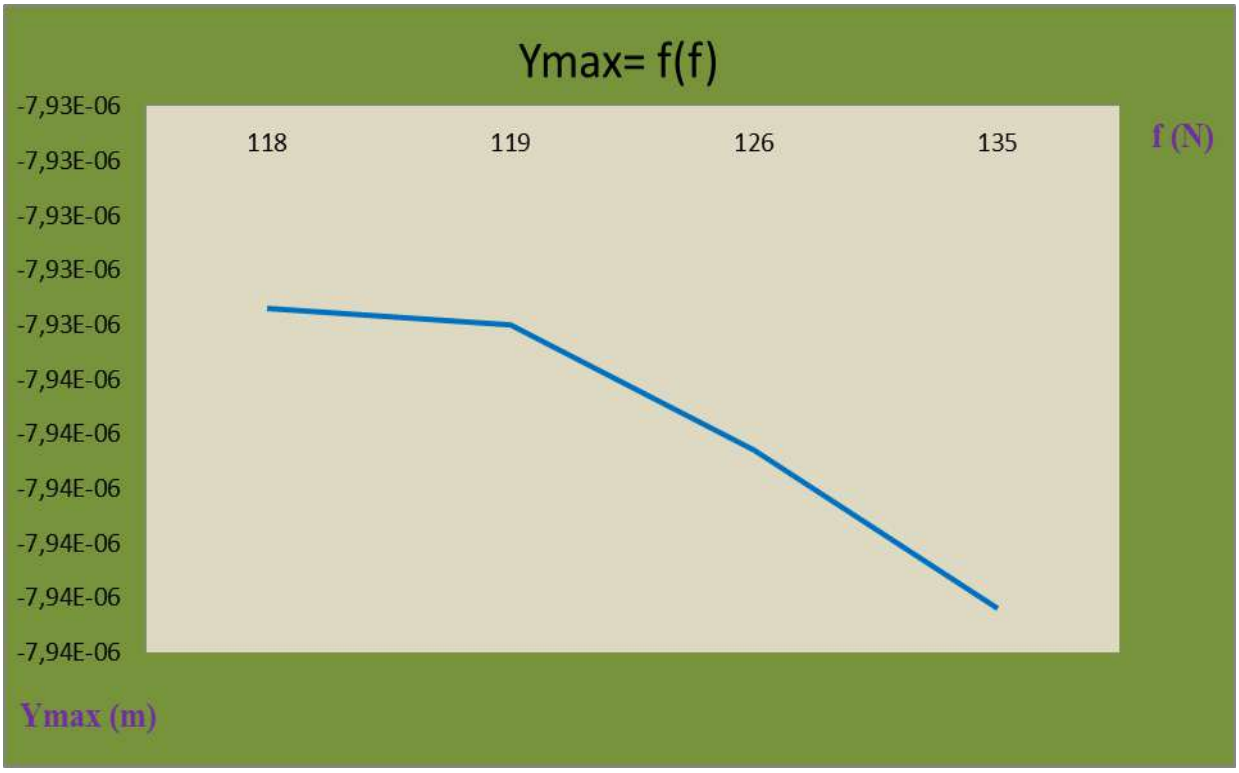


Figure IV -20 ; Ymax= f(f)

La figure représente le déplacement maximal en fonction de force.

Il existe une relation directe entre le déplacement maximale et la force appliquée à la pièce où l'on observe le déplacement maximale augmentant dans le sens négatif en augmentant la force à température constante (-20°C).

La courbe Ymax= f(T) :

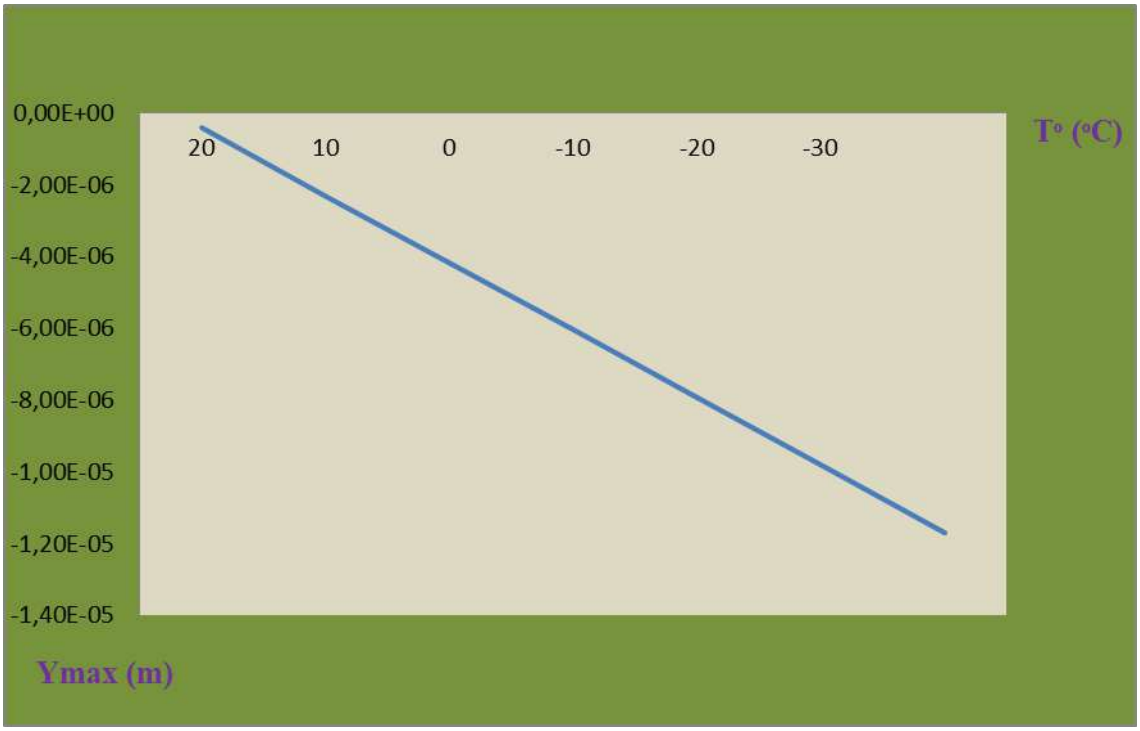


Figure IV -21 : Ymax= f(T)

Il y a une relation inverse entre le déplacement maximal et la température appliquée à la pièce où l'on observe le déplacement maximal augmente dans le sens négatif avec une température décroissante à une résistance de 135 N.

IV.4.3. Comparaison entre FGS et Fonte grise :

IV.4.3.1. FGS :

Déplacement :

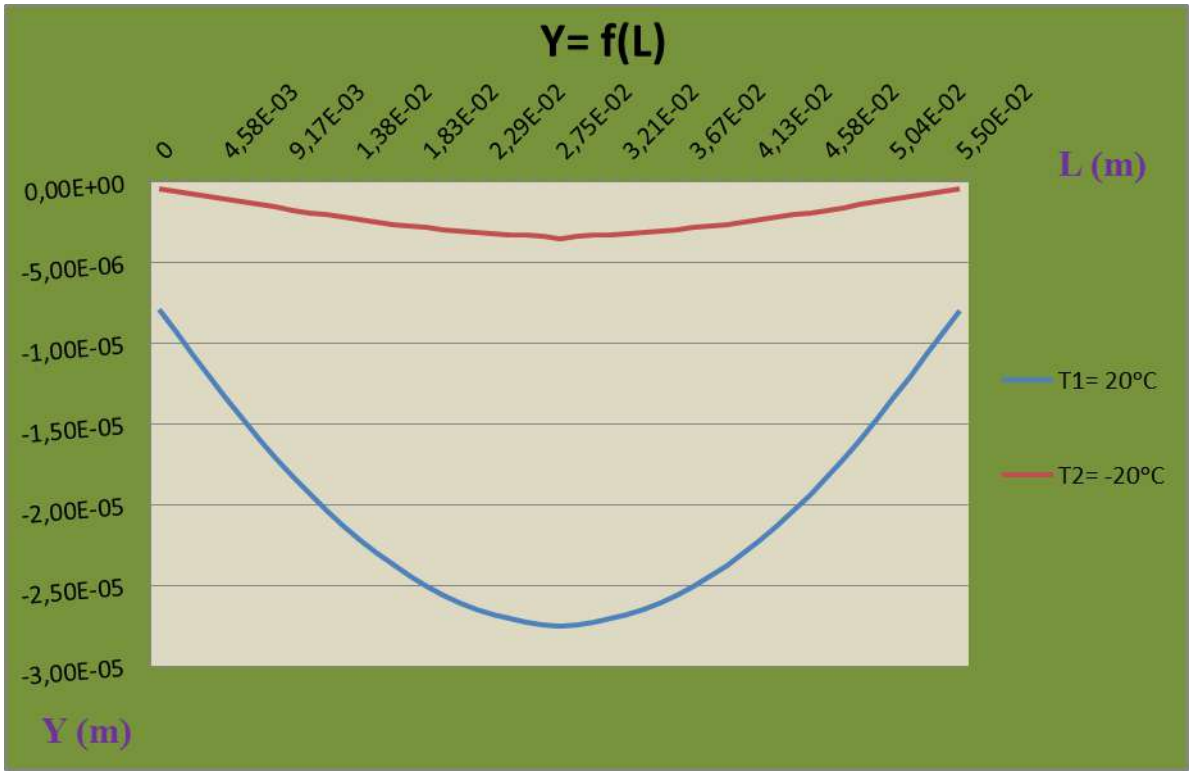


Figure IV -22 : Y= f(L)

Contrainte :

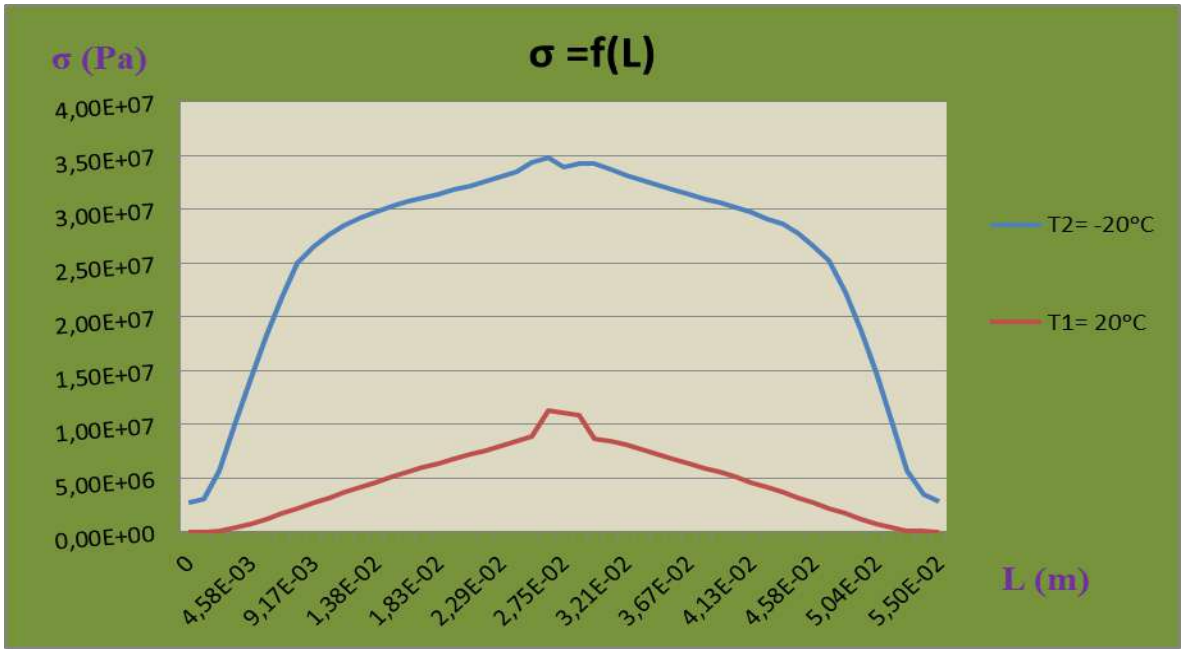


Figure IV -23 : σ= f(L)

IV.4.3.2. Fonte grise :

Déplacement :

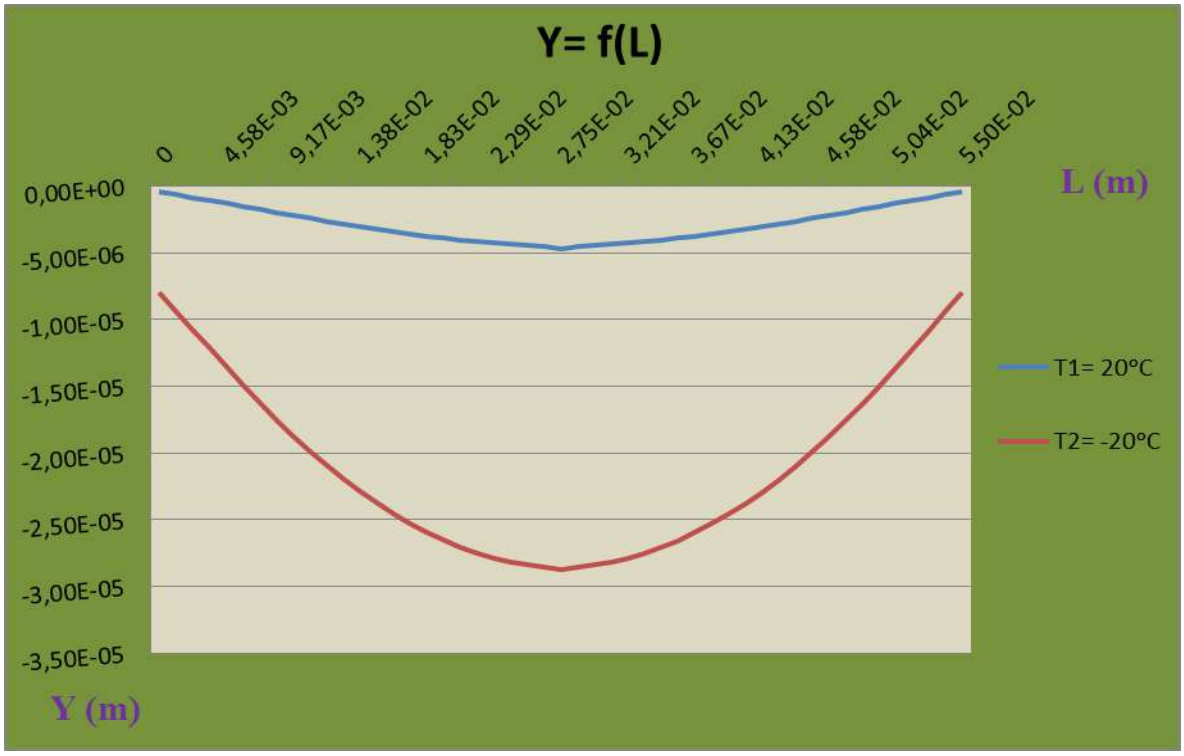


Figure IV -24 : Y= f(L)

Contrainte :

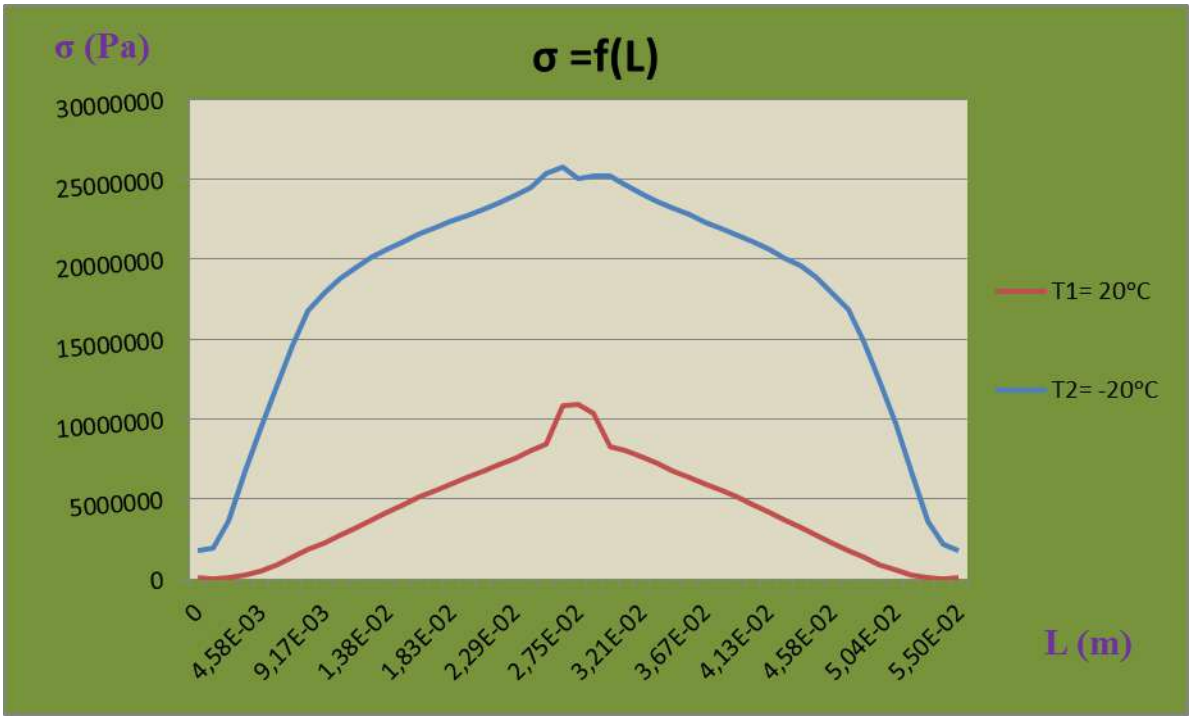


Figure IV -25 : σ= f(L)

Les figures Figure IV -17 et IV -19 représentes des courbes de déplacement directionnel dans l'axe Y, Nous pouvons voir que un déplacement directionnel est à son maximum dans la fonte à graphite sphéroïdal (FGS) pour les deux températures que dans la fonte grise. Alors que de $-2.75.10^{-5}$ mm qui est la FGS maximale à T= -20°C et $-2.87.10^{-5}$ mm qui est la fonte grise.

De plus, nous notons qu'il existe une relation inverse entre le déplacement directionnel et la température, car plus la température est basse, plus le déplacement dans le sens négatif.

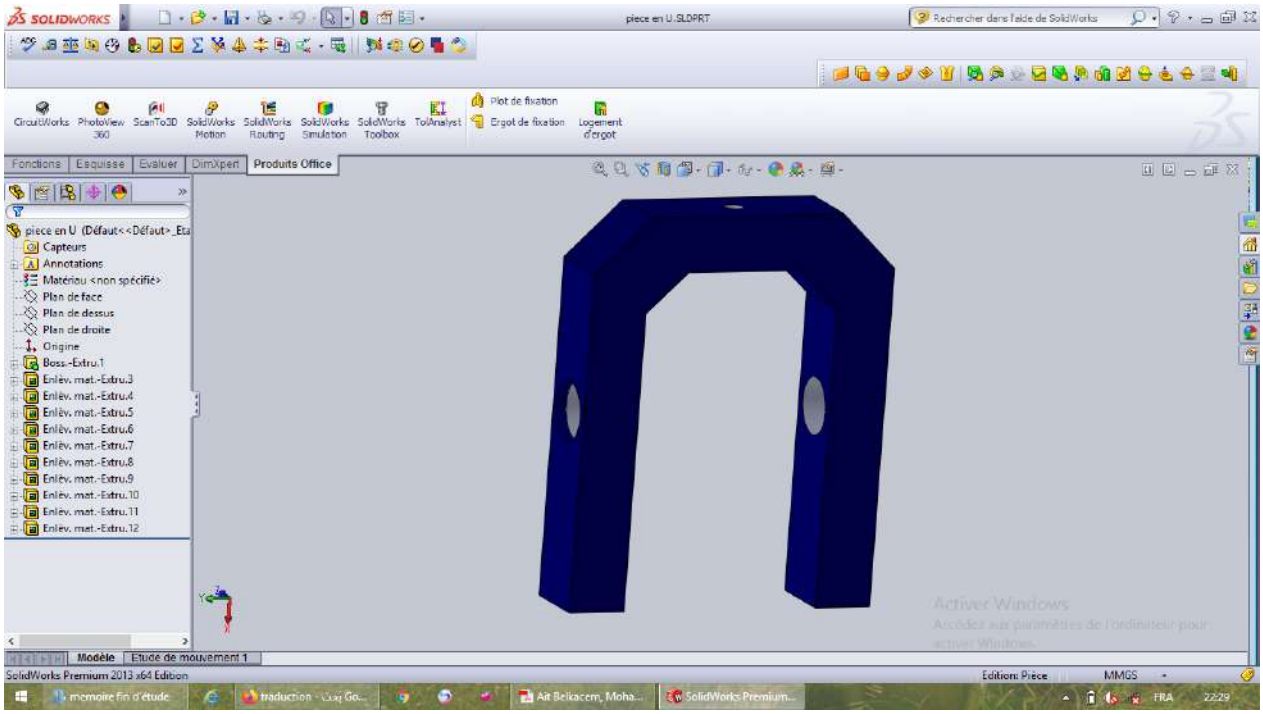
IV.5. Partie conception

IV.5.1. Conception des pieces

a) Pièce en U

La conception de la pièce s'est effectué en utilisant plusieurs commandes du logiciel de conception solidworks, tel que l'esquisses, l'extrusion, l'enlèvement de matière. Conçu sous forme de U, de maniéré à être solide, légère, et facile à assembler.

Elle dispose notamment de quatre (4) rangées pour roulement, qui permettront à deux éléments d'être en rotation l'un par rapport à l'autre.



Figue IV.26 : Conception de la pièce en U sur solidworks

b) Support :

Le support est conçu de manière à pouvoir supporter le poids de toute la structure, et de manière à accueillir le compartiment de l'éprouvette, et dispose aussi de deux rangées pour roulement.

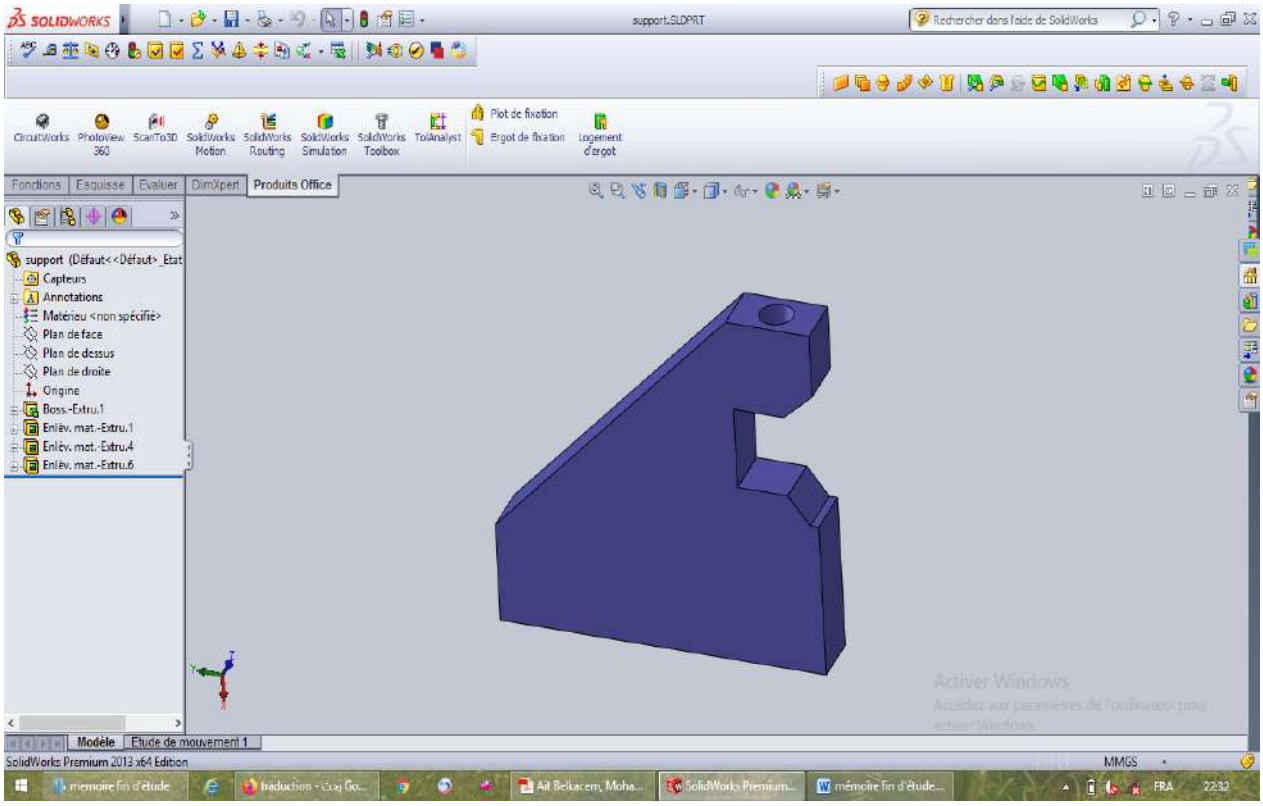


Figure IV.27 : Conception du support sur solidworks

c) Plaque de base :

La plaque de base est conçue à la foi pour accueillir entièrement le système, et pouvoir offrir une stabilité au système lors de sa mise en marche.

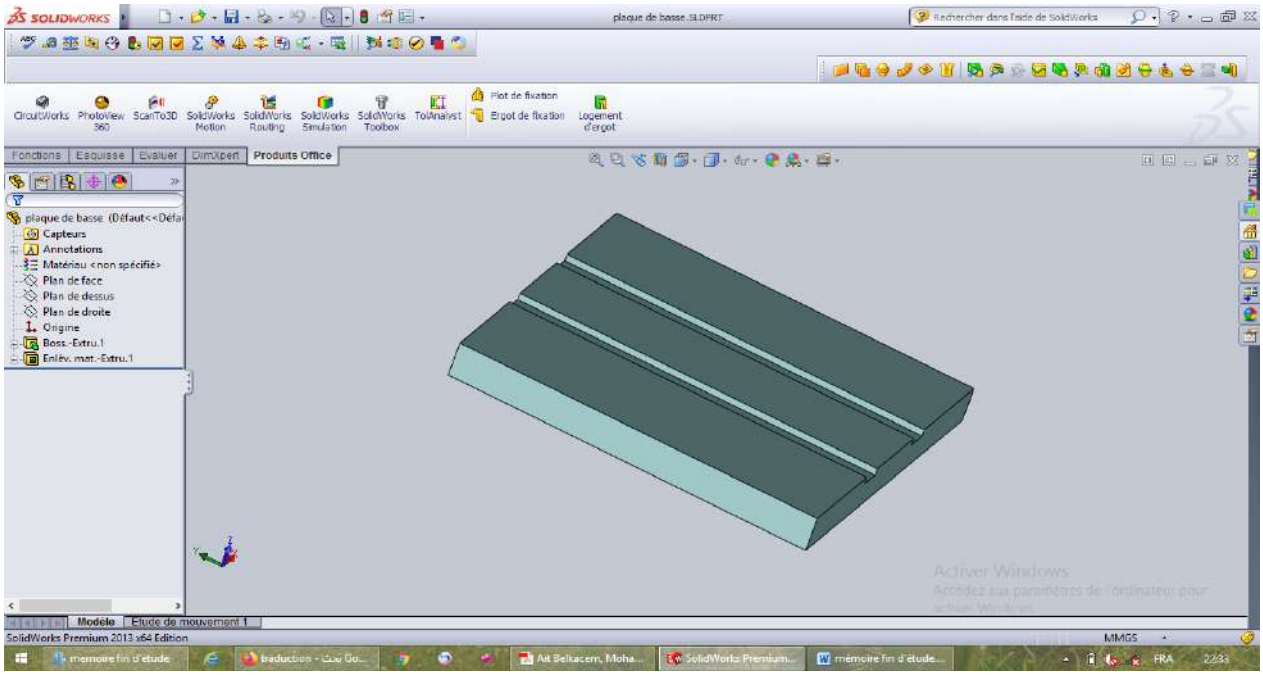


Figure IV.28 : conception plaque de base sur solidworks

d) Pendule attaquant :

Le pendule attaquant en acier a été conçu d'une manière à minimiser les frottements de l'air, et que son poids lui procure une certaine vitesse, sa masse sera calculer pour que l'énergie cinétique développée au lancer du pendule soit connue. La partie en noir est un outil couteau qui sera fait en Z200C12, qui sera fixé au pendule attaquant.

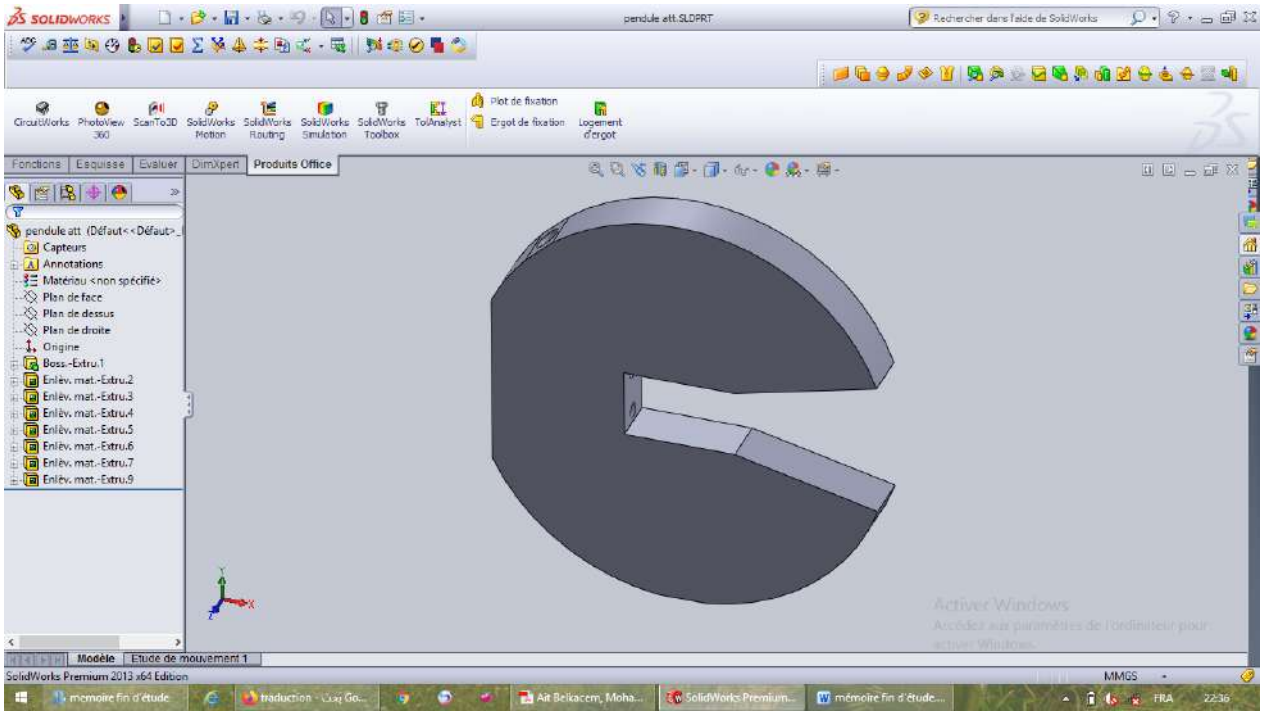


Figure IV.29 : Conception pendule attaquant sur solidworks

e) Assemblage :

L'assemblage s'est fait en utilisant plusieurs contraintes de bocages, des circlips intérieurs et extérieurs ont été utilisés à fin de maintenir les arbres dans leur emplacements.

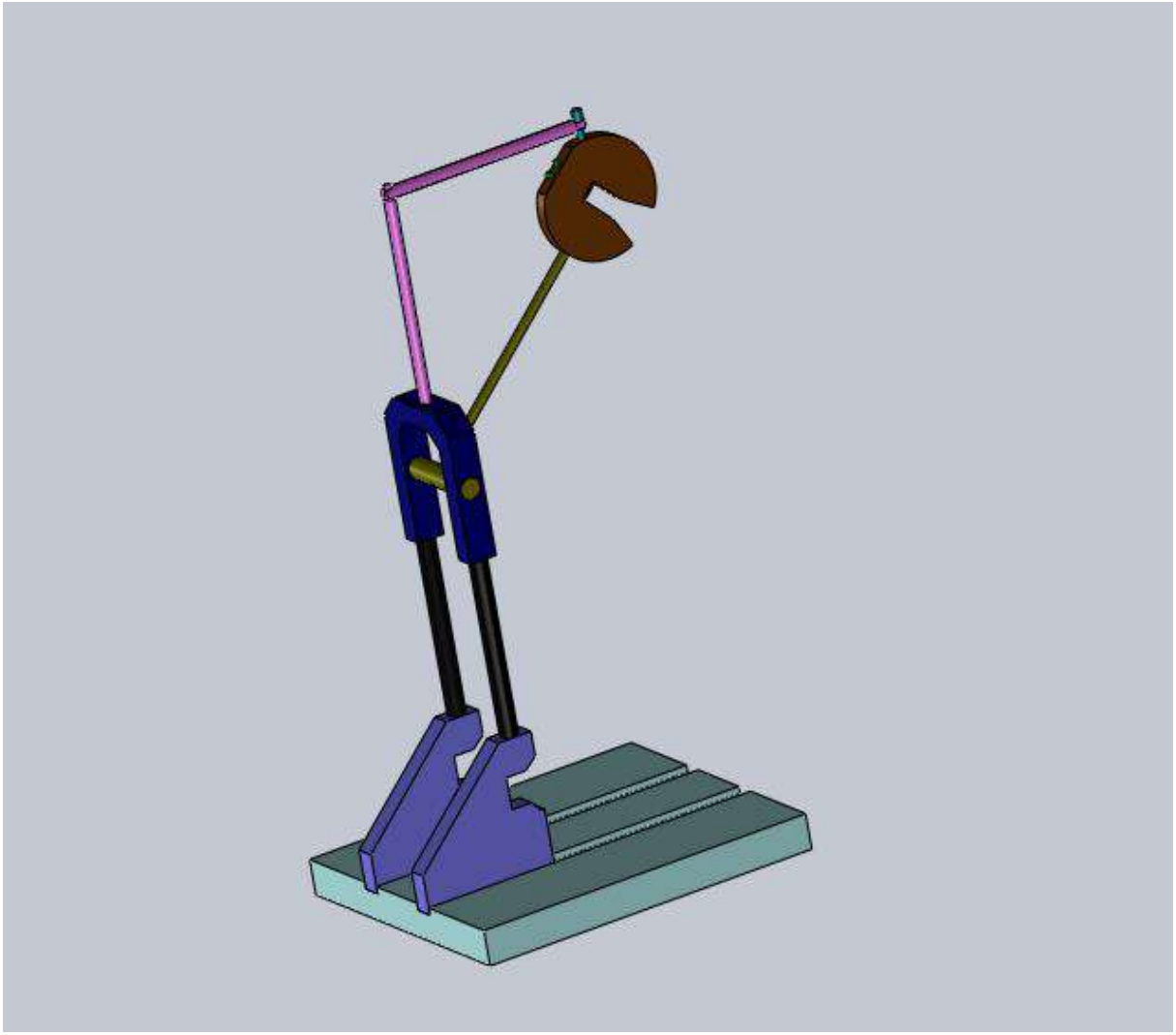
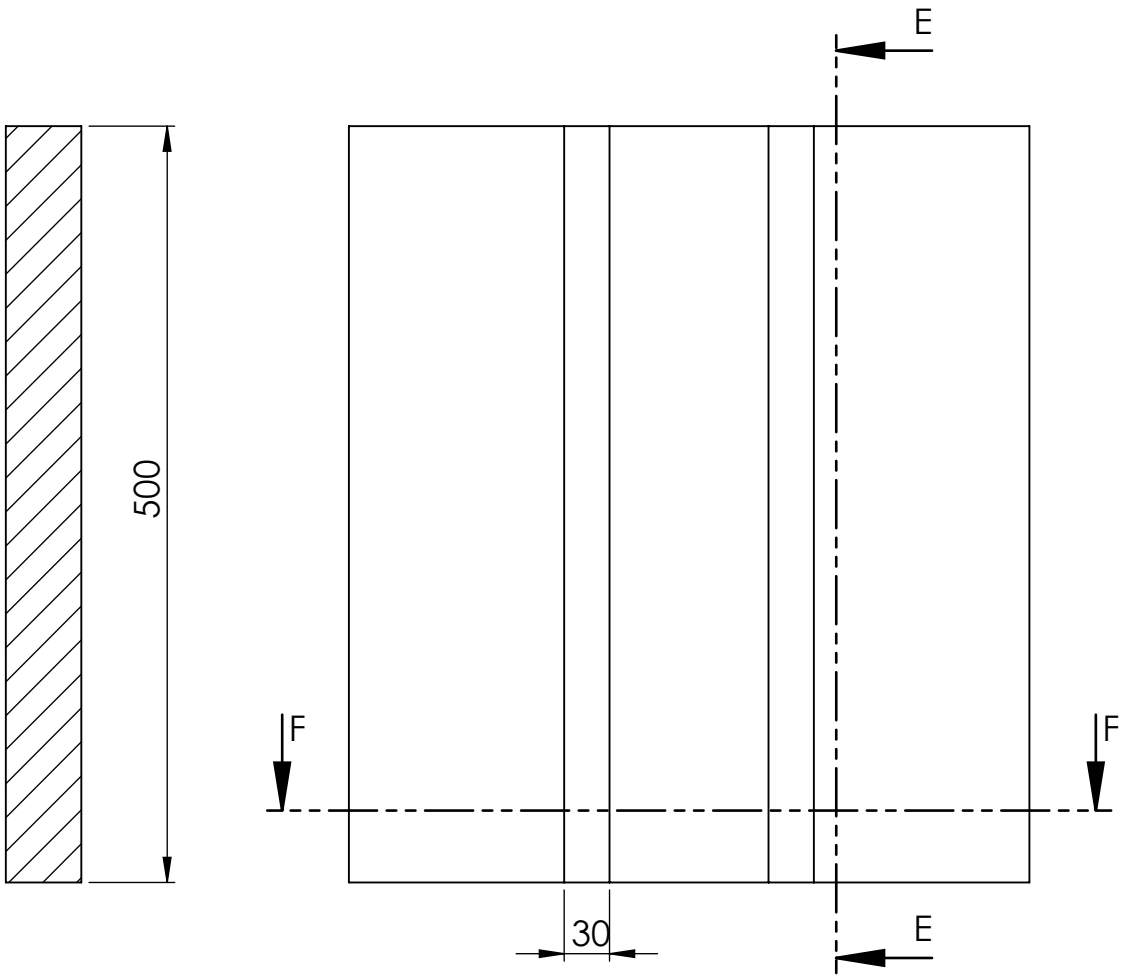
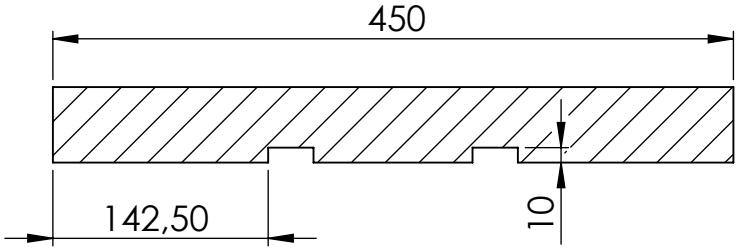


Figure IV.30 : Assemblage sur solidworks

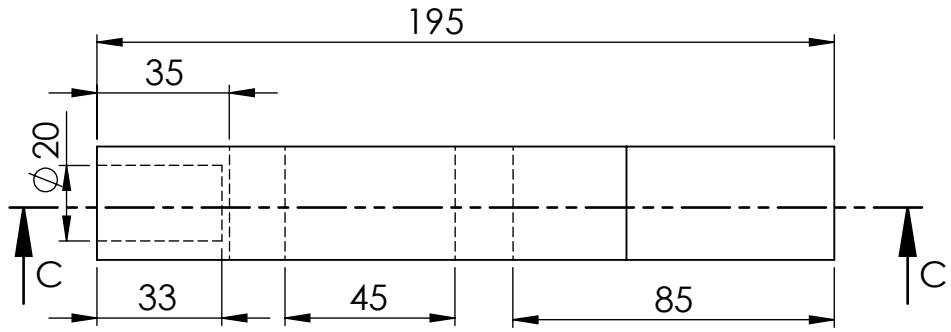


COUPE E-E
ECHELLE 1 : 5

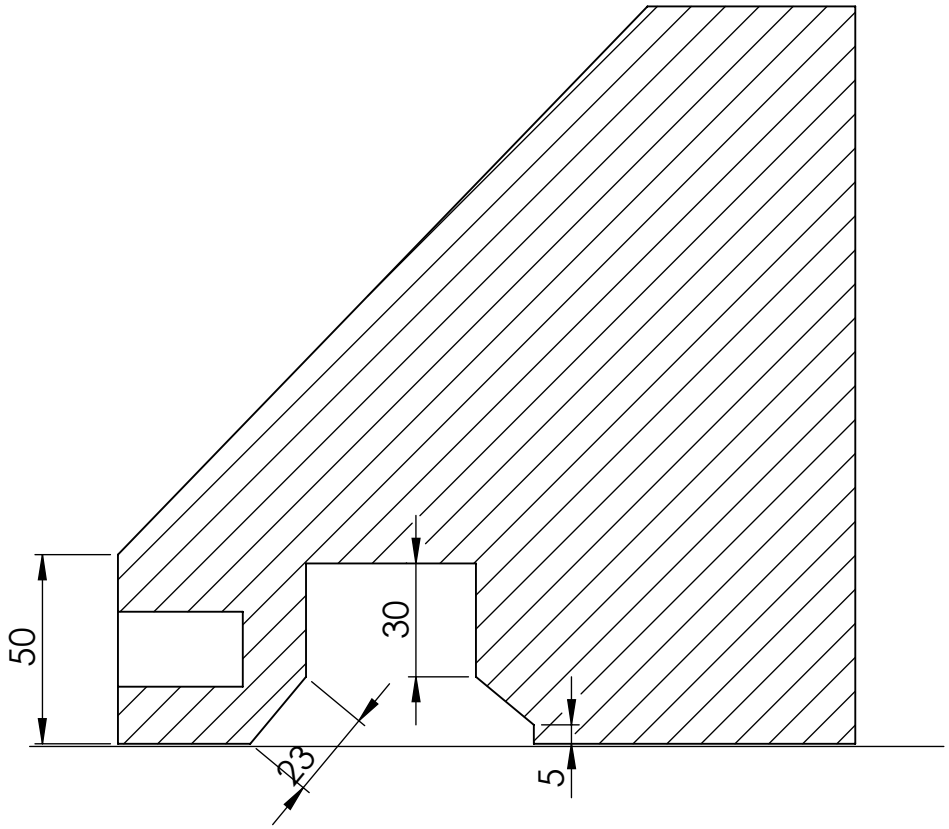


COUPE F-F
ECHELLE 1 : 5

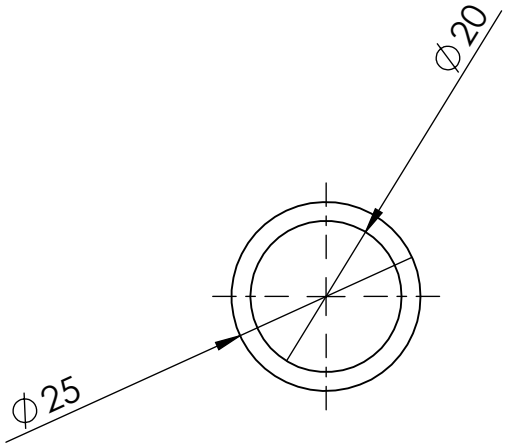
Université yahya fares Medea		
Echelles: 1:5	**plaque de basse**	projet de fin d'etude **2020**
		ingénierie des materiaux et surfaces
1	Réaliser par: YKHLEF et KHELIFATI	**conception mouton Charpy**



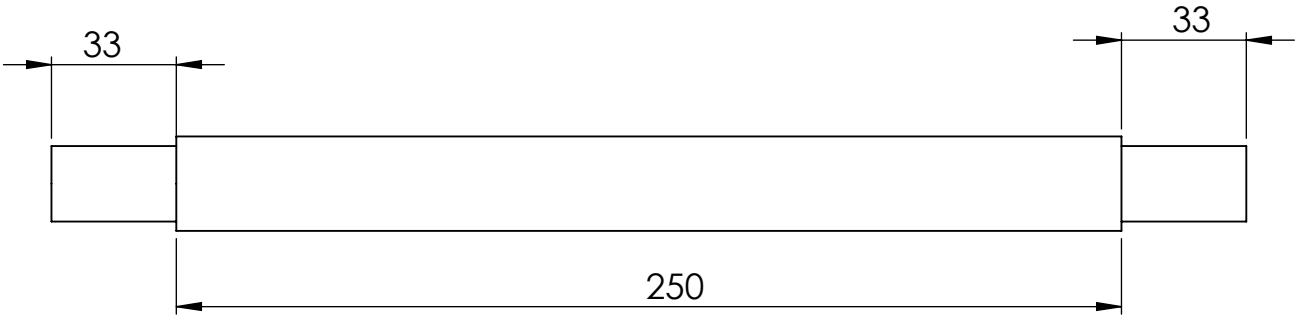
COUPE C-C
ECHELLE 1 : 2

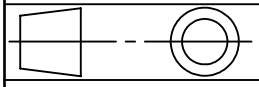


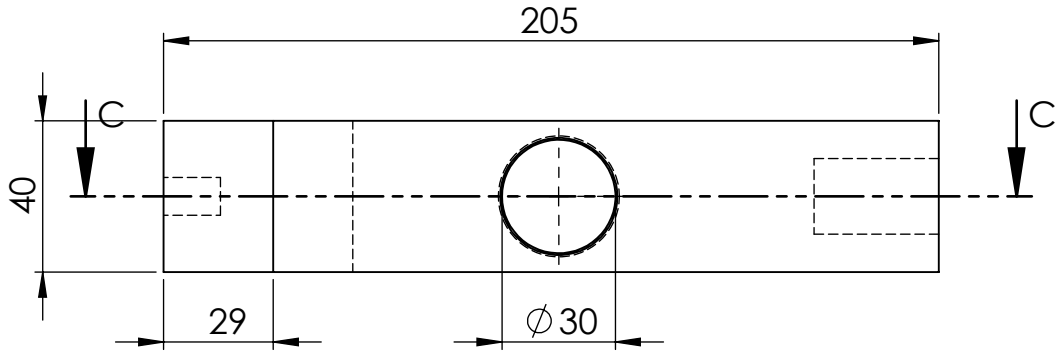
Université yahya fares Medea		
Echelles: 1:2	**support**	projet de fin d'etude **2020**
		ingénierie des materiaux et surfaces
2	Réaliser par: **YKHLEF et KHELIFATI**	**conception mouton Charpy**

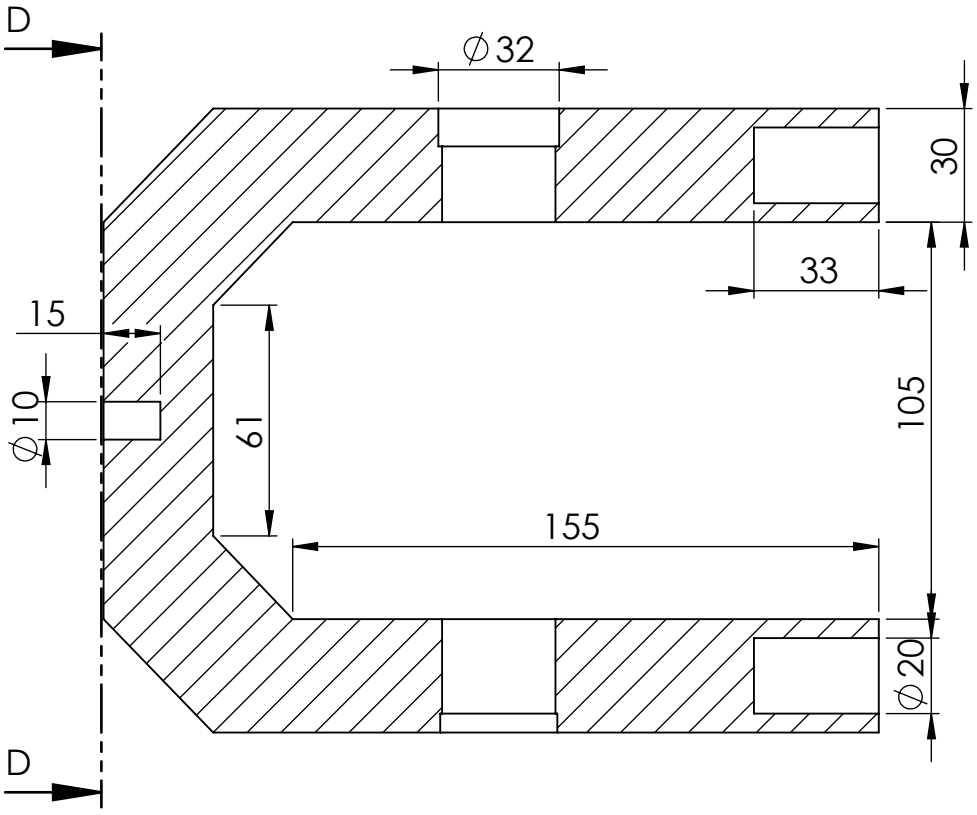


Echelle:
1: 2

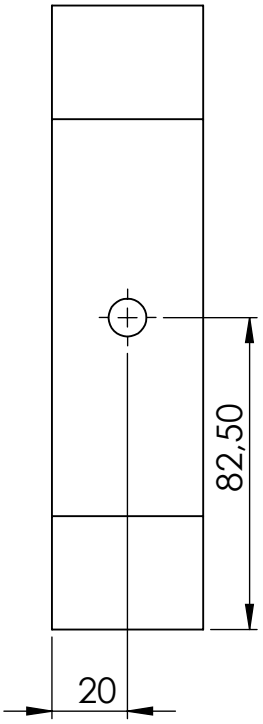


Université yahya fares Medea		
Echelles: 1:2	**Tige 1**	projet de fin d'etude **2020**
		**ingénierie des materiaux et surfaces**
3	Réaliser par: YKHLEF et KHELIFATI	**conception mouton Charpy**

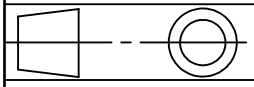


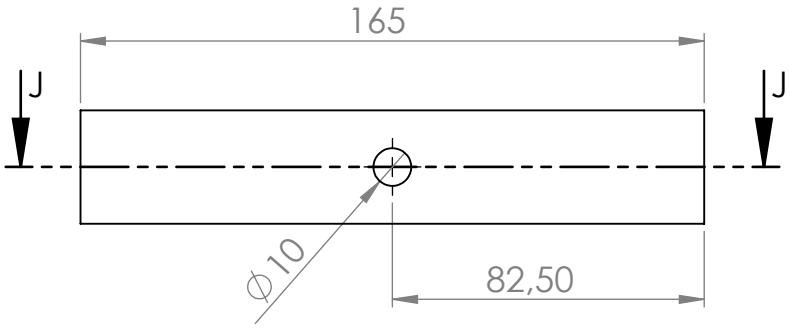


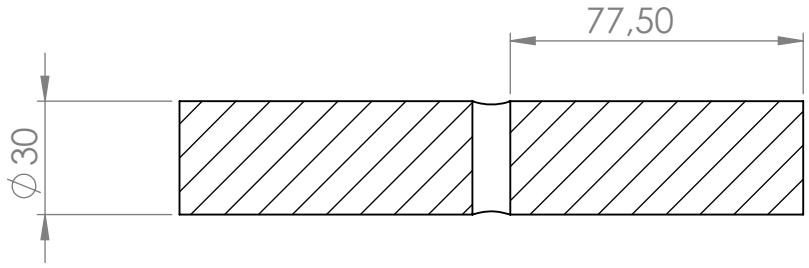
COUPE C-C



COUPE D-D

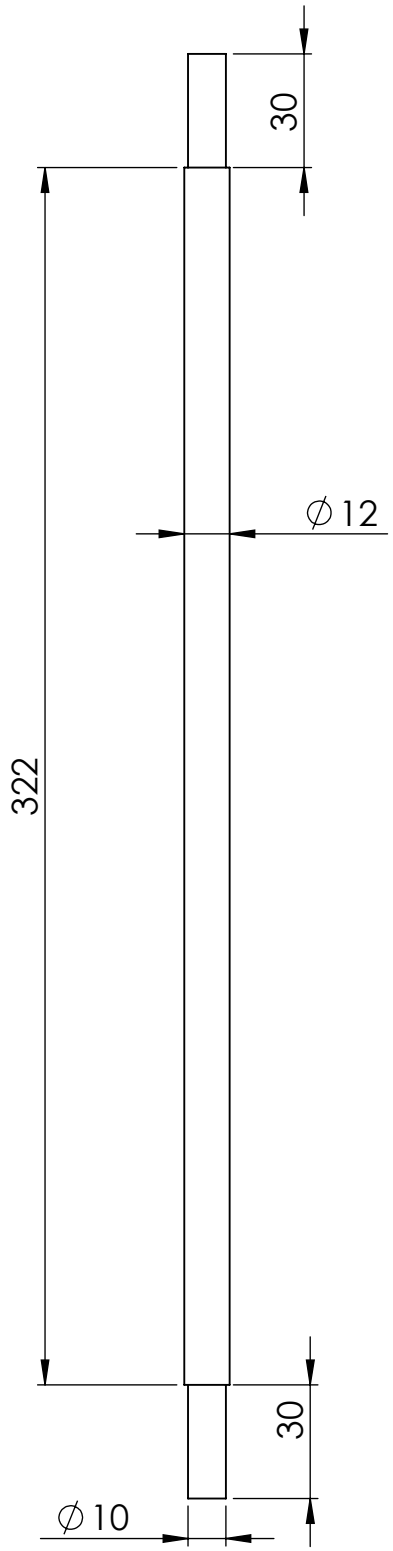
Université yahya fares Medea		
Echelles: 1:2	**Piéce en U**	projet de fin d'etude **2020**
		**ingénierie des materiaux et surfaces**
4	Réaliser par: YKHLEF et KHELIFATI	**conception mouton Charpy**



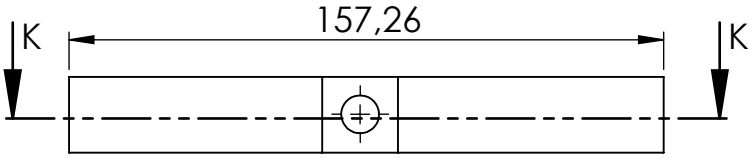


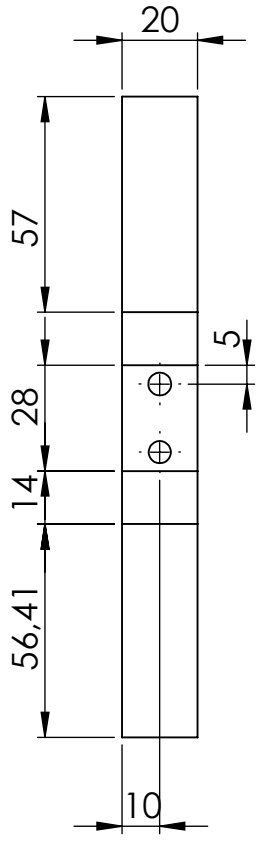
COUPE J-J
ECHELLE 1 : 2

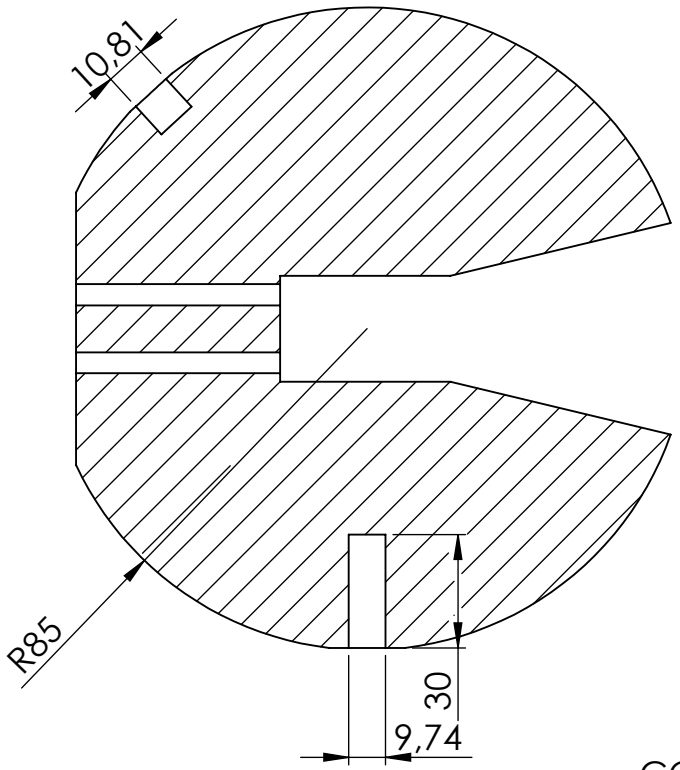
Université yahya fares Medea		
Echelles: 1:2	**Roulement de pendule**	projet de fin d'etude **2020**
		ingénierie des materiaux et surfaces
5	Réaliser par: YKHLEF et KHELIFATI	**conception mouton Charpy**



Université yahya fares Medea		
Echelles: 2:1	**Tige pendule**	projet de fin d'etude **2020**
		ingénierie des materiaux et surfaces
6	Réaliser par: YKHLEF et KHELIFATI	**conception mouton Charpy**

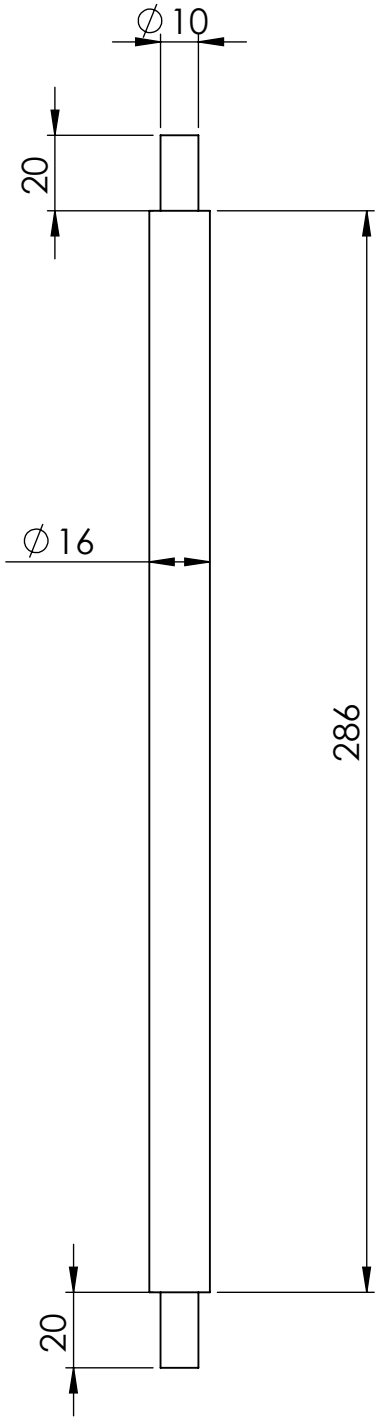




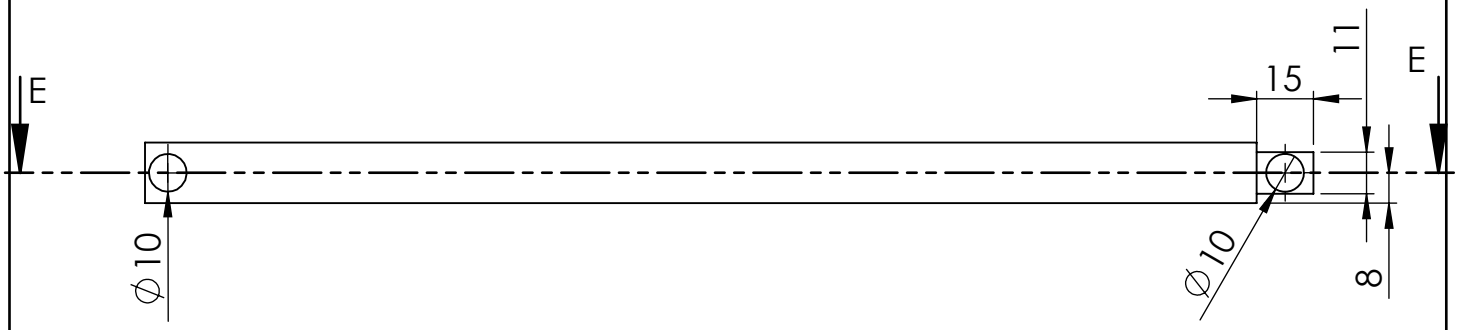


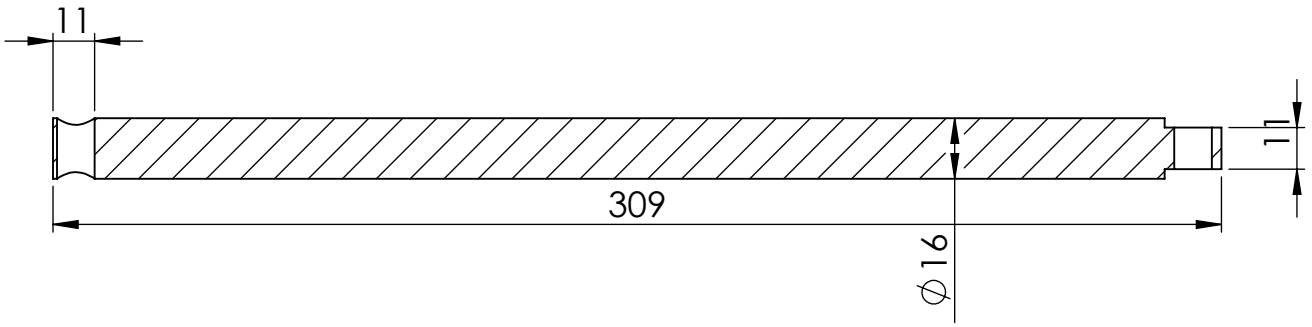
COUPE K-K

Université yahya fares Medea		
Echelles: 1:2	**pendule attaquant**	projet de fin d'etude **2020**
		ingénierie des materiaux et surfaces
9	Réaliser par: YKHLEF et KHELIFATI	**conception mouton Charpy**



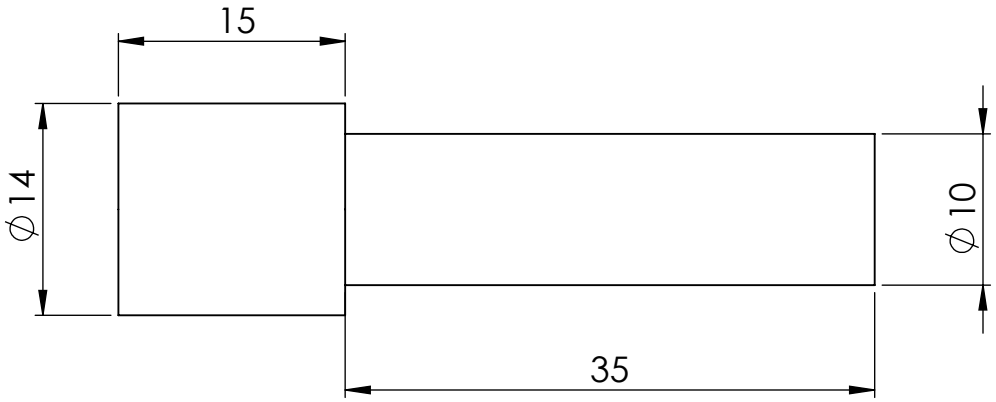
Université yahya fares Medea		
Echelles: 1:2	**Tige 8**	projet de fin d'etude **2020**
		ingénierie des materiaux et surfaces
8	Réaliser par: YKHLEF et KHELIFATI	**conception mouton Charpy**



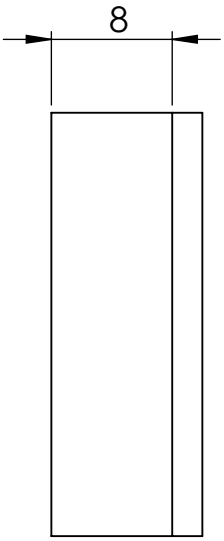


COUPE E-E
ECHELLE 1 : 2

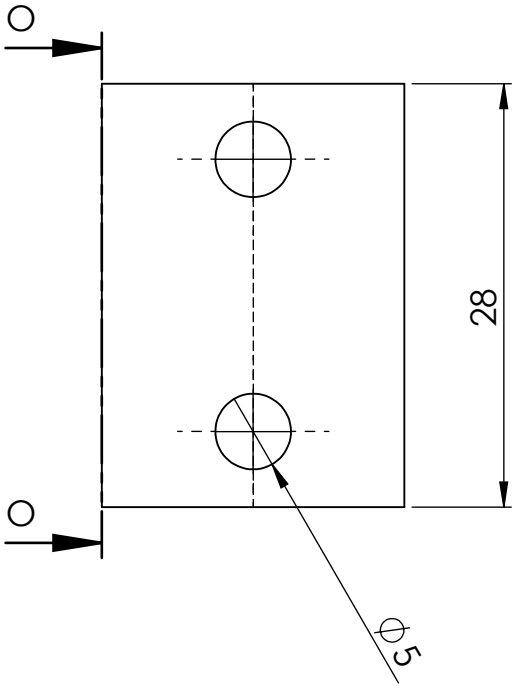
Université yahya fares Medea		
Echelles: 2:1	**Tige 9**	projet de fin d'etude **2020**
		ingénierie des materiaux et surfaces
9	Réaliser par: YKHLEF et KHELIFATI	**conception mouton Charpy**

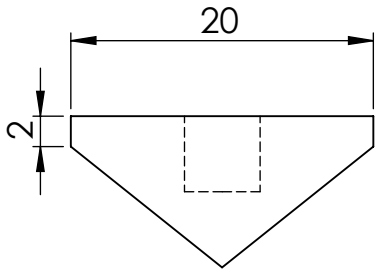


Université yahya fares Medea		
Echelles: 2:1	Levier de libération de sécurité	projet de fin d'etude **2020**
		ingénierie des materiaux et surfaces
10	Réaliser par: YKHLEF et KHELIFATI	**conception mouton Charpy**

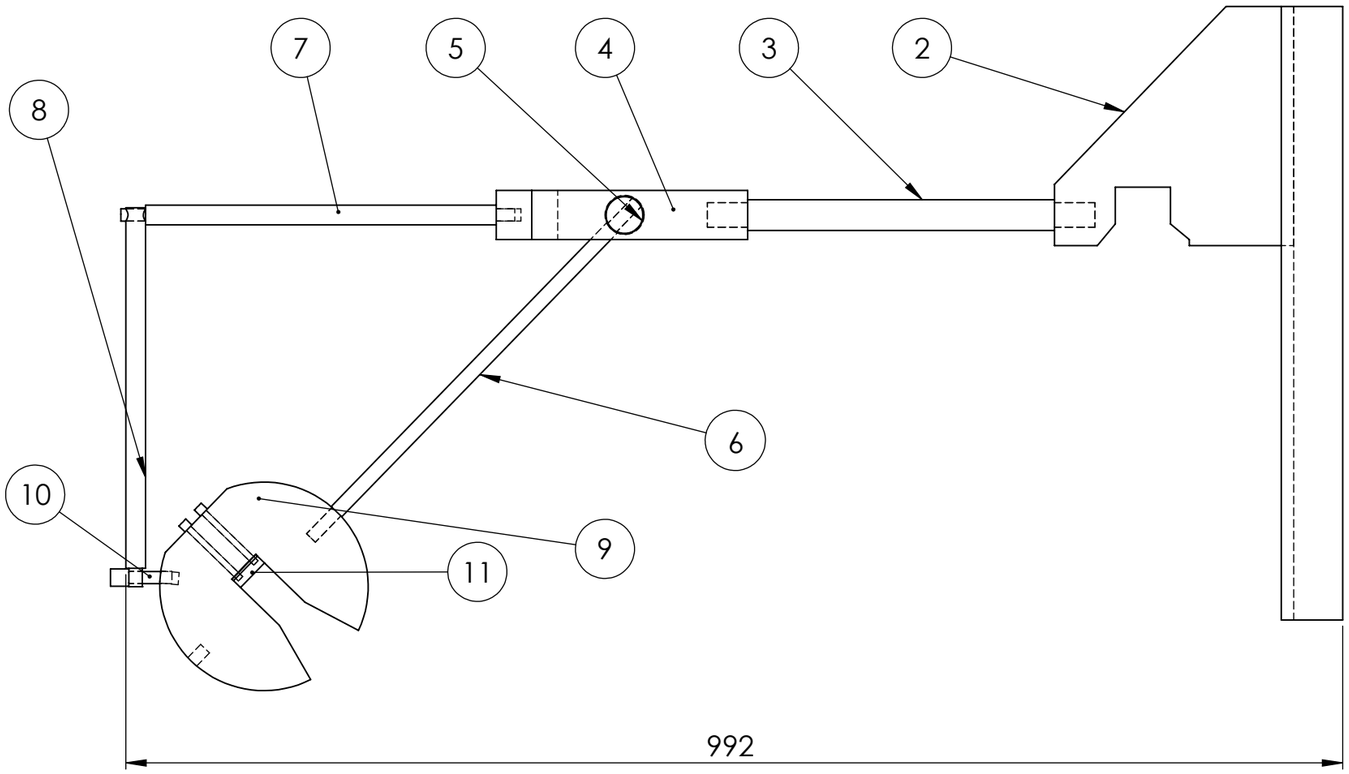


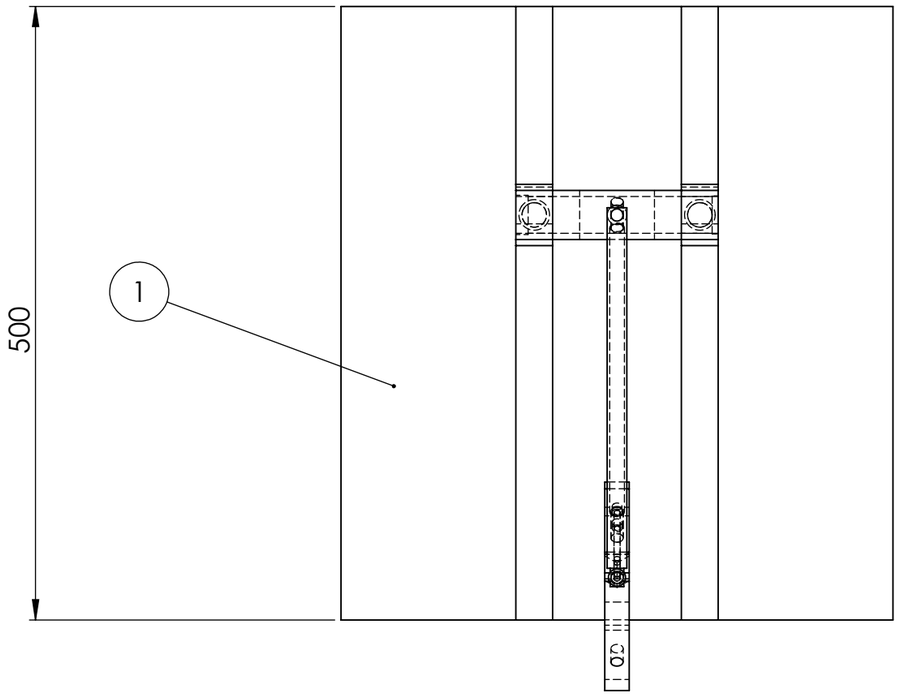
COUPE O-O
ECHELLE 2 : 1





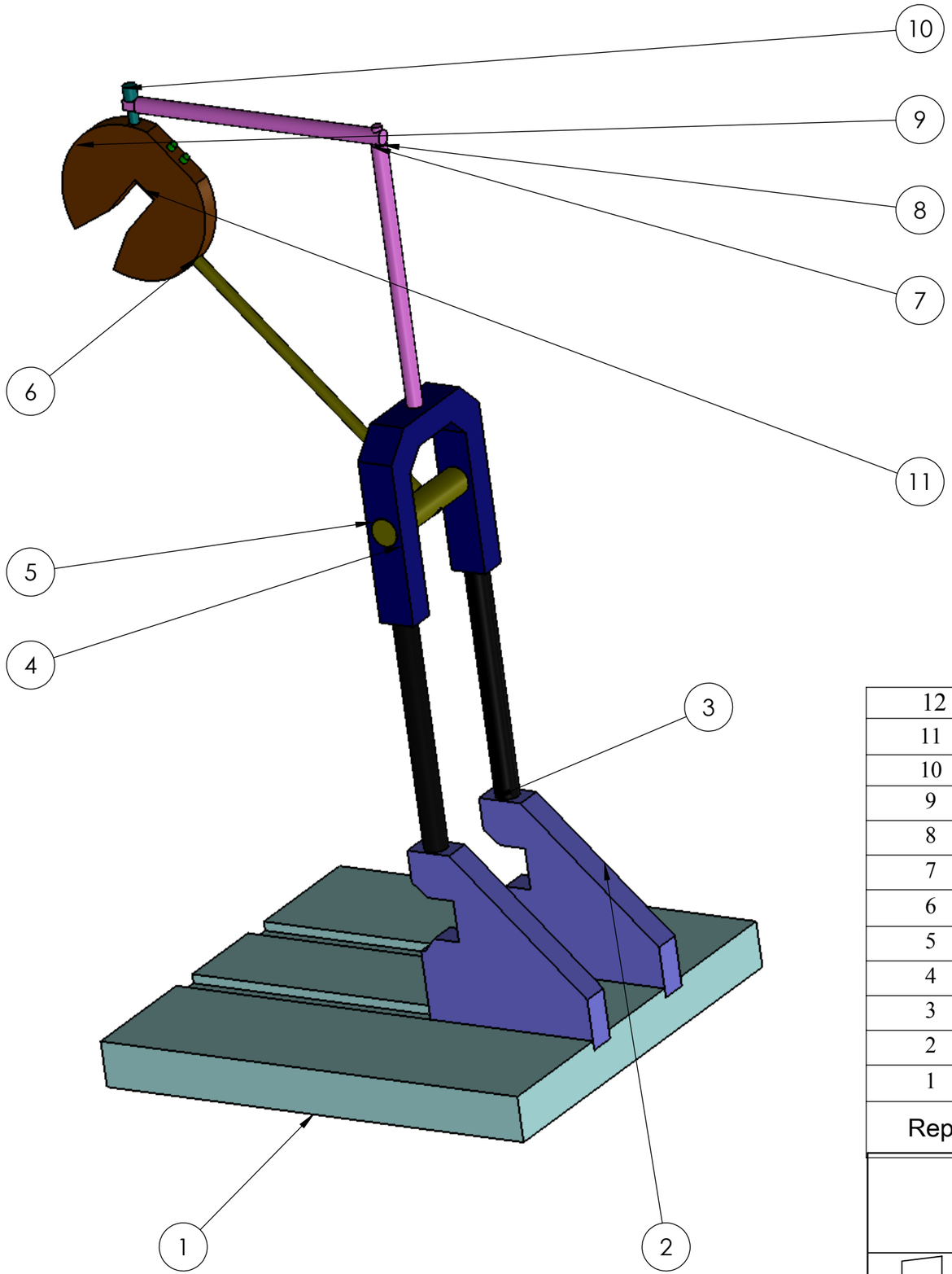
Université yahya fares Medea		
Echelles: 2:1	**Outil couteau**	projet de fin d'etude **2020**
		ingénierie des materiaux et surfaces
11	Réaliser par: YKHLEF et KHELIFATI	**conception mouton Charpy**





Rep	Designation	Matiére	QTE
12	vis		2
11	Outil couteau	z200	1
10	Levier de libération de sécurité	xc 48	1
9	pendule attaquant	Acier	1
8	Tige 9	XC 48	1
7	Tige 8	XC 48	1
6	Tige pendule	z200	1
5	Roulement de pendule	42CD4	1
4	piece en U	XC 48	1
3	Tige 1	42CD4	2
2	support	XC 48	2
1	plaque de basse	Acier	1

Echelle: 1: 5	**Mouton Charpy**	Réaliser par YKHLEF Hamza KHELIFATI Chahinaz
		Projet de fin d'etude
A3	**Université Dr. yahya fares Medea**	**23 / 06 / 2020**



Rep	Designation	Matiére	QTE
12	vis		2
11	Outil couteau	z200	1
10	Levier de libération de sécurité	xc 48	1
9	pendule attaquant	Acier	1
8	Tige 9	XC 48	1
7	Tige 8	XC 48	1
6	Tige pendule	z200	1
5	Roulement de pendule	42CD4	1
4	piece en U	XC 48	1
3	Tige 1	42CD4	2
2	support	XC 48	2
1	plaque de basse	Acier	1

Echelle: 1: 5	**Mouton Charpy**	Réaliser par YKHLEF Hamza KHELIFATI Chahinaz
		Projet de fin d'etude
A3	**Université Dr. yahya fares Medea**	23 / 06 / 2020

Conclusion générale

En utilisant la méthodologie de travail pour étudier la résistance de la fonte à graphite sphéroïdal à différentes températures (40 à -40) en utilisant un système de simulation INSIS, nous avons conclu:

- Le déplacement directionnel de la fonte grise et de la fonte à graphite sphéroïde est élevé dans le sens négatif avec une température plus basse à f=135 N
- Le déplacement directionnel des deux matériaux est élevé en augmentant la force appliquée à -20 ° C
- La contrainte diminue à mesure que nous augmentons la force et réglons la température à -20.

De plus, si nous maintenons la force à 135 N et augmentons la température dans les deux matériaux

Grâce à des simulations et à des courbes extraites, nous remarquons que la fonte à graphite sphéroïdal est meilleure que la fonte grise, étant donné la valeur de contrainte enregistrée dans la simulation en faisant varier le température

Bibliographie

[1]:www.researchgate.net/publication/337089010_7_classification_des_aciers_et_des_fontes_34_pages.

[2] : Technique de l'ingénieur M 380 ; Jean-Claude MARGERIE ; Propriétés des fontes grises

ordinaires.

[3] : Ahmed ATMANI. Etude de l'influence des traitements thermique sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'une Fonte ADI de type STT 700-2. Master académique. Tizi-Ouzou : Université Mouloud MAMMERI, 2012, p1.

[4] :AIT BELKACEM, Mohand Arezki. Conception d'un pendule Charpy chauffant instrumente. Master. Tizi-Ouzou : Université Mouloud MAMMERI, 2015, p13-14-15.

[5]: Hassane, MOUSTABCHIR. ÉTUDE DES DEFAUTS PRÉSENTS DANS DES TUYAUX SOUMIS À UNE PRESSION INTERNE. Doctorat. Metz : Université Paul Verlaine, 07 Mars 2008, p48.

[6] : Publié par : Rio Tinto Fer et Titane Inc« livre Fonte à Graphite Sphéroïdal (fonte GS) ».

[7]
:www.researchgate.net/publication/337089010_7_classification_des_aciers_et_des_fontes_34_pages

]8] : Technique de l'ingénieur M 380 ; Jean-Claude MARGERIE ; Propriétés des fontes grises Ordinaires.

[9] : Laplanche, Les fontes et leur traitement thermique (tome II) page 139, 142 à 144, 160,

169, 170 à 172.

[10] : Saïd ben Saada, Publié par Traitement Thermiques, Classification et Désignation des Aciers et Fonte.

[11] : HANI Djamal et ZERROUK Abderrahmane. Conception et étude d'un corps d'essieu d'une semi-remorque de la SNVI, en FonteGS 42-12. Master. Bejaia: Université Abderrahmane Mira, 2013, p31.

[12] : www.extpdf.com/suspension-corps-de-l-essieu-pdf.html.

[13] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Temp%C3%A9rature_de_transition_fragile-ductile.

[14] : NAGAOKA, K. SOUMA, M. Irreversible carbon diffusion in growth of cast iron. The Physical Metallurgy of Cast Iron Proceeding of the 3rd International Symposium on the physical Metallurgy of cast iron. Stockholm 29-31/08/84. Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 1985, vol 34., pp.355-364.

[15] : IKHLEF, A., CIZERON, G., BARREAU, G., GUERET, G. Evolutions structurales de fontes G.S. au cours de différents types de traitements thermiques. Hommes et fonderie. Janvier 1982, vol. 121, pp. 9-22.

IKHLEF, A., CIZERON, G., BARREAU, G., GUERET, G. Evolutions structurales de fontes G.S. au cours de différents types de traitements thermiques. Traitement Thermique. 1982, n°164, pp. 31-45.

Bibliographie

[16] : PARENT-SIMONIN, S., MARGERIE, J.C. Traitements thermiques des fontes. In : Techniques de l'ingénieur, traité matériaux métalliques, 2001,vol. MD, n°M1145, pp. 1-16.

PARENT-SIMONIN. Traitements thermiques des fontes : guide de choix. In : Techniques de l'ingénieur, traité matériaux métalliques, 1999, vol. MD, n°M1146, pp. 1-9.

[17] : MONCHOUX, J.P. Influence d'un recuit de ferritisation sur la microstructure et les mécanismes de fissuration en sollicitation monotone et cyclique de la fonte à graphite sphéroïdal perlito-ferritique. Thèse Génie des matériaux : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2000. 202 p.

[18] : DIERICKX, P. Etude de la microstructure et des mécanismes d'endommagement de fontes GS ductiles. Influence des traitements thermiques de ferritisation. Thèse Génie des matériaux : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1996, 210 p.

[19] : Centre d'information des fontes moulées (CIFOM) Le manuel des fontes moulées. Paris : Editions Techniques des Industries de la fonderie, 1983. 566 p.

[20] : PARENT-SIMONIN, S., MARGERIE, J.C. Traitements thermiques des fontes. In : Techniques de l'ingénieur, traité matériaux métalliques, 2001,vol. MD, n°M1145, pp. 1-16.

[21] : DIERICKX, P. Etude de la microstructure et des mécanismes d'endommagement de fontes GS ductiles. Influence des traitements thermiques de ferritisation. Thèse Génie des matériaux : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1996, 210 p.

[22] : International institute of refrigeration, 1975, new international dictionary of refrigeration 3rd ed. IIF/iir, PARIS.

[23] : FLECK U , KÜNDIG A, liquid hydrogen –A clean energy? Proceedings of ICEC 19, Gistou, Sey fert ed, Narosa Publishing House , New Delhi: 547-551.

[24] : WILLIAMSON (K.D) et EDESKUTY (F,J) – Liquid Cryogens. Vol I : Theory and equipmentVol III Properties and Applications CRC Press.Inc (1983).

[25] : CLAUDET S et Al , economics of large helium cryogenic systems : experience from recent projects at CERN ,ADV,Cryog.Eng, 45A :1301-1308 (2000).

[26] : CAILLETET, L,C.R. Acad. Sci PARIS ,85,1213 (1877).

[27] : PICTET ,R, C.R. Acad. Sci PARIS ,85,1214 (1877).

[28] : LLSZEWSKI,K, Phil,mag,39,188 (1895).

[29] : DEWAR , j, Proc .Roy .Soc,63, 256 (1898).

[30] : DEWAR , j,Collected papers of sir . J . DEWAR, Cambridge University Press (1927).

[31] KAMELLINGH-ONNES, H ;Proc .Acad.Sci .Amst,11 ,168 (1908).

[32] KAMELLINGH-ONNES, H ;Com,Phys.Lab.Univ.LEIDEN,119,120,122 (1911).

Bibliographie

[33] : Technique De l'ingénieur.

[34] : HASELDEN G.G. Cryogenic Fundamentals (1971).