

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de TECHNOLOGIE
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en :

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Construction mécanique

THEME

**Etude et Conception d'un système de tirage de
la croissance cristalline de type Czochralski**

Présenté par :

FEDDAG Brahim

Promoteur :

Mr. MERAH Abdelkrim

Promotion 2019- 202

Remerciements

*Je voudrai remercier en premier mon promoteur monsieur MERAH.
Abdelkrim pour l'intérêt qu'il a manifesté à mon travail, pour sa
patience et aussi sa disponibilité*

*Ma reconnaissance va également à tous mes enseignants qui m'ont
aidé à réaliser ce travail, pour leur générosité avec laquelle il m'ont
fait bénéficier de leur expérience*

*Je remercie mes amis RABIA.Bilal et DJOUDI.Amine pour leur aide
Je remercie aussi toutes les personnes ayant participé à
l'aboutissement de ce travail*

Brahim

A

Ma mère

&

La mémoire de mon père

Table des matieres

Résume.....	I
Liste des figures.....	II
Liste des tableaux.....	III
Nomenclature.....	IV
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Revue bibliographique.....	1
I-1) Introduction :	3
I-2) Phénomène de la cristallisation :	3
I-2-1) Le cristal :	3
I-2-2) Structure cristalline :	4
I-2-3) La solidification :	4
I-2-4) La température de la solidification :	5
I-2-5) Chaleur latente :	5
I-2-6) Les étapes de la solidification :	5
I-2-6-1) La germination :	6
a. L'importance de la germination :	6
b. Les types de la germination :	6
I-2-6-2) La croissance :	7
I-3) Principale méthodes de la croissance cristalline :	7
I-3-1) croissance cristalline à partir d'une solution :	7
I-3-2) croissance cristalline par l'état solide :	7
I-3-3) Croissance cristalline à partir de la phase vapeur :	8
I-3-4) Croissance cristalline à partir de la phase liquide :	8
I-3-4-1) Croissance sans creuset :	8
a. Méthode de Verneuil :	8
b. Méthode de la zone fondue flottante :	9
I-3-4-2) Croissance dans un creuset :	10
a. Méthode de Bridgman :	11
b. Méthode de l'échangeur de chaleur HEM :	12
I-3-4-3) Méthode de tirage :	13
a. Méthode de tirage de Czochralski (CZ) :	13
b. Méthode de Kyropoulos :	14
c. La méthode de tirage sur piédestal :	15
I-4) Avantages, inconvénients et critères de choix de la technique de croissance cristalline :	15

I-5) Conclusion :	16
Chapitre II : Technique de la croissance Czochralski CZ	18
II-1) Problématique :	18
II-2) objectif :	18
II-3) Technique de la croissance Czochralski CZ :	18
II-3-1) Principe de la méthode CZ :	18
II-3-2) Description du four de croissance Czochralski :	19
II-3-3) paramètres de croissance :	21
a. Paramètres géométriques :	21
b. Paramètres de tirage :	22
II-4) conclusion :	24
Avantage :	24
Inconvénients :	24
Chapitre III : Conception et Dimensionnement	25
III-1) Introduction :	25
III -2) Présentation de la nouvelle solution :	25
III-2-1) Méthodologie utilisée :	25
III-2-2) Cahier des charges et des spectres de conception :	25
III-3) Éléments de conception :	25
III-3-1) système de transmission de la vis (tige fileté) :	25
Calcul dimensionnel de 1 ^{er} engrenage :	26
Calcul dimensionnel de 2eme engrenage :	28
III-3-2) la vis (tige fileté) :	30
Calcul dimensionnel de la tige fileté :	30
III-3-3) Système de transmission de la tige de rotation :	31
Calcul dimensionnel d'engrenage :	31
III-3-4) La tige de rotation :	34
Calcul dimensionnel de la tige de rotation :	34
III-3-5) La table mobile :	36
Calcul dimensionnel de la table mobile :	36
III-3-6) Les axe de guidage :	38
III-3-7) La table fixe :	39
III-3-8) La basse :	40

III-3-8) support table :.....	40
III-3-8) résistance électrique du creuset :.....	41
III-4) Critères de choix des roulements :	41
Critères de choix.....	41
Support roulement :	42
III-5) Conclusion :	43
Chapitre IV : Modélisation et Simulation Numérique	44
IV-1) Introduction :	44
IV-2) Modélisation numérique :	44
IV-2-1) Analyse des résultat d’essai de torsion de la tige filetée :	44
IV-2-2) Analyse des résultat d’essai de traction de la tige de rotation :	47
IV-2-3) Analyse des résultat d’essai de torsion de la tige de rotation :.....	48
IV-2-4) Analyse des résultats de la table mobile :	51
IV-3) dévoilement de système finale :.....	53
IV-4) Conclusion :.....	55
Conclusion générale	56
Bibliographies	58

Résume

Nous avons procédé durant notre travail l'étude et la conception concernant le système de tirage de la croissance cristalline de type Czochralski, qui est passée tout d'abord par la compréhension du phénomène de la cristallisation qui est à la base de la croissance cristalline. Deuxièmement la compréhension du principe fondamental de fonctionnement de la technique de tirage Czochralski. Troisièmement, on a passé au dimensionnement de toutes les composantes de notre conception proposée tout en respectant les critères de conception en tenant compte de toutes les contraintes extérieures pour concevoir un montage de façon à ce qu'il soit fiable et résistant. Quatrièmement et dernièrement nous avons simulé les pièces qui composent notre mécanisme de tirage de la croissance cristalline Czochralski, (la tige filetée, la tige de rotation, et la table mobile), ainsi l'animation pour voir le fonctionnement de notre système. Ceci a été fait en utilisant le logiciel de la CAO SolidWorks 2018, afin de déterminer si les pièces conçues pourront fonctionner correctement pour assurer au final la fiabilité de la conception technologique proposée.

ملخص

أثناء عملنا، درسنا وصممنا نظام سحب نمو البلورات من نوع Czochralski، والذي مر أولاً بفهم ظاهرة التبلور والتي هي أساس نمو البلورات. ثانيًا، فهم المبدأ الأساسي لكيفية عمل تقنية سحب Czochralski. ثالثًا، شرعنا في تحديد حجم جميع مكونات تصميمنا المقترح مع احترام معايير التصميم مع مراعاة جميع القيود الخارجية لتصميم التجميع بحيث يكون موثوقًا ومقاومًا.. رابعًا وأخيرًا قمنا بمحاكاة الأجزاء التي تشكل آلية سحب النمو البلوري Czochralski (القضيب الملولب، والقضيب الدوار، والطاولة المتحركة)، بالإضافة إلى فيديو لمعرفة كيفية عمل نظامنا. تم إجراء ذلك باستخدام برنامج SolidWorks 2018 CAD لتحديد ما إذا كانت الأجزاء المصممة ستكون قادرة على الأداء الجيد لضمان موثوقية التصميم التكنولوجي المقترح في النهاية.

Abstract

During our work, we studied and designed the Czochralski-type crystal growth pulling system, which first went through understanding the phenomenon of crystallization which is the basis of crystal growth. Second, an understanding of the fundamental principle of how the Czochralski pulling technique works. Third, we proceeded to sizing all the components of our proposed design while respecting the design criteria taking into account all the external constraints to design an assembly so that it is reliable and resistant. Fourth and last we simulated the parts that make up our Czochralski crystal growth pulling mechanism, (the threaded rod, the rotating rod, and the moving table), as well as the animation to see how our system works. This was done using SolidWorks 2018 CAD software to determine if the designed parts will be able to perform well to ultimately ensure the reliability of the proposed technological design.

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I-1 : les différents états de la matière

Figure I-1 : Schéma du dispositif de Verneuil

Figure I-2 : Schéma de principe de la méthode de la Zone Flottante (FZ)

Figure I-4 : Schéma de principe de la méthode Bridgman verticale (VB)

Figure I-5 : Schéma de principe de la méthode Bridgman horizontale (HB)

Figure I-6 : Schéma du four de croissance HEM

Figure I-7 : schéma de la croissance cristalline par la méthode de Kyropoulos

Chapitre II :

Figure II -1 : Cristallisation d'un lingot Cz. A : mise en contact du germe, B et C : tirage du corps du lingot – Source : archives-ouvertes.fr

Figure II -2 : Schéma du montage Czochralski (à gauche) et photo de la cuve et du dispositif de pilotage (à droite)

Figure II -3 : Profile géométrique type d'un cristal issu de tirage Czochralski

Figure II -4 : influence de la vitesse de cristallisation et de rotation (RPM) sur le taux de ségrégation d'antimoine dans les cristaux de germanium

Figure II -5 : Représentation schématique des courantes de convection force et naturel lors d'un croissance Czochralski dans le cas d'une vitesse de rotation a trop lente, b optimale, c trop rapide

Chapitre III :

Figure III-1 : mise en plan de pignon moteur1

Figure III-2 : mise en plan de transmission 1

Figure III-3 : mise en plan de pignon de transmission de la vis

Figure III-4 : mise en plan de la tige filetée

Figure III-5 : mise en plan de pignon moteur2

Figure III-6 : mise en plan de pignon de la tige de rotation

Figure III-7 : mise en plan de la tige de rotation

Figure III-8 : mise en plan de la table mobile

Figure III-9 : mise en plant d'axe de guidage

Figure III-10 : mise en plant de la table fixe

Figure III-11 : mise en plant de la basse

Figure III-12 : mise en plant de la basse

Figure III-13 : mise en plant de la résistance électrique

Figure III-14 : mise en plant de roulement

Figure III-15 : mise en plant support roulement

Chapitre IV :

Figure IV-1 : Champ du module de déplacements de la tige filetée

Figure IV-2 : Champ de déformation de la tige filetée

Figure IV-3 : Répartition des contraintes de Von Mises de la tige filetée

Figure IV-4 : Champ du module de déplacements de la tige de rotation (en traction)

Figure IV-5 : Champ de déformation de la tige de rotation (en traction)

Figure IV-7 : Champ du module de déplacements de la tige de rotation (en torsion)

Figure IV-8 : Champ de déformation de la tige de rotation (en torsion)

Figure IV-9 : Répartition des contraintes de Von Mises de la tige de rotation (en torsion)

Figure IV-10 : Champ du module de déplacements de la table mobile

Figure IV-11 : Champ de déformation de la table mobile

Figure IV-12 : Répartition des contraintes de Von Mises de la table mobile

Figure IV-12 : Répartition des contraintes de Von Mises de la table mobile

Figure IV-13 : photo de l'assemblage de système final en SolidWorks 2018

Figure IV-14 : Mise en plan de système final

Figure IV-15 : Capteur d'écrans de la vidéo de fonctionnement de système final

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau I.1: Classification des techniques de cristallisation

Chapitre III :

Tableau III-1 : Caractéristique du moteur1

Tableau III-2 : Caractéristique du moteur2

Nomenclature

r : le rapport de transmission entre le pignon de sortie et pignon d'entrée ($r < 1$).

N_s : La vitesse de pignon de sortie [**tr/min**].

N_e : La vitesse de pignon d'entrée [**tr/min**].

D_e : Diamètre de pignon d'entrée [**mm**].

D_s : Diamètre de pignon de sortie [**mm**].

C_e : Couple de l'arbre de l'entre [**N.m**].

C_s : Couple de l'arbre de sortie [**N.m**].

Z_e : Nombre de dents pignon d'entrée.

Z_s : Nombre de dents pignon de sortie.

\mathcal{P} : la puissance mécanique fournit par le moteur [**watt**].

ω : La vitesse angulaire [**rad/s**].

M_T : Moment de torsion [**N.m**].

P : le pas entre les dents de pignon.

τ_{max} : Contrainte maximale tangentielle [**N/mm²**].

I_0 : Moment quadratique polaire de la section S [**mm⁴**]

S : La section de la matière [**m²**]

R : le rayon de la tige [**mm**]

R_{pg} : Résistance pratique au glissement [**Mpa**].

R_{eg} : Résistance élastique au glissement [**Mpa**].

R_e : limite élastique de matériau [**Mpa**].

R_m : limite plastique de matériau [**Mpa**].

s : coefficient de sécurité.

F_a : Effort extérieur de traction sollicitant la pièce [**N**].

F_f : Effort appliqué sur la table mobile [N].

A : Aire de la section de la pièce [mm²].

σ_{adm} : Contrainte admissible du matériau constituant la pièce [N/mm²].

σ_{max} : Contrainte réelle de traction en tout point de la section A [N/mm²].

ρ : La masse volumique de la matière [kg/ m³].

m : La masse de la matière [kg].

V : Le volume de la matière [m³].

L : La longueur de la matière [m].

M_f : Moment de flexion [N.mm].

Z : Module d'inertie [mm⁴].

h : l'épaisseur de la table mobile [mm].

ΔH_t : enthalpie de la transformation de l'état liquide à l'état solide.

ΔS_t : entropie de la transformation de l'état liquide à l'état solide.

t : désigne l'état de phase pour la transformation.

T : température en Kelvin [K].

T_f : température de fusion en Kelvin [K].

G_l, G_s : énergies libres de Gibbs du liquide et du solide respectivement.

$\vartheta_{translation}$: La vitesse de translation ou de tirage du cristal [mm/heurs].

ρ_{solid} : La densité de la phase solide [kg/ m³].

ρ_{liquid} : La densité de la phase liquide [kg/ m³].

$\varnothing_{cristal}$: Le diamètre du cristal [mm].

$\varnothing_{creuset}$: Le diamètre du creuset [mm].

Introduction générale

Introduction générale

Le vingtième siècle a connu la naissance et le développement de plusieurs nouvelles disciplines en physique : la relativité, la physique quantique...et la croissance cristalline. Le processus de ce dernier est simple et s'inspire sur la nature, il consiste à mettre un germe de matériau dans une solution ; un solide à la même structure que le germe sera alors obtenu. Bien que cette manière de faire soit simple, les premiers cristaux obtenus étaient, jusqu'aux années cinquante petits et imparfaits parce qu'ils contenaient des impuretés indésirables et surtout des defaults dans le réseau cristallin.

Les études sur la croissance des cristaux ont pris une place significative dans la science des matériaux contemporaine avec la découverte du transistor en 1948 et l'émergence d'une technologie révolutionnaire d'électronique à l'état solide (qui dépend directement de la technologie des monocristaux). Dès lors, les techniques de croissance cristalline ont été développées afin de subvenir aux besoins de la recherche fondamentale et de la recherche appliquée.

En Asie et aux USA, la croissance cristalline s'est largement développée à partir des applications militaires, mais également civiles et spatiales. Dans le domaine d'éclairage par exemple, la croissance de silicium, d'oxyde de zinc, de nitrure de galium et de saphir prend de plus en plus place avec le lancement de certains programmes sur ces matériaux.

En Algérie, le domaine de la croissance cristalline est peu connu, mais récemment, et à cause du développement technologique (surtout le domaine des énergies renouvelables) et la nécessité de fabriquer quelques matériaux à savoir le silicium, le zinc, le saphir,...etc., les centres de recherche comme le CDTA (Centre de Développement Technologique Avancé), le CRTSE (Centre de Recherche en Technologie des Semi-Conducteurs pour l'Energétique) et l'UROF (Unité de Recherche pour l'Optique et Phonétique) ont lancé des programmes pour étudier et pour développer le domaine de la croissance cristalline.

C'est par rapport à ce contexte que s'inscrit mon présent travail qui a comme objectif principal de proposer une conception technologique d'un système de tirage de la croissance cristalline au procédé CZOCHRALSKI. Cette étude m'a été proposée dans le cadre de projet de fin d'études par monsieur Merah Abdelkrim, enseignant – chercheur à l'université de Boumerdes.

Introduction générale

Proposer une conception technologique de système de tirage de la croissance cristalline de type CZOCHRALSKI passe d'abord par la compréhension de la technique de croissance cristalline CZOCHRALSKI, et les pièces et les organes principaux constituant le four de CZOCHRALSKI, et notamment la compréhension du principe fondamental de fonctionnement de son système de tirage. Ensuite, une solution pouvant remplacer le mécanisme de tirage actuel peut être proposée. Dans cette étape la conception du système global et des pièces élémentaires qui le composent est nécessaire. La proposition d'une nouvelle solution technologique passe par la suite par un travail de dimensionnement afin d'obtenir les différentes pièces composant l'assemblage final. En fin, un travail de modélisation numérique et animation numérique de la solution proposée est plus que nécessaire pour voir justement prononcer de la fiabilité et le fonctionnement du système de tirage proposé.

Dans ce mémoire, en outre de l'introduction et de la conclusion générale, quatre grands chapitres décrivent l'essentiel des travaux réalisés dans le cadre de cette étude.

Dans le premier chapitre, un état de l'art sur l'aspect physique-chimique de la cristallisation pour mieux comprendre ce phénomène qui est la base de la croissance cristalline et quelques méthodes de la croissance cristalline sont présentés avec les critères de choix de la technique de croissance cristalline.

Dans le deuxième chapitre, les principaux objectifs de ce travail, la technique de CZOCHRALSKI, la description du four, les paramètres de la croissance, à savoir, l'influence de la vitesse de rotation, ainsi que les avantages et les inconvénients de cette méthode de croissance cristalline (CZ) sont succinctement détaillés.

Dans le troisième chapitre, une solution de système de tirage est proposée. Un cahier de charge avec la méthodologie utilisée pour la conception et le dimensionnement de notre système est présenté. Ceci passe évidemment par un calcul de résistance des principales pièces qui la composent.

Enfin, le quatrième et le dernier chapitre est dédié à la modélisation numérique, la simulation et l'analyse par éléments finis, des pièces qui composent le mécanisme de tirage de la croissance cristalline CZOCHRALSKI, (la tige filetée, la tige de rotation, et la table mobile), ainsi l'animation pour voir le fonctionnement de notre système. Ceci a été fait en utilisant le logiciel de la CAO SolidWorks 2018, afin de déterminer si les pièces conçues pourront fonctionner correctement pour assurer au final la fiabilité de la conception technologique proposée.

Chapitre I : Revue bibliographique

I-1) Introduction :

La croissance cristalline des monocristaux est plus difficile à faire que des matériaux polycristallins, et l'effort supplémentaire n'est justifié que si les monocristaux ont des propriétés exceptionnelles. Leurs principaux mérites sont l'anisotropie, l'uniformité de la composition et l'absence de joints de grains inévitablement présents dans des matériaux polycristallins.

Dans ce chapitre, on va commencer par expliquer l'aspect physico-chimique de la cristallisation pour mieux comprendre ce phénomène qui est la base de la croissance cristalline, les étapes de la solidification, puis on va citer quelques méthodes de la croissance cristalline, et on termine par les critères de choix de la technique de croissance cristalline.

I-2) Phénomène de la cristallisation :

La cristallisation, au sens large, est le changement d'état qui donne lieu dans un solide, un liquide ou une vapeur, à la formation d'une phase solide cristallisée, c'est à dire à une organisation géométrique régulière. Dans la pratique industrielle, elle est considérée comme la formation de cristaux d'un ou plusieurs solutés, à partir de leur solution dans un liquide, le solvant. Les cristaux sont ensuite retirés de la solution restante, appelée eau-mère ou liqueur-mère, par des opérations de séparation solide-liquide, telles que la filtration et la centrifugation. Dans ce cas la Cristallisation, elle peut être envisagée approximativement comme l'inverse de la dissolution [1,2]

Pour qu'une cristallisation ait lieu, il est nécessaire de créer un état de sursaturation, autrement dit le principe récurant pour provoquer une cristallisation et de modifier l'état du système pour engendrer un déséquilibre thermodynamique provoquant l'apparition d'une sursaturation. De ce fait, le système va chercher à retourner à un nouvel état d'équilibre thermodynamique. A cet effet, il faut provoquer une cristallisation du liquide pour diminuer la concentration en soluté du produit et donc ramener la sursaturation absolue à une valeur nulle, C'est la naissance des cristaux ainsi que leur croissance qui consomment la sursaturation. [1,2].

I-2-1) Le cristal :

C'est un solide constitué d'une structure atomique ordonnée et répétitive dans les trois dimensions. Le fondement de cette définition remonte à 1784 lorsque le minéralogiste français René Just Haüy publie son « **Essai d'une théorie sur la structure des cristaux** ». De là est née la cristallographie ou l'étude des solides cristallins à l'échelle atomique [3].

I-2-2) Structure cristalline : (figure I-1)

Le solide cristallin se forme à partir d'un liquide à une symétrie (cubique, cubique à faces centrées, hexagonale, etc.) alors que le liquide isotrope est invariant par translation [4].

La matière condensée peut prendre deux états solides différents, suivant les conditions dans lesquelles elle s'est formée : un état cristallisé par un arrangement périodique des atomes et aléatoire [5], ou un état cristallisé caractérisé par un arrangement périodique des atomes [6].

Les solides amorphes sont généralement appelés verres et considérés comme des liquides de très haute viscosité. Les solides cristallins peuvent former des monocristaux, si la périodicité est ininterrompue dans tout le volume, ou des poly-cristaux, s'il existe une périodicité locale et que le solide est composé d'un ensemble de grains cristallins de tailles à peu près uniformes [7].

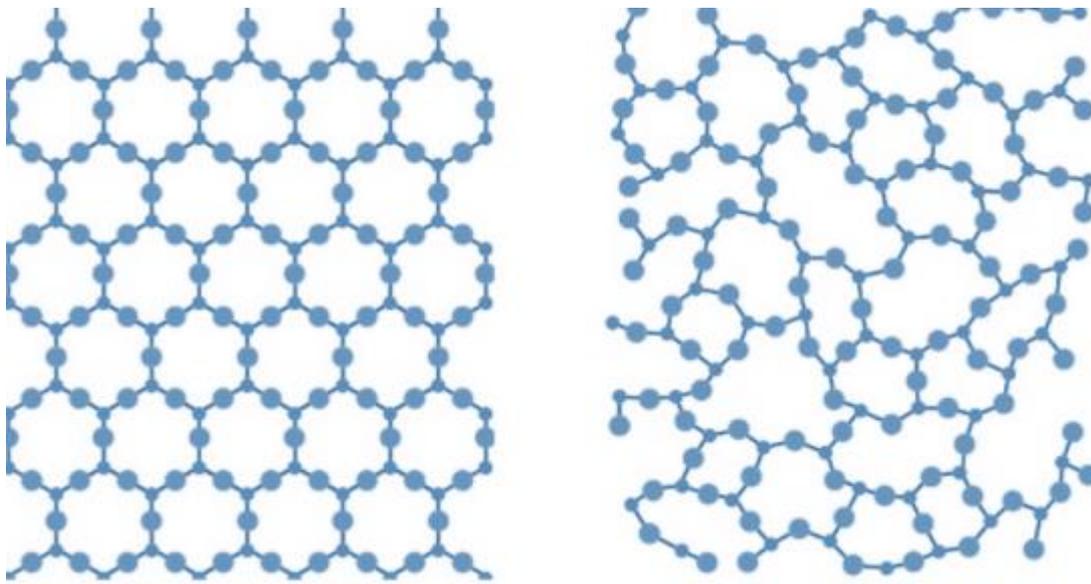


Figure I-1 : Les différents états de la matière [7]

I-2-3) La solidification :

La solidification est l'opération au cours de laquelle un liquide passe à l'état solide. Cela peut être fait par refroidissement (cas le plus courant), ou par augmentation de la pression, ou bien par combinaison des deux. À pression constante, la solidification des corps purs se fait à température constante, elle est omniprésente au carrefour d'un grand nombre de domaines des disciplines scientifiques, tels que la science des matériaux, la mécanique des fluides et les phénomènes de transferts, la mécanique du solide, la physico-chimie [8]. Il y a de très nombreuses applications industrielles de la solidification : coulée continue d'acier, croissance des fibres pour l'électronique et l'optoélectronique, etc.

I-2-4) La température de la solidification :

Une des particularités intéressantes de la transformation liquide vers solide est que, pour un matériau pur, elle a lieu à une température unique qui est une caractéristique importante propre à ces matériaux particuliers et nommée température de la solidification (elle est une fonction à la fois du liquide et solide) [8], la température de solidification d'un matériau pur à pression constante est invariable. A cette température, le liquide est plus désordonné que le solide et possède ainsi une entropie plus élevée que celle du solide ordonné. Il y a aussi un dégagement de chaleur lorsque le matériau passe de la phase liquide à la phase solide [9].

Ce dégagement de chaleur est appelé chaleur latente de fusion et est noté L ; à l'équilibre thermodynamique liquide-solide, on a :

$$\Delta G_t = \Delta H_t - T \Delta S_t = 0$$

Où :

t : désigne l'état de phase.

T : température en Kelvin.

I-2-5) Chaleur latente :

Une relation intéressante entre la chaleur latente et la température de la solidification peut être établie en appliquant les principes de la thermodynamique.

La température de solidification est définie comme étant la température à laquelle les énergies libres des deux phases sont égales [10]. Cela implique donc qu'à la température de solidification, le solide et le liquide ont la même énergie disponible pour effectuer un travail externe. L'équilibre entre les phases solides et liquide peut être exprimé de la façon suivante :

$$G_l = G_s$$

I-2-6) Les étapes de la solidification :

La solidification se fait en général par précipitation : il a formation de germes de phase solide au sein du liquide, ce que l'on appelle la germination, puis une croissance de ces germes avec diverses méthodes de croissance. Il y a donc deux étapes pour fabriquer les cristaux pendant la transition liquide-solide [8] :

- La germination.

- La croissance des germes.

I-2-6-1) La germination :

Pour la compréhension du phénomène de solidification, l'étude de la germination est un élément essentiel pour comprendre cette opération [10]. La germination peut être définie comme la formation d'une nouvelle phase dans une région distincte.

Dans le cas de solidification, la germination implique la formation d'une petite particule de solide entourée de liquide [8]. La nucléation c'est la première étape de solidification, il s'agit de l'apparition des germes solides autour desquels commence le changement d'état, on dit que la solidification se produit lorsque la goutte atteint une température inférieure à la température de solidification qui correspond à la formation d'un nucleus stable.

a. L'importance de la germination :

Puisque la structure finale du matériau solidifié dépend de la germination, elle a donc une grande importance et une influence sur la microstructure finale des cristaux ou du monocristal tiré. En effet, le nombre de germe qui se forment et grossissent détermine la taille finale des grains [10].

b. Les types de la germination :

Il existe deux types de germination :

- La germination homogène.
- La germination hétérogène.

Dans le cas où la germination est homogène, les germes se forment au sein de la phase liquide. Alors que, dans le cas de la germination hétérogène, ils se créent au contact de la paroi froide de la lingotière ou de particules étrangères baignant dans le liquide.

Si un matériau doit se solidifier à partir d'une substance étrangère, que ce soit le moule ou les impuretés insolubles, il est indispensable que la surface de cette substance, soit mouillée par le matériau liquide [8]. Une fois cette condition satisfaite, il faut encore que le liquide se solidifie facilement au contact de substance. Pour cette raison, l'angle de contact entre la substance et le matériau qui se solidifie est un concept théorique important en germination.

Lorsque l'angle de contact est petit, l'interface et la substance a une faible énergie de surface [10].

I-2-6-2) La croissance :

Dans un milieu sursaturé un cristal va grandir en adsorbant une partie de la sursaturation pour permettre un équilibre thermodynamique entre la phase liquide et solide, l'adsorption du produit par le cristal est appelé croissance, étant donné que les dimensions ainsi que la masse du cristal vont croître.

Dans le cadre de la cristallisation, nous parlons d'adsorption et non pas d'absorption car comme le montre la définition suivante, nous sommes effectivement dans le cadre de l'adsorption. [2].

I-3) Principales méthodes de la croissance cristalline :**I-3-1) croissance cristalline à partir d'une solution :**

Des cristaux peuvent croître à partir d'une solution à condition que celle-ci soit sursaturée, c'est-à-dire qu'elle contient plus de soluté qu'elle ne peut en contenir lorsqu'elle est en équilibre avec le solide. Trois techniques principales pour obtenir cette sursaturation requise :

- Le refroidissement lent de la solution (dite la méthode de croissance en flux).
- L'évaporation lente du solvant.
- L'établissement d'un gradient de température entre une zone chaude contenant un excès de solide non-dissous, et une zone plus froide dans laquelle croît le cristal.

L'avantage essentiel d'un tel processus de croissance est le contrôle qu'il permet sur température de croissance, donc sur la sursaturation. Ainsi rent-il possible la croissance de cristaux qui présentent une fusion non-congruente ou des variétés allotropiques de basse température.

I-3-2) croissance cristalline par l'état solide :

L'obtention de cristaux à partir de l'état solide ou recristallisation, consiste en la transformation, à l'état solide, d'un échantillon poly-cristallin à grain fins en un échantillon constitué d'un seul, ou au plus de quelques grands cristaux à des températures proches de la température de fusion. Pour cela, un des grains doit être consommé et un nouveau grain doit être formé par nucléation adéquate et grossir au détriment des autres.

L'accomplissement de ce type de transformation est généralement le résultat d'un traitement thermique ou /et d'une déformation plastique, suivi d'un recuit. La recristallisation est utilisée surtout pour les métaux, mais elle a aussi été appliquée pour NaCl, Al₂O₃ ou encore les carbures de Ti, Hf, Zn, Nb, V et Ta.

I-3-3) Croissance cristalline à partir de la phase vapeur :

On peut distinguer deux types de processus en phase vapeur. Le premier met en jeu le transport direct de la matière par évaporation ou sublimation depuis une zone chaude vers une zone froide de croissance : c'est le transport physique ou PVT (Physical Vapor Transport).

Cette méthode est couramment utilisée pour la croissance de composés (Zns, Cds) sous vide ou sous débit gazeux. Dans le deuxième type le matériau, transporté sous forme de composé chimique (souvent un halogénure), se compose dans une zone de croissance pour redonner le solide de départ, on parle de transport chimique ou CVT (Chimical Vapor Transport).

Dans les deux cas, la croissance peut être soit auto nucléée, soit avoir lieu par épitaxie, sur le germe du même matériau que celui à croître ou un autre matériau de paramètres cristallins proches [11].

I-3-4) Croissance cristalline à partir de la phase liquide :

Si une substance a un point de fusion précis comme dans le cas des substances élémentaires pures et des composés présentant une fusion congruente, la cristallisation peut être réalisée en procédant à la fusion du solide poly-cristallin, puis à un abaissement graduel de la température du liquide en dessous de la température de fusion .ce type de processus conduit généralement à une masse poly-cristalline cependant, en prenant des précaution particulières, la croissance d'un monocristal peut être favorisée. Les méthodes mettant en jeu ce type de processus peuvent être classées en trois groupes selon que la fusion et la solidification ont lieu ou non dans un creuset.la technique HEM faisant partie de cette famille.

I-3-4-1) Croissance sans creuset :

Il existe deux méthodes qui font appel à aucun moment du processus de fusion solidification à un creuset.

a. Méthode de Verneuil :

La méthode de Verneuil est une technique utilisée depuis plus d'un demi-siècle (1902) pour le besoin de bijouterie et horlogerie. Elle est usée pour des matériaux ayant des hauts points de fusion. C'est un procédé de fusion à flamme. Elle est restée pratiquement inchangée jusqu'à ce jour.

Le procédé consiste en un réservoir de poudre du matériau à cristalliser avec un mécanisme de d'alimentation de ce dernier, deux sources H₂ et O₂ un moufle réfractaire et un dispositif de déplacement du cristal.

Dans un premier temps la poudre de matériau cristallisé fond à l'aide d'une flamme d'un chalumeau oxyhydrique (H_2 et O_2). Après la fusion la poudre fondue tombe sur un germe cristallin qui grandit continuellement comme une stalagmite et fait ainsi naître un cristal.

Cette technique est utilisée dans l'industrie des solides et des lasers solides et lasers à rubis et pour la production du saphir.

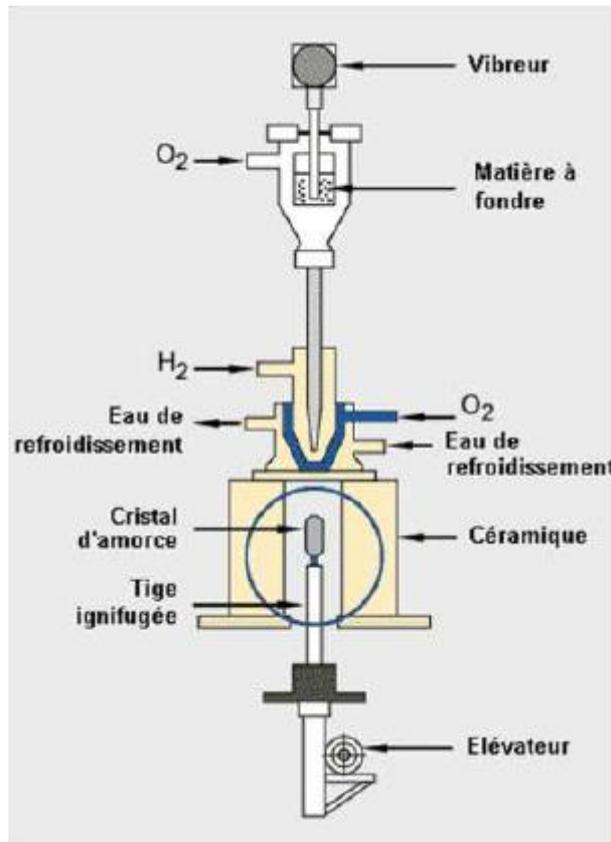


Figure I-2 : Schéma du dispositif de Verneuil

[11]

b. Méthode de la zone fondue flottante :

Dans la méthode de la zone flottante (1953), un barreau poly-cristallin est chauffé localement, créant ainsi une zone fondue maintenue entre les deux parties solides par les forces de tension superficielles [11].

La croissance débute par la fusion locale d'un germe monocristallin. L'élément chauffant, le plus souvent un inducteur électromagnétique, est fixe alors que le poly-cristal et les germes sont déplacés vers le bas tout en assurant la fusion locale du matériau (Figure I-3).

Le Diamètre du cristal en train de croître peut-être modifier en diminuant ou en augmentant la vitesse et les dimensions de la zone fondue.

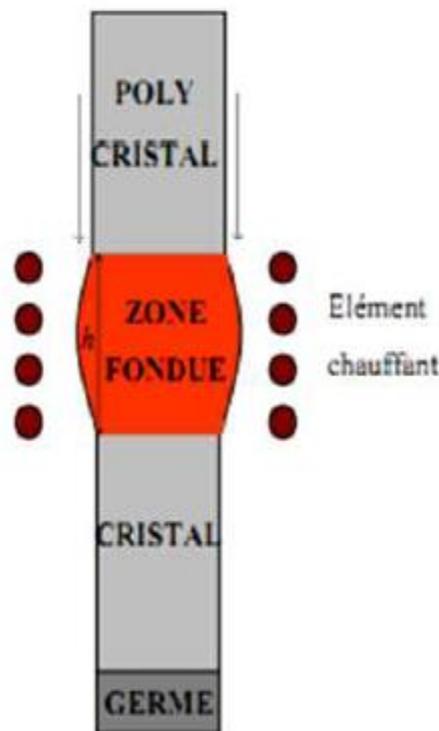


Figure I-3 : Schéma de principe de la méthode de la Zone Flottante (FZ) [12]

L'avantage majeur de ce procédé est l'absence de contact du liquide et du solide avec un creuset, ce qui évite la contamination. Le contrôle de la composition chimique du liquide par l'ajout d'une source externe d'élément volatil est facilité par le rapport surface/volume important de la méthode.

Cette méthode présente un inconvénient majeur de par la limitation du diamètre des échantillons. En effet, la tension superficielle est à l'origine des forces capillaires qui maintiennent la cohésion de la zone fondue. L'énergie correspondante varie comme la surface du liquide. Les forces antagonistes de gravité varient avec le volume. Si le volume de la zone liquide est trop important, les forces de tension superficielle ne peuvent plus la contenir et elle coule. Par contre en micropesanteur où les forces capillaires dominent, un cristal de 20 mm d'a été obtenu. Un autre inconvénient est l'existence de la convection Marangoni, résultant du gradient de tension interraciale sur les surfaces libres, et son influence sur les profils de concentration [12].

I-3-4-2) Croissance dans un creuset :

La plupart des méthodes actuelles de fusion-solidification dans un creuset se base sur la technique de Bridgman (1925).

a. Méthode de Bridgman :

Cette technique repose sur le déplacement d'un creuset dans un four à gradient de température et de Stobert (1925) dont la méthode inversement, consiste à un déplacement du gradient de température le long d'un creuset fixe.

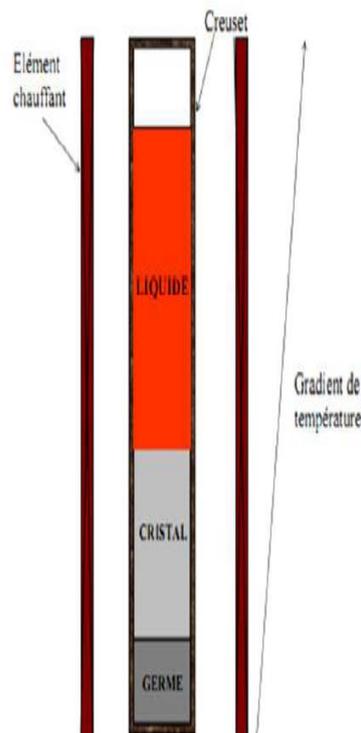


Figure I-4 : Schéma de principe de la méthode Bridgman verticale (VB) [12]

La spécificité de la méthode Bridgman est l'emploi d'un creuset qui contient la charge Poly-cristalline et un germe monocristallin. Cette charge poly-cristalline est fondue ainsi qu'une partie du germe, puis le creuset est déplacé dans un gradient de température à une vitesse contrôlée. La solidification s'opère ainsi à partir du germe orienté. On distingue la méthode Bridgman verticale (VB) de la méthode Bridgman horizontale (HB).

Il existe plusieurs variantes de la méthode Bridgman : quand le creuset est fixe, un simple refroidissement du four permet la solidification. On parle de méthode Vertical Gradient Freeze (VGF) ou Horizontal Gradient Freeze (HGF). On distingue parmi les méthodes VB et VGF le procédé « Stockbarger » ou « trois zones » (une zone chaude et une zone froide séparées par une zone à gradient de température constant), le procédé « multi-zones » (le gradient est

ajustable, et le profil de température n'est pas forcément linéaire) et le procédé « résistor unique » (le gradient est fixé).

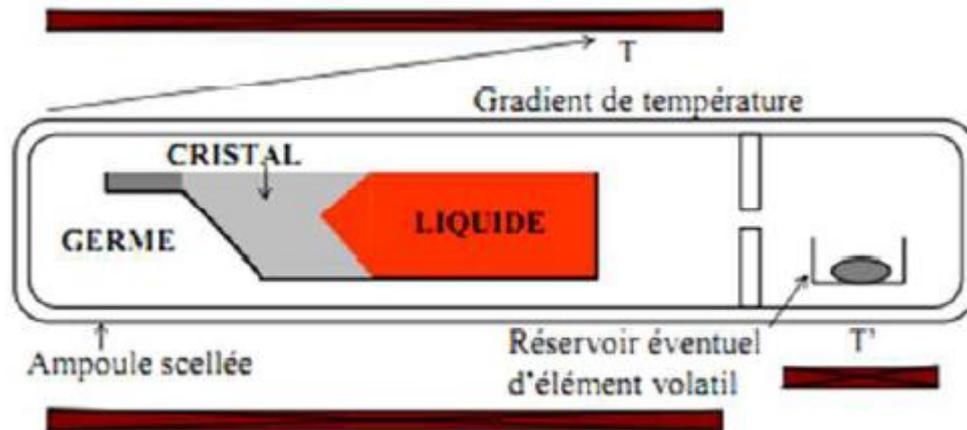


Figure I-5 : Schéma de principe de la méthode Bridgman horizontale (HB) [12]

Le contrôle de la composition du bain peut s'effectuer également en disposant dans l'enceinte un réservoir d'élément volatil dont la température est contrôlée.

La méthode Bridgman présente plusieurs avantages dont le principal est le contrôle du Gradient de température indépendamment de la vitesse de solidification. Les valeurs du gradient de température imposées peuvent être faibles et sont plus souvent inférieures à $10^{\circ}\text{C}/\text{cm}$. Le creuset permet de contrôler facilement les dimensions et la forme du cristal.

L'inconvénient majeur du procédé Bridgman est l'emploi d'un creuset qui constitue une source de pollution et produit des nucléations parasites, des contraintes thermiques dans les cristaux et des contraintes de dilatation différentielle. Malgré tout, grâce aux faibles gradients de température mis en œuvre, c'est la méthode utilisée pour la production des cristaux de la famille II-VI [12].

b. Méthode de l'échangeur de chaleur HEM :

La méthode d'échange de chaleur (Technique Schmid-Viechnicki). Développé 1967 par Schmid (US Army) [13].

De nombreuses modifications ont été apportées à la technique de Bridgman en cherchant notamment à conserver le creuset fixe. Ainsi s'est développée la méthode de l'échangeur thermique (HEM) qui associe la présence d'un germe, placé au fond, avec un échangeur de chaleur qui permet d'extraire à la partie inférieure du lingot, la chaleur de solidification. Les

premiers travaux ont porté sur le saphir pur et dope et ont abouti à la production de monocristaux de 70mm de diamètre et de 10mm d'épaisseur. [14]

Le procédé HEM est un processus simple de solidification directionnelle pour la production des lingots monocristallins. La forme de l'interface bain-cristal est convexe, ce qui permet le rassemblement des impuretés sur les côtes du cristal. Le contrôle précis de l'interface dans la technique HEM donne des vitesses de croissance élevées sous faible gradients de température, ce qui réduit les tensions de solidification, et par conséquent minimise la formation des défauts.

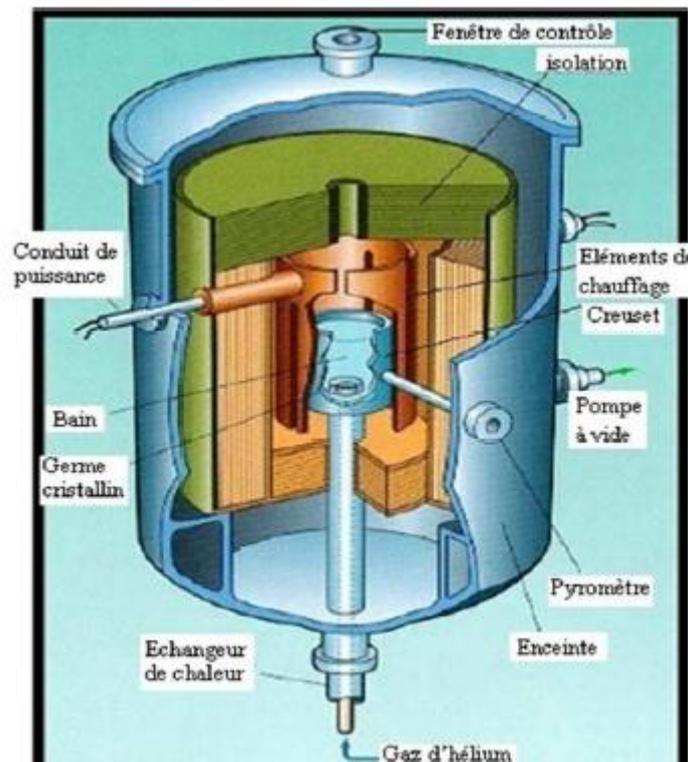


Figure I-6 : Schéma du four de croissance HEM [13]

I-3-4-3) Méthode de tirage :

Le tirage des cristaux à partir de leurs bains fondus est une méthode de croissance courante, en particulier grâce à la rapidité avec laquelle on peut obtenir de gros cristaux, de bonne qualité, on cite les méthodes les plus connues.

a. Méthode de tirage de Czochralski (CZ) :

Cette méthode est une méthode de croissance avec creuset et c'est l'objet de ce mémoire elle sera détaillé plus tard (en chapitre II).

b. Méthode de Kyropoulos :

Une autre méthode de la croissance cristalline à partir du bain fondu est la méthode de Kyropoulos, cette méthode s'apparente à la méthode de Czochralski sur le principe (croissance du cristal à partir de sa phase liquide sur un germe orienté placé dans un gradient thermique). Toutefois, la cristallisation est réalisée sans translation, ni rotation du germe mis en contact avec le bain liquide, mais par un simple abaissement de la température.

La croissance se réalise dans le liquide et l'interface solide-liquide est moins sensible à l'évaporation des éléments légers. Du fait qu'il n'y ait pas de rotation du germe, il n'y a pas de convection forcée et par conséquent l'apport de la matière se fait par convection naturelle.

L'apport de la matière est donc plus lent que pour la méthode de Czochralski. L'amorce de la croissance est réalisée par la méthode de Czochralski avec utilisation de la rotation et de la translation du germe. Une fois la partie d'affinage terminée, la rotation et la translation du germe est arrêtée. Ainsi, les seuls paramètres de croissance mis en jeu sont la rampe de la pente de refroidissement et les gradients thermiques. Le schéma de cette méthode est représenté là-dessous sur la figure suivante :

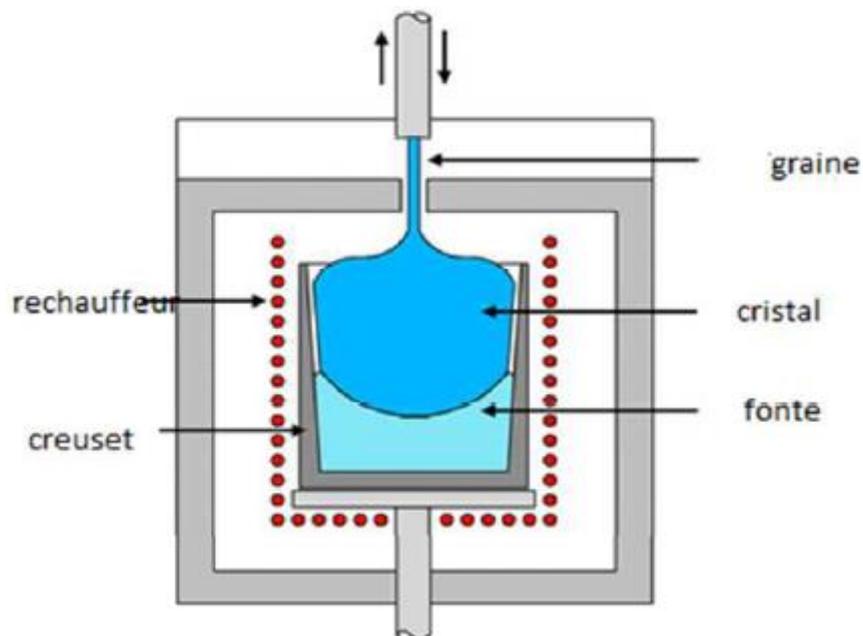


Figure I-7 : schéma de la croissance cristalline par la méthode de Kyropoulos [13]

c. La méthode de tirage sur piédestal :

La méthode de tirage sur piédestal est une autre variante qui dérive de la méthode de la zone flottante. Un bain fondu est formé sur le haut du barreau poly-cristallin et le germe est plongé dans ce bain ; la croissance a alors lieu comme lors de la technique Czochralski. Les vitesses de translation du germe et du barreau par rapport au chauffage (par faisceau d'électrons, laser...,) sont ajoutées pour avoir un rapport correct entre les sections du cristal et du barreau. [11]

I-4) Avantages, inconvénients et critères de choix de la technique de croissance cristalline :

Une des difficultés rencontrées lors de la préparation d'une expérience de croissance cristalline réside dans le choix de la technique la plus appropriée. Or ce choix s'effectue d'autant plus facilement si l'on connaît mieux les propriétés physiques, chimiques et thermodynamiques du matériau. La manière dont ces dernières déterminent la technique adaptée, ainsi que les limites auxquelles il faut s'attendre, est abordée sous forme de questions logiques successives. [11]

La classification des techniques de croissance, est représentée dans le tableau [1] indiquant les avantages et les inconvénients de chacune d'elles.

A partir de la connaissance des techniques existantes, il s'agit alors de sélectionner la plus appropriée à la croissance d'un matériau donné, en se basant sur ses propriétés physiques et chimiques. Les méthodes à privilégier, les méthodes possibles à exclure pour cela, nous avons considéré trois propriétés, essentielles dans le choix de la technique :

- La nature de fusion (congruente ou non congruente).
- La pression de la vapeur à la température de fusion (faible ou élevé).
- L'existence, à l'état solide, d'une transitions structurale (oui ou non).

Voir le tableau ci-dessous :

Tableau I.1: Classification des techniques de cristallisation

Technique de la croissance	Avantages	Inconvénients
Croissance à partir de l'état vapeur	-Appareillage simple -Possibilités de couches mince	-petite taille -qualité difficilement contrôlable -nécessité d'un support
croissance cristalline à partir de l'état fondu	-Vitesse de croissance -Possibilité de produire de gros cristaux -Eventuellement orienté suivant divers axes	-Solide a fusion congruente seulement -qualité dépendent de nombreux paramètre -nécessité d'un recuit dans certain cas -température élevé ($T \geq T_f$ à la température de fusion) - risque de contamination en présence du creuset
croissance cristalline à partir d'une solution	-Bonne qualité -Cristaux faible contrainte -Appareillage souvent simple -Température $< T_f$	-Possibilité de contamination par le milieu -Vitesse lente nécessité d'un contrôle rigoureux des gradients de température
Croissance en phase solide	-application possible aux alliages -appareillage très simple -contrôle de la forme	Intérêt essentiellement limité jusqu'à à présent à l'état métallique

I-5) Conclusion :

Dans ce chapitre nous a permis de mieux comprendre les phénomènes de la croissance cristalline, la solidification, et l'influence de la température de solidification au cours de la

transformation liquide vers solide est que, pour un matériau pur, les étapes de la solidification, et l'importance et l'influence de la germination sur la microstructure finale des cristaux ou du monocristal tiré. De même on a présente la croissance et les principales techniques de la croissance cristalline en basent sur les méthodes utilisées pour l'élaboration des cristaux a grand diamètre.

Chapitre II : Technique de la croissance Czochralski CZ

II-1) Problématique :

L'objet de notre travail est la contribution à l'étude et la conception du système de tirage de croissance cristalline de procédé de type Czochralski.

L'étude de la technologie du mécanisme et la possibilité de la modifier dans le cadre du projet de fin d'études est importante en raison de la place stratégique qu'occupe le mécanisme de tirage dans le four de croissance cristalline de type Czochralski.

II-2) objectif :

Pour mener à bien cette idée et arriver au bout de ce travail, les étapes suivantes sont suivies :

- Compréhension du principe de fonctionnement dans le système de tirage de croissance cristalline de Czochralski.
- Conception du système global et des pièces élémentaires qui composent le système de tirage proposé proposée.
- Dimensionnement (étude de résistance).
- Modélisation numérique de la modification proposée pour déterminer l'état de contraintes et de déformations au sein des pièces conclues.
- Animation su système de tirage proposé pour pourvoir justement prononcer son principe de fonctionnement.

II-3) Technique de la croissance Czochralski CZ :

II-3-1) Principe de la méthode CZ :

La méthode de tirage Czochralski (CZ) a été inventée par le chimiste polonais Jan Czochralski en 1916 qui réalisa la première expérience de tirage d'un fil d'étain monocristallin à partir d'un bain fondu [15] [16].

Cette technique consiste à obtenir une structure monocristalline en fondant du silicium poly-cristallin de haute pureté dans un creuset en quartz en rotation placé dans un four d'étrépage sous argon afin de garantir une atmosphère neutre pour éviter l'oxydation.

La cristallisation se fait par contact entre le silicium fondu et un germe, qui est une fraction d'un cristal préalablement obtenu. Lorsque la température se stabilise, le bain se solidifie sur le germe qui est plus froid et qui est en mouvement de rotation inverse (Figure II-1. A). Ensuite on extrait le cristal formé en tirant lentement ce germe vers le haut. Ainsi, on obtient un lingot

de cristaux ayant tous la même orientation cristalline et de diamètre contrôlé en modifiant la température ou la vitesse de tirage (Figure II-1. A, B et C).

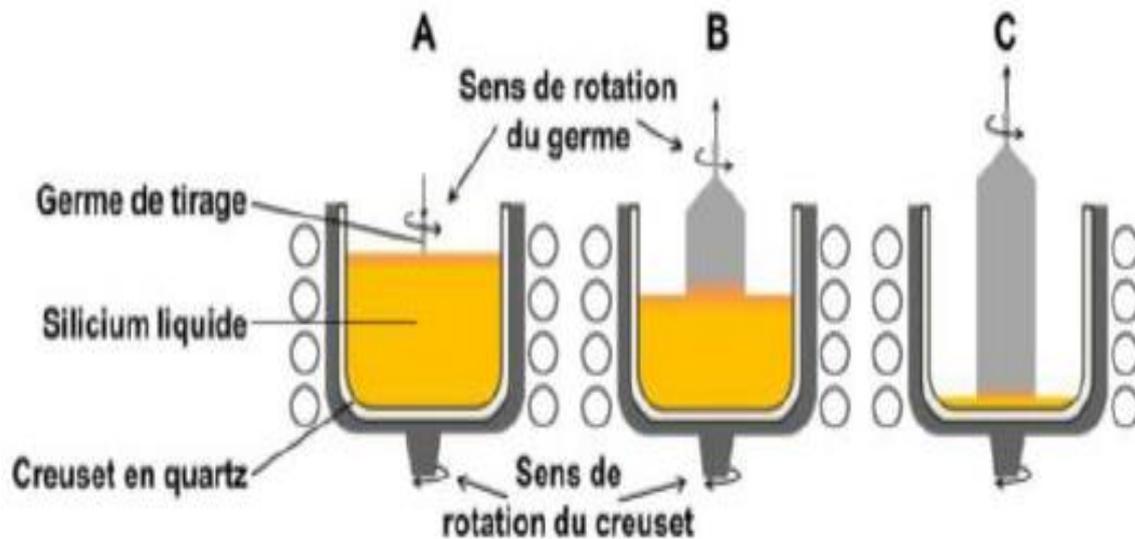


Figure II -1 : Cristallisation d'un lingot Cz. A : mise en contact du germe, B et C : tirage du corps du lingot – Source : archives-ouvertes.fr [17]

II-3-2) Description du four de croissance Czochralski :

Un schéma et une image du dispositif de croissance Czochralski est présenté en figure II-2. La croissance Czochralski consiste à placer un creuset en platine ou en iridium, contenant le composé à cristalliser, dans une bobine de spires en cuivre parcouru par un courant électrique. Le passage du courant électrique va induire par couplage magnétique un courant dans le creuset et le faire chauffer.

L'ensemble est placé dans un montage réfractaire (tube et cône en zircon, grain de zircon, laine d'alumine, etc....) pour isoler thermiquement le système de l'extérieur et contrôler les gradients thermiques dans le four.

Un germe, accroché au bout d'une tige en alumine, est ensuite amené à la surface du bain pour former une interface vapeur-liquide-solide. La tige en alumine est elle-même reliée à un moteur de rotation et à une balance. Une fois les conditions de l'équilibre tri-phasiques atteintes, un programme informatique se chargera du contrôle de la température et de la translation du germe pour obtenir le cristal aux dimensions voulues.

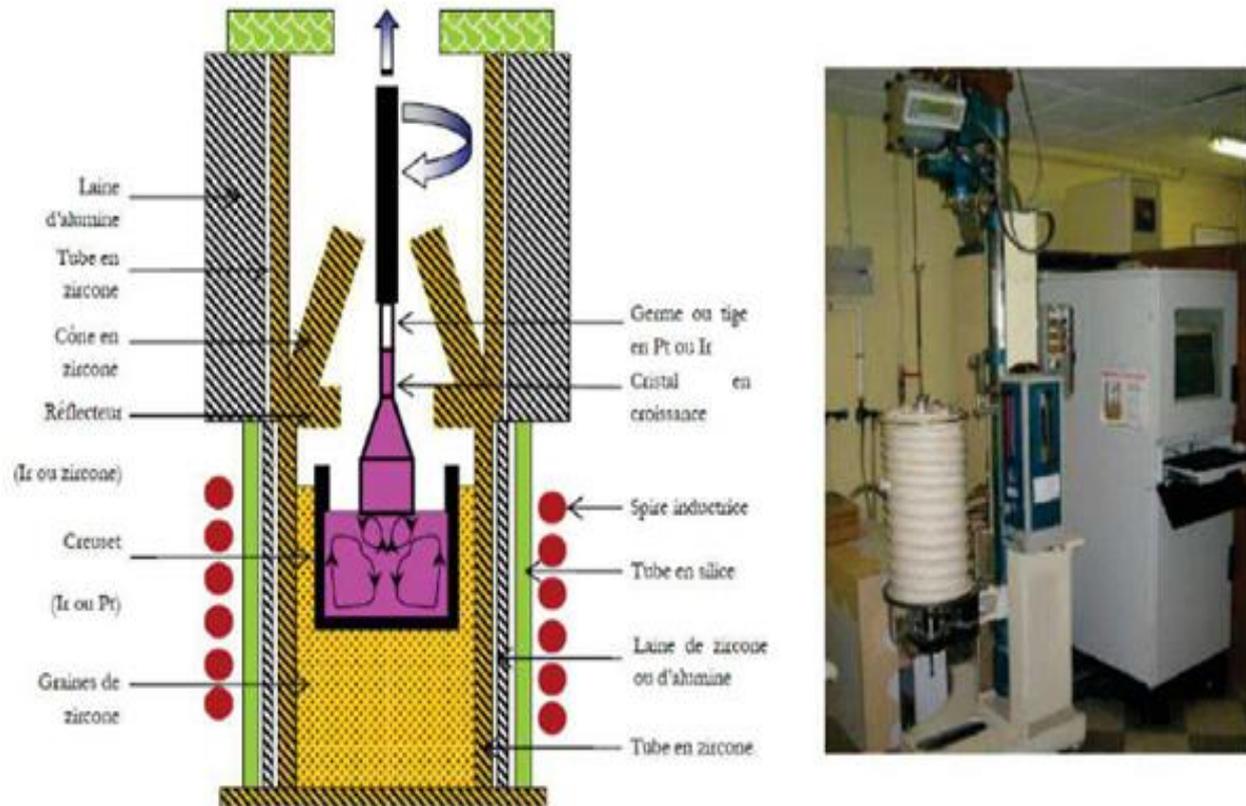


Figure II - 2 : Schéma du montage Czochralski (à gauche) et photo de la cuve et du dispositif de pilotage (à droite) [17]

En utilisant un germe orienté afin de favoriser la croissance dans une direction cristallographique particulière pour obtenir un cristal de bonne qualité. Le germe est en général un monocristal, mais il arrive qu'on ne dispose pas de monocristal du composé à cristalliser : dans ce cas, on utilisera alors une tige métallique de la même nature que le creuset.

Le choix de la nature du creuset est conditionné par les propriétés physico-chimiques du bain fondu, la température étant le paramètre déterminant. Bien que la température de fusion du platine est de 1768°C , les creusets en platine ne peuvent être utilisés que jusqu'à 1500°C (dans ce cas il est rhodié) sous air ou sous atmosphère d'azote. Pour les applications à plus haute température, on privilégiera les creusets en iridium, dont la température de fusion est de 2446°C . Mais l'inconvénient majeur de ces creusets est qu'on est obligé de travailler sous atmosphère d'azote ou d'argon pour éviter l'oxydation de l'iridium sous air à haute température. Parfois des creusets en or peuvent être requis lorsque le composé à cristalliser est trop corrosif vis - à - vis du platine ou de l'iridium [17], mais la température de fusion de l'or (1064°C) et ses propriétés mécaniques sont nettement inférieures à celles du platine ou de l'iridium.

II-3-3) paramètres de croissance :

Les paramètres de croissance peuvent être classés selon deux catégories : les paramètres géométriques et les paramètres de tirage.

a. Paramètres géométriques :

Les cristaux issus de la croissance Czochralski possèdent des formes géométriques très caractéristiques ; ils sont composés de quatre parties distinctes : l'affinage, la tête, le corps, le pied (figure II -3). L'affinage est la partie reliée directement au germe de croissance sur lequel début la croissance, il est de ce fait de même diamètre que le germe. Cette étape a pour but de favoriser la croissance du cristal issu du germe aux dépens de cristaux périphériques parasites qui peuvent se former lors de la germination, et d'avoir un monocristal orienté dans la direction voulue. La tête est l'étape de transition entre l'affinage et le corps afin d'avoir le diamètre $\varnothing_{\text{corps}}$ souhaité ; elle est défini par le demi-angle $\theta_{\text{tête}}$.

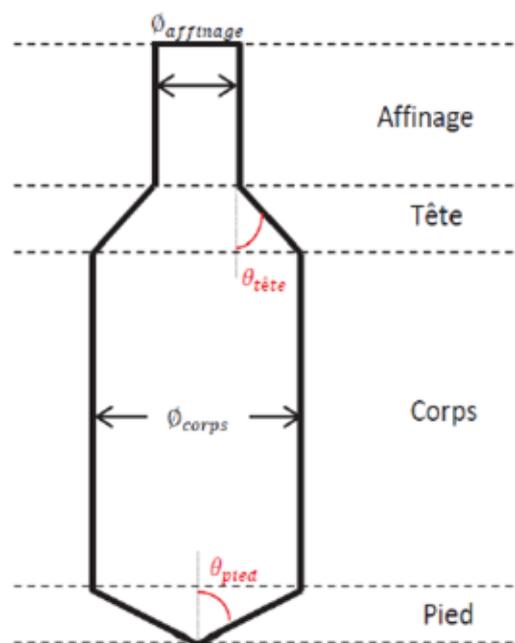


Figure II -3 : Profil géométrique type d'un cristal issu de tirage Czochralski

[18]

Ensuite le corps est la partie qui va être réellement exploitée pour y tailler des pièces : c'est la partie la plus massive du cristal. En fin de tirage, on réduit progressivement le diamètre pour minimiser les contraintes dans le cristal lors de sa sortie du bain. Cette partie est ce qu'on appelle le pied ; il est caractérisé par son demi-angle θ_{pied} . Tous ces paramètres ainsi que les densités liquide et solide du composé sont entrés dans le programme de croissance au préalable.

Le contrôle des paramètres géométriques du cristal se fait à travers la mesure de la masse apparente du cristal. Lorsque la prise de masse est supérieure à la valeur théorique, le programme de tirage augmente la puissance du générateur, et donc la température du bain, pour limiter une prise de masse trop importante et il diminue la puissance dans le cas contraire.

b. Paramètres de tirage :

La vitesse de cristallisation linéaire $\vartheta_{\text{cristallisation}}$ est donnée par la formule suivante (Eq II-1) :

$$\vartheta_{\text{cristallisation}} = \frac{\vartheta_{\text{translation}}}{\left[1 - \left(\frac{\rho_{\text{solid}}}{\rho_{\text{liquid}}} \times \left(\frac{\varnothing_{\text{cristal}}}{\varnothing_{\text{creuset}}}\right)^2\right)\right]} \quad (\text{Eq II-1})$$

Avec:

- $\vartheta_{\text{translation}}$: La vitesse de translation ou de tirage du cristal
- ρ_{solid} : La densité de la phase solide
- ρ_{liquid} : La densité de la phase liquide
- $\varnothing_{\text{cristal}}$: Le diamètre du cristal
- $\varnothing_{\text{creuset}}$: Le diamètre du creuset

La vitesse de cristallisation linéaire va dépendre de la nature du cristal à élaborer ainsi que du dopage souhaité. Pour un oxyde non dopé, elle est de l'ordre quelques mm/h. En cas de dopage, il est nécessaire de diminuer la vitesse de cristallisation afin de favoriser l'insertion du dopant et réduire les instabilités liées aux phénomènes locaux de ségrégation.

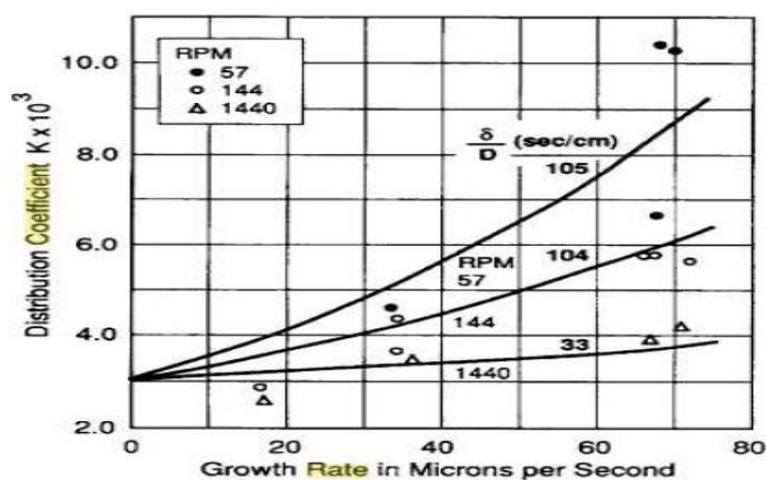


Figure II -4 : Influence de la vitesse de cristallisation et de rotation (RPM) sur le taux de ségrégation d'antimoine dans les cristaux de germanium [18]

La (figure II -4) montre l'effet de la vitesse de cristallisation et de rotation sur l'incorporation d'antimoine dans des cristaux de germanium [18].

Par ailleurs, la forme de l'interface solide-liquide dans le creuset est le résultat de l'opposition entre les courants de convection naturels résultant des gradients de température du four et les courants de convection forcés créés par la rotation du cristal à la surface du bain. On peut distinguer trois cas (Figure II -5) [19] :

- Dans le cas d'une rotation trop lente voire inexistante (Figure II -5-a), le liquide chaud remonte le long des parois du creuset et migre vers le centre où il se refroidit au contact du cristal. Etant plus dense, il redescend au fond du bain. Il remontera lorsqu'il sera de nouveau chaud. Dans ce cas, c'est la convection naturelle qui prédomine et la forme du cristal sera donc convexe.
- Lorsque la vitesse de rotation augmente (Figure II -5-b), le liquide en contact avec le cristal est rejeté vers les parois du creuset à cause de la force centrifuge, ce qui va s'opposer avec les courants de convection naturelle. Il existe une vitesse de rotation optimale pour laquelle l'interface de contact cristal-bain sera un plan.
- Dans le cas d'une rotation trop rapide (Figure II -5-c), les courants de convection prédominent et cela se traduit par une surface de contact cristal-bain concave. Ceci favorisera l'apparition de bulle de gaz dans le cristal ou de contraintes. C'est le cas à éviter.

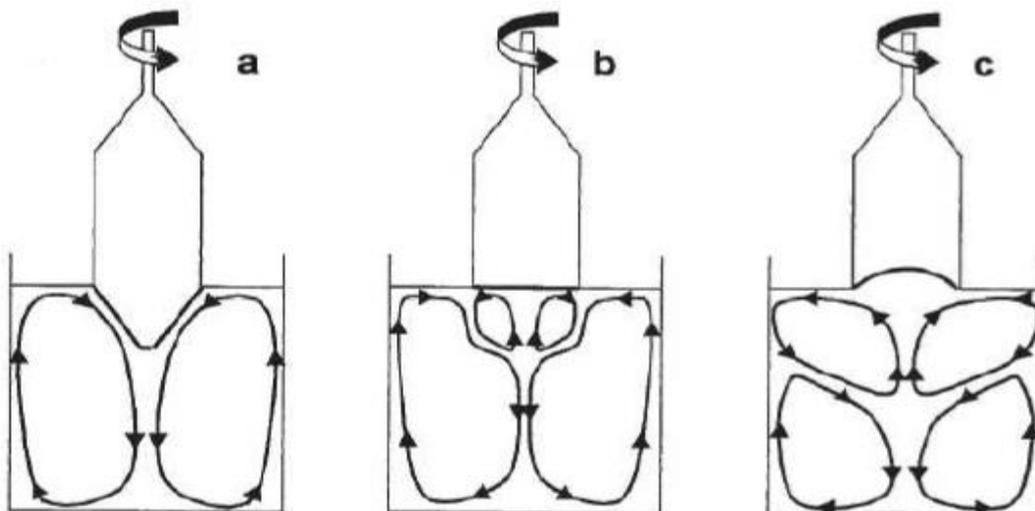


Figure II -5 : Représentation schématique des courants de convection forcés et naturels lors d'une croissance Czochralski dans le cas d'une vitesse de rotation a) trop lente, b) optimale, c) trop rapide [19]

II-4) conclusion :

Après avoir rappelé compendieusement les principaux objectifs de ce travail, nous avons étudiés dans ce chapitre la technique de croissance cristalline CZOCHRALSKI, et nous avons détaillés le mode et le principe de fonctionnement de cette technique par la description de son four et l'influence des vitesses sur les paramètres de la croissance, dans notre étude, on a trouvé que la méthode de CZOCHRALSKI a été utilisé par les chercheurs beaucoup plus pour la croissance du silicium pour son utilisation dans une large gamme de l'industrie moderne.

Les avantages et les inconvénients de la technique Czochralski peuvent se résumer ainsi :

Avantage :

- La croissance en surface libre accomode les variations de volume liées à la solidification.
- Croissance possible de cristaux massif et de très bonne qualités optiques à des vitesses rapides.
- La composition chimique est contrôlable.

Inconvénients :

- Pollution éventuelle par le creuset.

Chapitre III : Conception et Dimensionnement

III-1) Introduction :

Dans ce chapitre, on va présenter la nouvelle solution, et la méthodologie utilisée, pour la conception et le dimensionnement de notre système à partir d'un cahier charge dans cette étude. Ceci passe évidemment par un calcul de résistance des principales pièces qui la composent.

III -2) Présentation de la nouvelle solution :

La première idée a été inspirée du système vis-écrou puisqu'il a le même principe de fonctionnement (translation rotation), alors que la vis est motorisée par un moteur électrique. Lorsque le moteur tourne, va transmettre son mouvement de rotation vers la vis par un mécanisme d'engrenage pour réduire et prendre la vitesse souhaitée. Donc la vis va déplacer une table verticalement (translation) guidée par deux axes de guidage, cette table porte un deuxième moteur qui va aussi transmettre son mouvement de rotation vers la tige par un mécanisme d'engrainage.

III-2-1) Méthodologie utilisée :

La méthodologie suivie s'est basée principalement sur la recherche d'information, les calculs à effectuer et le plan de travail.

III-2-2) Cahier des charges et des spectres de conception :

Pour le projet, il est important d'avoir établi le cahier de charge complet de notre prototype. En ce qui concerne les éléments de conception, il est nécessaire de considérer les points suivants :

- La vitesse de translation de tirage du cristal est 250 mm/h.
- La vitesse de rotation de la tige est 2 tr/min.
- La tige va supporter une charge de lingot de silicium de diamètre 100 mm et de longueur 1000 mm.

III-3) Éléments de conception :

III-3-1) système de transmission de la vis (tige fileté) :

Ce système de transmission constitué deux engrenages, c'est-à-dire entre quatre (04) pignons, le premier engrenage entre le pignon de moteur1 et le pignon1, et le deuxième entre le pignon 2 et le pignon de la tige fileté, sachant que les deux pignons 1 et 2 ont le même arbre de rotation. Et le rapport de transmission de ce système est inférieur à 1.

Calcul dimensionnel de 1^{er} engrenage :

Le moteur qui va être utilisé est un moteur à courant continu qui est basé sur le principe physique du couplage magnétique entre deux champs magnétiques. Il permet de transmettre l'énergie mécanique à son arbre en transformant l'énergie magnétique en mouvement de rotation. Il est muni d'un couple de démarrage important, ces caractéristiques sont :

Tableau III-1 Caractéristique du *moteur*₁

Tension Nominale (Volt)	DC 12V
Puissance (Watt)	3,5 W
Vitesse (tr/min)	10 TR/MIN
Matériel	Métal
Courant de décrochage (A)	0.12 A

La formule du rapport de transmission est :

$$r = \frac{N_s}{N_e} = \frac{D_e}{D_s} = \frac{C_e}{C_s} = \frac{Z_e}{Z_s} \quad (\text{III-1})$$

Avec :

r : le rapport de transmission entre le pignon de sortie et pignon d'entrée ($r < 1$).

N_s : La vitesse de pignon de sortie (tr/min).

N_e : La vitesse de pignon d'entrée (tr/min).

D_e : Diamètre de pignon d'entrée (mm).

D_s : Diamètre de pignon de sortie (mm).

C_e : Couple de l'arbre de l'entre (N.m).

C_s : Couple de l'arbre de sortie (N.m).

Z_e : Nombre de dents pignon d'entrée.

Z_s : Nombre de dents pignon de sortie.

Calcul dimensionnel de pignon1 :

On suppose que le rapport de transmission entre le pignon *moteur*₁ et le pignon1 est :

$$r_1 = 0,5$$

Le diamètre de pignon de $moteur_1$ est 50 mm.

Donc à partir de l'équation (III-1) on peut calculer D_1 , N_1 , C_1 , Z_1 .

Calcul de D_1 :

$$r_1 = \frac{D_{m1}}{D_1} \Leftrightarrow 0,5 = \frac{50}{D_1} \Rightarrow D_1 = \frac{50}{0,5} = 100 \text{ mm.}$$

Calcul de N_1 :

$$r_1 = \frac{N_s}{N_e} \Leftrightarrow 0,5 = \frac{N_s}{10} \Rightarrow N_s = 0,5 * 50 = 5 \text{ tr/min.}$$

Calcul de C_1 :

$$r_1 = \frac{C_{m1}}{C_1} \Rightarrow C_1 = \frac{C_{m1}}{0,5} \text{ tout d'abord, on doit calculer le couple } moteur_1 C_{m1}.$$

$$\text{On a: } \mathcal{P} = \omega * M_T \quad (\text{III-2})$$

Avec :

\mathcal{P} : la puissance mécanique fournie par le moteur (watt).

ω : La vitesse angulaire (rad/s) ($1 \text{ tr/min} = \frac{\pi}{30} \text{ rad/s}$).

M_T : Moment de torsion (N.m).

Donc on peut calculer C_{m1} :

$$C_{m1} = \frac{P_{m1}}{\omega_{m1}} \Leftrightarrow C_{m1} = \frac{3,5}{10 * \frac{\pi}{30}} = 3,34 \text{ N.m.}$$

$$C_1 = \frac{C_{m1}}{0,5} \Leftrightarrow C_1 = \frac{3,34}{0,5} = 6,68 \text{ N.m.}$$

Calcul de Z_1 :

$$r_1 = \frac{Z_{m1}}{Z_1} \Leftrightarrow 0,5 = \frac{Z_{m1}}{Z_1} \Rightarrow Z_1 = \frac{Z_{m1}}{0,5} \text{ tout d'abord on doit calculer le } Z_{m1}.$$

$$\text{On a: } p = \frac{\pi * D}{Z} \quad (\text{III-3})$$

Avec :

P : le pas entre les dents de pignon ($p = 6,28$).

$$\text{Donc : } Z_{m1} = \frac{\pi * D_{m1}}{p} \Leftrightarrow Z_{m1} = \frac{\pi * 50}{6,28} = 25 \text{ dent.}$$

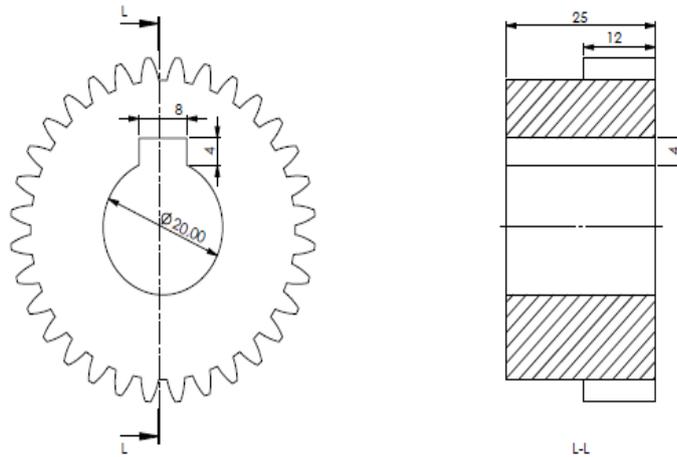
$$Z_1 = \frac{25}{0,5} = 50 \text{ dents.}$$

diametre exterieur : 50

pas : 6,28

nombre de dents : 25

module : 1.5



pignon de transmission de moteur1

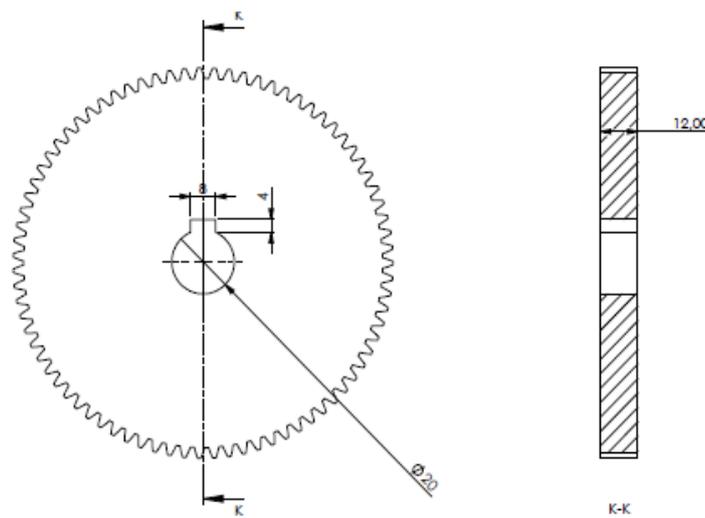
Figure III-1 : mise en plan de pignon *moteur*₁

diametre exterieur : 100

pas : 6,28

nombre de dents : 50

module : 1.5



pignon de transmission 1

Figure III-2 : mise en plan de transmission 1

Calcul dimensionnel de 2eme engrenage :

On a :

Les deux pignons de transmission 1 et 2 ont le même arbre de rotation c'est-à-dire :

$$N_1 = N_2 = 5 \text{ tr/min et } C_1 = C_2 = 6,28 \text{ N.m.}$$

Et on prend $D_2 = D_{m1} = 50\text{mm}$.

Calcul dimensionnel de pignon de la tige filetée (vis) :

Calcul N_v :

On suppose que le pas de la tige filetée est de $p=2\text{mm}$, et la vitesse de translation de la tige filetée est $V=250\text{mm/heure}$, c'est-à-dire :

1 tour $\rightarrow 2\text{mm}$

$N_v \rightarrow 250\text{mm/h}$

$$N_v = \frac{250\text{mm/h} \cdot 1\text{tr}}{2} = 125 \frac{\text{tr}}{\text{h}} = \frac{125}{60} = 2,08 \text{ tr/min}$$

Calcul D_v :

$$r_2 = \frac{D_2}{D_v} \Rightarrow D_v = \frac{D_2}{r_2}$$

$$r_2 = \frac{N_v}{N_2} = \frac{2,08}{5} = 0,41$$

$$D_v = \frac{50}{0,41} = 122\text{mm.}$$

Calcul C_v :

$$r_2 = \frac{C_2}{C_v} \Rightarrow C_v = \frac{C_2}{r_2} = \frac{6,68}{0,41} = 16,29 \text{ N.m}$$

Calcul Z_v et Z_2 :

De l'équation (III-3) on a :

$$Z_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{p} = \frac{\pi \cdot 50}{6,28} = 25 \text{ dents.}$$

$$Z_v = \frac{Z_2}{r_2} = \frac{25}{0,41} = 61 \text{ dents.}$$

diametre exterieur : 122

pas : 6,28

nombre de dents : 61

module : 1.5

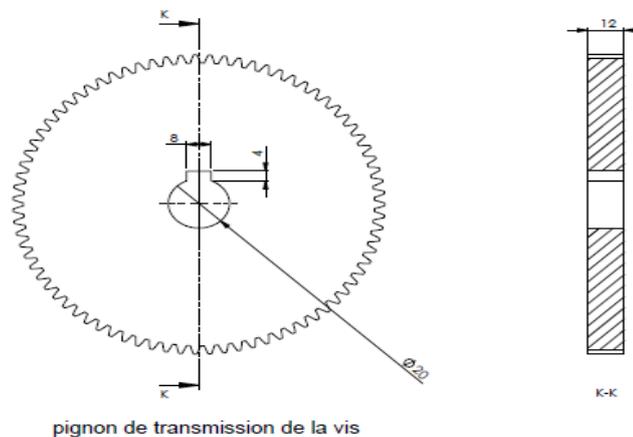


Figure III-3 : mise en plan de pignon de transmission de la vis

III-3-2) la vis (tige filetée) :

La vis est une vis de mouvement de filetage trapézoïdal de pas de 2mm et de longueur L et de diamètre D_{vis} à dimensionner, cette tige filetée est de nature acier de construction non allié A60, ces caractéristiques mécaniques ($R_m = 590$ Mpa et $R_e = 305$ Mpa).

Calcul dimensionnel de la tige filetée :

Le profil de la tige filetée est soumis à la torsion provoquée par l'effort tangentiel F_t :

La condition de résistance : $\tau_{max} \leq R_{pg}$ (III-4)

$$\text{Ou : } \frac{M_t}{I_0} \leq R_{pg} \quad \text{et } (R_{pg} = \frac{R_{eg}}{s})$$

Avec :

τ_{max} : Contrainte maximale tangentielle (Mpa=N/mm²).

M_t : Moment de torsion maximale (N.mm).

I_0 : Moment quadratique polaire de la section S (mm⁴) $I_0 = \frac{D_{vis}^4 \pi}{32}$.

R : le rayon de la tige (mm) avec : $R = \frac{D_{vis}}{2}$

R_{pg} : Résistance pratique au glissement (Mpa).

R_{eg} : Résistance élastique au glissement avec $R_{eg} = \frac{R_e}{2s}$: (Mpa)/ s=2

s: coefficient de sécurité

Donc l'équation (III-4) devient comme suit :

$$\frac{M_t}{I_0} \leq \frac{R_e}{2s} \Leftrightarrow \frac{M_t}{\frac{D_{vis}^4 \pi}{32}} \leq \frac{R_e}{2s} \Leftrightarrow \frac{M_t}{\frac{D_{vis}^4 \pi}{32}} \leq \frac{R_e}{2s} \Leftrightarrow \frac{16M_t}{D_{vis}^3 \pi} \leq \frac{R_e}{2s} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow D_{vis} \geq \sqrt[3]{\left(\frac{32M_t * s}{R_e \pi}\right)}$$

Le moment de torsion est égale au couple résistant de l'arbre de pignon de transmission de la vis c'est-à-dire : $M_t = C_v = 16,29 * 10^3$ N.mm

$$D_{vis} \geq \sqrt[3]{\left(\frac{32 * 16,29 * 1000 * 2}{R_e \pi}\right)} \Leftrightarrow D_{vis} \geq 10,28 \text{ mm.}$$

Donc pour la confirmation de cette condition de résistance à la torsion, le diamètre de la tige filetée ne doit jamais être inférieure à $10,28\text{mm}$. On prend $D_{vis} = 40\text{mm}$ pour la conception voir la Figure (III-4).

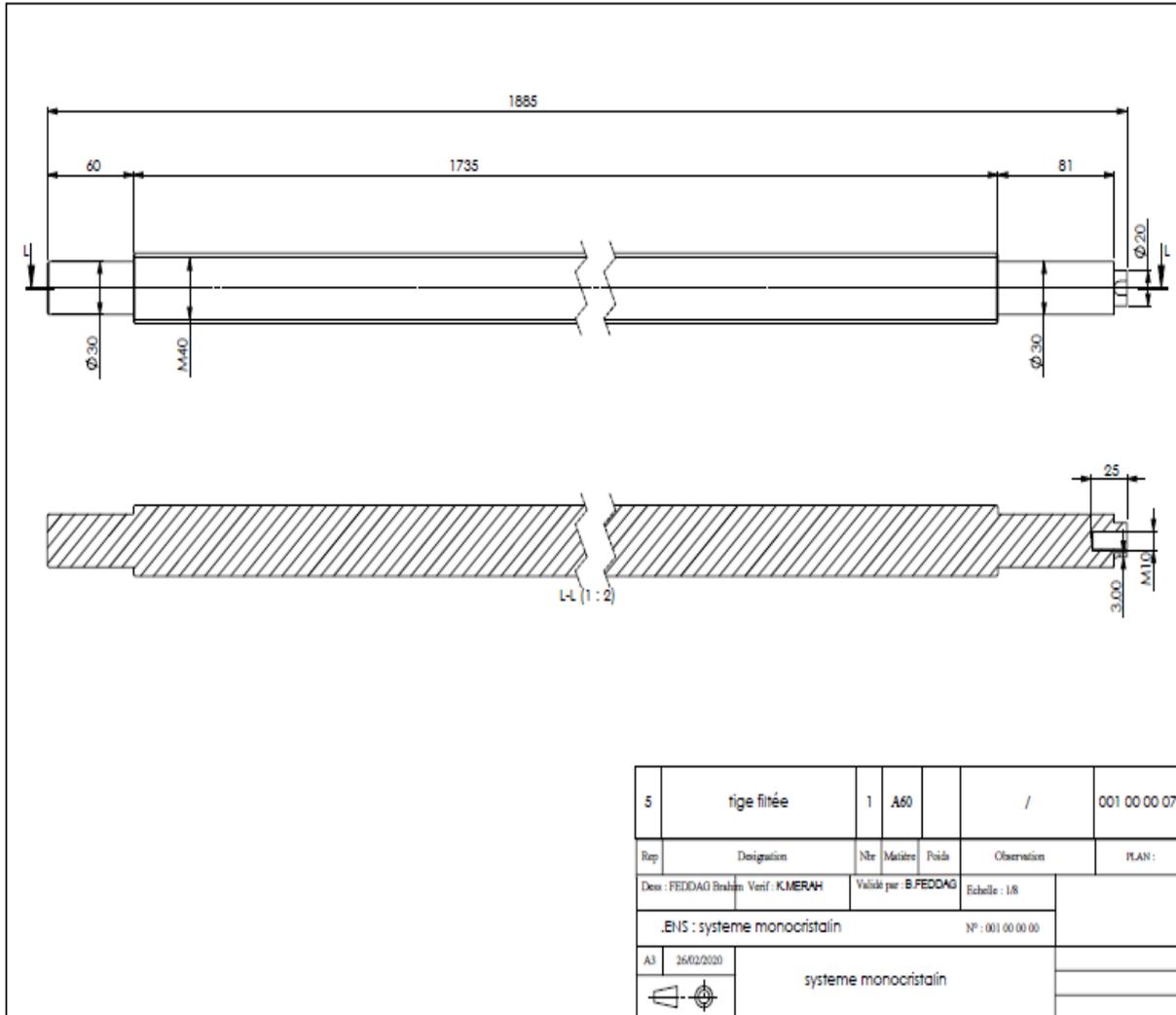


Figure III-4 : mise en plant de la tige filetée

III-3-3) Système de transmission de la tige de rotation :

Ce système de transmission constitué un seul engrenage, c'est-à-dire entre deux (02) pignons, le pignon de *moteur*₂ et le pignon de la tige de rotation. Et le rapport de transmission de ce système est inférieur à 1.

Calcul dimensionnel d’engrenage :

Le moteur qui va être utilisé est un moteur à courant continu basé sur le principe physique du couplage magnétique entre deux champs magnétiques. Il permet de transmettre l’énergie mécanique à son arbre en transformant l’énergie magnétique en mouvement de rotation. Il est muni d’un couple de démarrage important, ces caractéristiques sont :

Tableau III-2 Caractéristique du *moteur*₂

Tension Nominale (Volt)	DC 12V
Puissance (Watt)	3,5 W
Vitesse (tr/min)	5 tr/min
Matériel	Métal
Courant de décrochage (A)	0.12 A

Calcul dimensionnel de pignon de la tige de rotation :

On a :

La vitesse de rotation de la tige est 2 tr/min.

La vitesse de rotation de moteur₂ est 5 tr/min.

Donc en l'équation (III-1) on peut calculer le rapport de transmission de cet engrenage r_3 et D_t et C_t et Z_t :

$$r_3 = \frac{N_t}{N_{m2}} = \frac{2}{5} = 0,4$$

Calcul D_t :

Et on prend le diamètre de pignon de moteur₂ $D_{m2} = 40\text{mm}$

$$D_t = \frac{40}{0,4} = 100\text{mm}$$

Calcul C_t :

De l'équation (III-2), on a :

$$C_{m2} = \frac{P_{m2}}{\omega_{m2}} \Leftrightarrow C_{m2} = \frac{3,5}{5 \cdot \frac{\pi}{30}} = 6,73 \text{ N.m.}$$

$$C_t = \frac{6,73}{0,4} = 16,82 \text{ N.m.}$$

Calcul Z_{m2} et Z_t :

De l'équation (III-3), on a : $p = \frac{D_{m2}\pi}{Z_{m2}} \Rightarrow Z_{m2} = \frac{D_{m2}\pi}{p} = \frac{40 \cdot 3,14}{6,28} = 20$ dents.

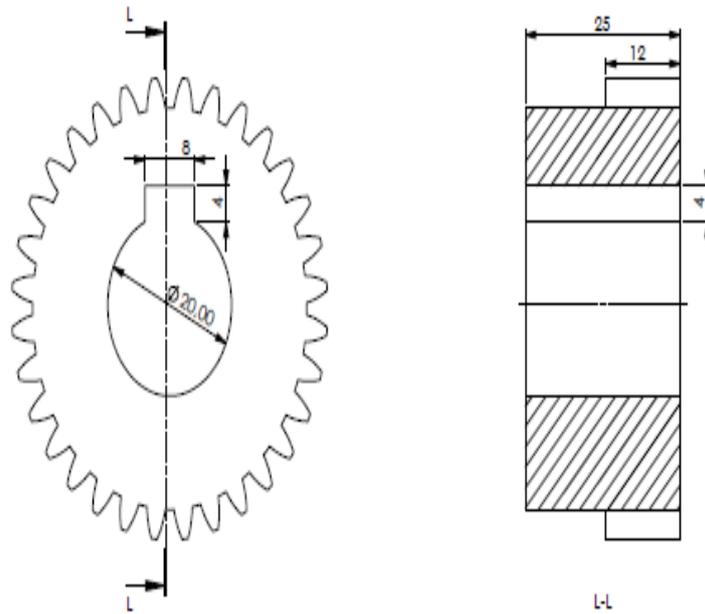
$$Z_t = \frac{20}{0,4} = 50 \text{ dents.}$$

diametre exterieur : 40

pas : 6,28

nombre de dents : 20

module : 1.5



pignon de transmission de moteur2

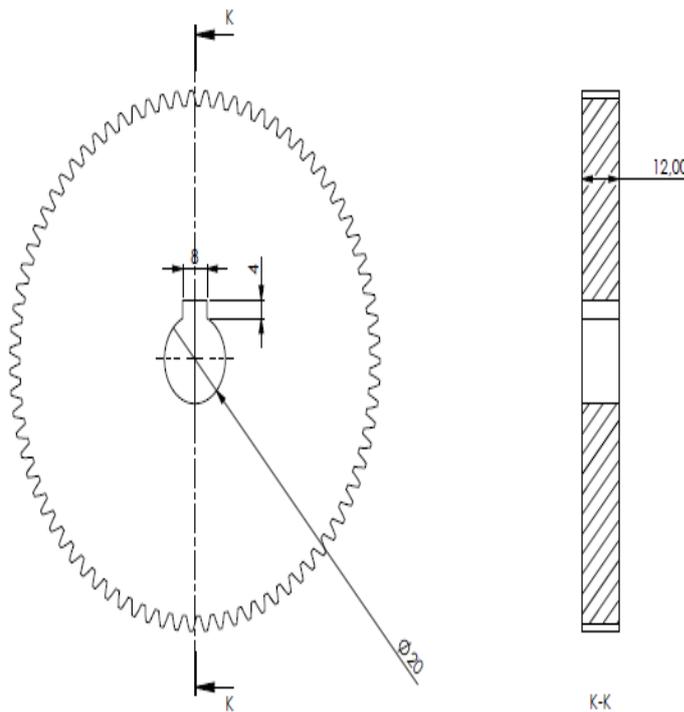
Figure III-5 : mise en plan de pignon *moteur₂*

diametre exterieur : 100

pas : 6,28

nombre de dents : 50

module : 1.5



pignon de transmission de la tige de rotation

Figure III-6 : mise en plan de pignon de la tige de rotation

III-3-4) La tige de rotation :

La tige de rotation quand doit l'utiliser dans notre système est de nature pleine ces caractères mécaniques ($R_m = 150 \text{ Mpa}$ et $R_e = 70 \text{ Mpa}$).

Calcul dimensionnel de la tige de rotation :

On a :

La tige de rotation doit supporter une charge de lingot de silicium de diamètre 100 mm et de longueur de 1000 mm (traction) par l'effort axiale F_a :

La condition de résistance : $\sigma_{max} \leq \sigma_{adm}$ III-5

Où :

$$\frac{F_a}{A} \leq \sigma_{adm} \quad / \quad \sigma_{adm} = \frac{R_e}{s} \quad \text{et } (R_e = 70 \text{ Mpa}) \quad s : \text{coefficient de sécurité} : 2$$

Avec :

F_a : Effort extérieur de traction sollicitant la pièce (N)

A : Aire de la section de la pièce (mm^2) avec : $A = \frac{\pi D^2 tige}{4}$.

σ_{adm} : Contrainte admissible du matériau constituant la pièce (N/mm^2)

σ_{max} : Contrainte réelle de traction en tout point de la section A (N/mm^2)

$$\Rightarrow \frac{F_a}{\frac{\pi D^2 tige}{4}} \leq \frac{R_e}{s} \Rightarrow D^2 tige \geq \frac{4 F_a s}{\pi R_e} \Rightarrow D tige \geq \sqrt{\left(\frac{4 F_a s}{\pi R_e}\right)}$$

Calcul de l'effort extérieur F_a :

On a :

$$\rho = m/V \quad \text{(III-6)}$$

Avec :

ρ : la masse volumique de la matière (silicium) ($\rho = 2330 \text{ kg/m}^3$).

m : la masse de la matière (silicium) (kg).

V : le volume de la matière (silicium) (m^3) / $V = SL$ avec :

S : la section de la matière (lingot de silicium) (m^2) / $(S = \frac{\pi d^2}{4})$

L : la longueur de la matière (lingot de silicium) (m).

De l'équation (III-6) on a :

$$m = \rho V \Leftrightarrow m = \rho \frac{\pi d^2}{4} * L$$

$$m = 2330 * \frac{\pi(0,1)^2}{4} * 1$$

$$m = 18,29 \text{ kg.}$$

On a:

$$1 \text{ Kg} \rightarrow 10 \text{ N}$$

$$18,29 \rightarrow 180,29 \text{ N}$$

$$F_a = 180,29 \text{ N}$$

Donc :

$$D_{tige} \geq \sqrt{\left(\frac{4*180,29*2}{\pi*70}\right)} \Leftrightarrow D_{tige} \geq 6,56 \text{ mm} .$$

Donc pour la confirmation de cette condition de résistance à la traction, le diamètre de la tige de rotation ne doit jamais être inférieure à 6,56 mm. On prend $D_{tige} = 25 \text{ mm}$ pour la conception et on doit aussi vérifier la condition de résistance à la torsion.

Calcul de vérification la résistance de la tige de rotation à la torsion :

De l'équation (III-4) on a :

$$\frac{M_t}{\frac{I_0}{R}} \leq \frac{R_e}{2s} \Leftrightarrow \frac{M_t}{\frac{D_{tige}^4 \pi}{\frac{32}{R}}} \leq \frac{R_e}{2s} \Leftrightarrow \frac{M_t}{\frac{D_{tige}^4 \pi}{\frac{32}{\frac{D_{tige}}{2}}}} \leq \frac{R_e}{2s} \quad .\text{Avec } s : \text{coefficient de sécurité} : 2$$

Le moment de torsion est égale au couple résistant de l'arbre de pignon de transmission de la tige de rotation c'est-à-dire: $M_t = C_t = 16820 \text{ N.mm}$.

$$\Rightarrow \frac{C_t}{\frac{D_{tige}^4 \pi}{\frac{32}{\frac{D_{tige}}{2}}}} \leq \frac{R_e}{2s} \Leftrightarrow \frac{16C_t}{D_{tige}^3 \pi} \leq \frac{R_e}{2s} \Leftrightarrow 5,48 \text{ Mpa} \leq 17,5 \text{ Mpa}$$

Alors donc la tige de rotation résiste à la torsion.

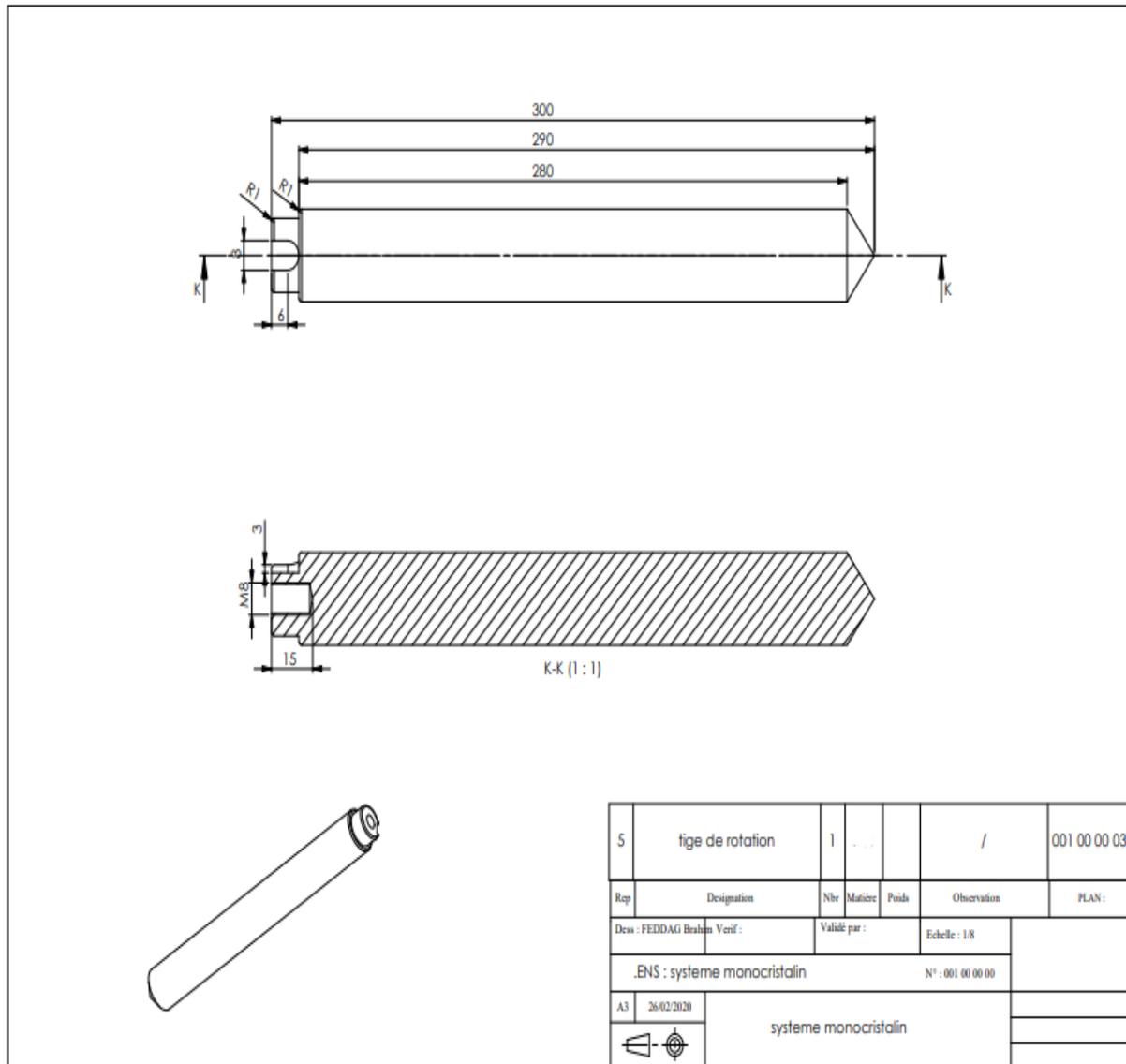


Figure III-7 : Mise en plan de la tige de rotation

III-3-5) La table mobile :

La table mobile est de matière de l'acier S235JR correspond à l'A24 équivalent à un A37 qui est un acier de construction soudable, doux à 37/40 kg. Ces caractéristiques mécaniques ($R_e = 235 \text{ Mpa}$).

Cette table va déplacer la tige de rotation verticalement et elle supporte la charge de lingot de silicium.

Calcul dimensionnel de la table mobile :

Le profil de la table est soumis à la flexion provoquée par l'effort axial des deux charges de la tige de rotation et du lingot de silicium F_f .

La condition de résistance : $\sigma_{max} \leq \sigma_{adm}$ (III-7)

Ou : $\frac{M_f}{Z} Y_{max} \leq \frac{R_e}{s}$ (s=2 : coefficient de sécurité) et $Y_{max} = \frac{h}{2}$

Avec :

M_f : Moment de flexion (N.mm)

Z : Module d'inertie (mm⁴) pour une section rectangulaire $Z = \frac{bh^3}{12}$

Donc de l'équation (III-7) :

$$\frac{M_f}{\frac{bh^3}{12}} * \frac{h}{2} \leq \frac{R_e}{s} \Rightarrow h \geq \sqrt{\left(\frac{6M_f s}{bR_e}\right)} \quad \text{Avec : } b = 500 \text{ mm}$$

Calcul de M_f :

$$M_f = F_f * x$$

$$x = 430 \text{ mm}$$

$$10\text{N} \rightarrow 1\text{kg}$$

$$F_f \rightarrow 18,29 \text{ kg} + \text{la masse de la tige de rotation}$$

De l'équation (III-6) :

$$\rho = m/V : \text{la masse volumique du platine est égale : } 0,02145 \text{ kg/cm}^3$$

Alors que :

$$m = \rho V \Leftrightarrow m = \rho \frac{\pi d^2}{4} * L \Leftrightarrow m = 0,02145 * \frac{\pi(2,5)^2}{4} * 29 \Leftrightarrow m = 3,05 \text{ kg}$$

$$F_f = \frac{(18,29+3,05)}{1} * 10 \Leftrightarrow F_f = 213,4 \text{ N}$$

$$M_f = 213,4 * 430 = 91762 \text{ N. mm}$$

$$h \geq \sqrt{\left(\frac{6*91762*2}{500*235}\right)} \Rightarrow h \geq 9,37 \text{ mm}$$

Donc pour la confirmation de cette condition de résistance à la flexion, l'épaisseur ou bien la hauteur h de la table mobile ne doit jamais être inférieure à 9,37 mm. On prend $h = 15 \text{ mm}$ pour la conception (voir figure III-8).

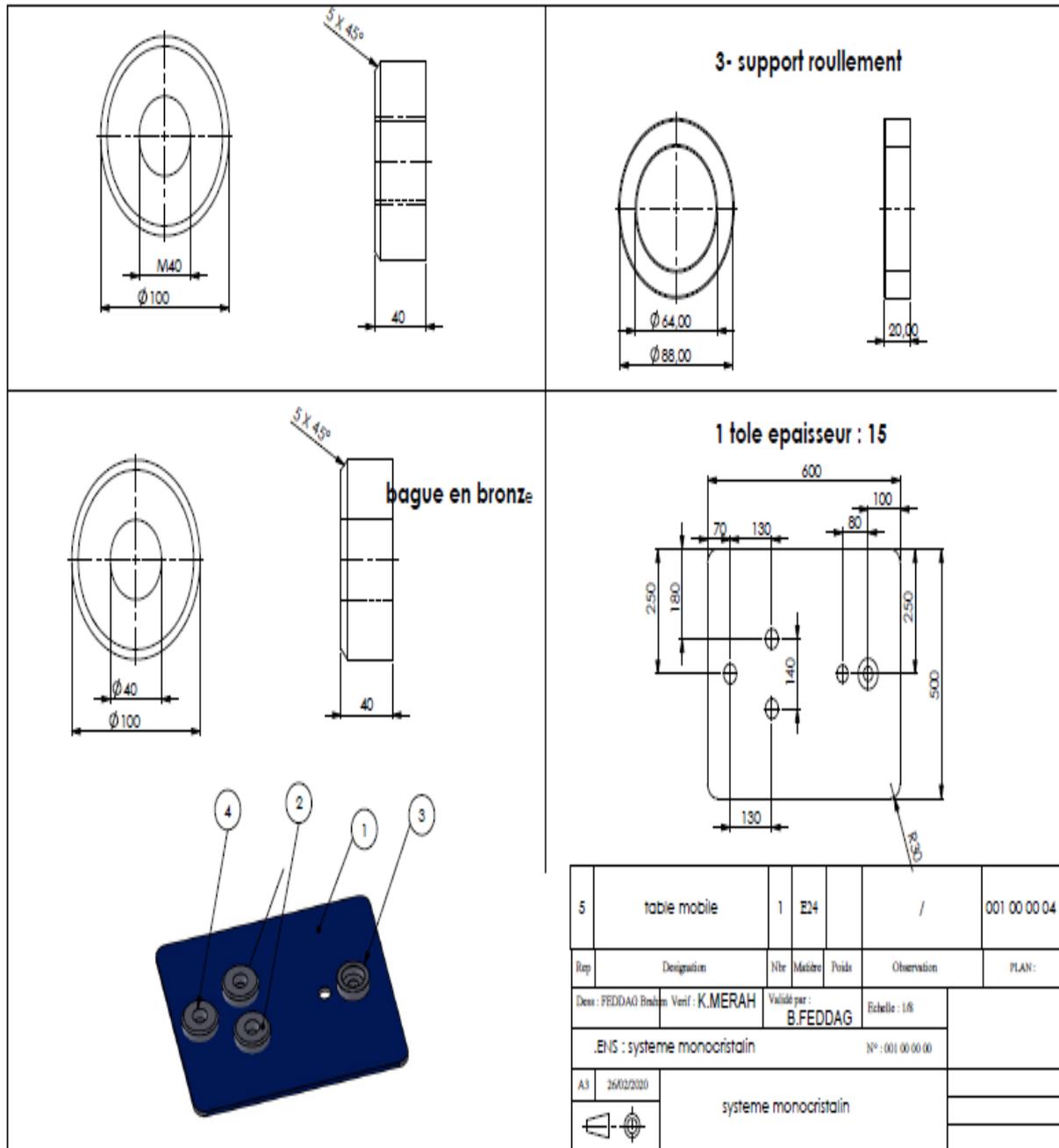


Figure III-8 : Mise en plan de la table mobile

Les trois bagues sont en bronze et sont utilisées pour diminuer les frottements entre la tige filetée et les deux axes de guidage, et ainsi pour que le système, supporte des charges importantes avec des faibles vitesses.

III-3-6) Les axe de guidage :

Les deux axes de guidage jouent le rôle de déplacer la table mobile d’une façon précise. (Voir la figure III-9).

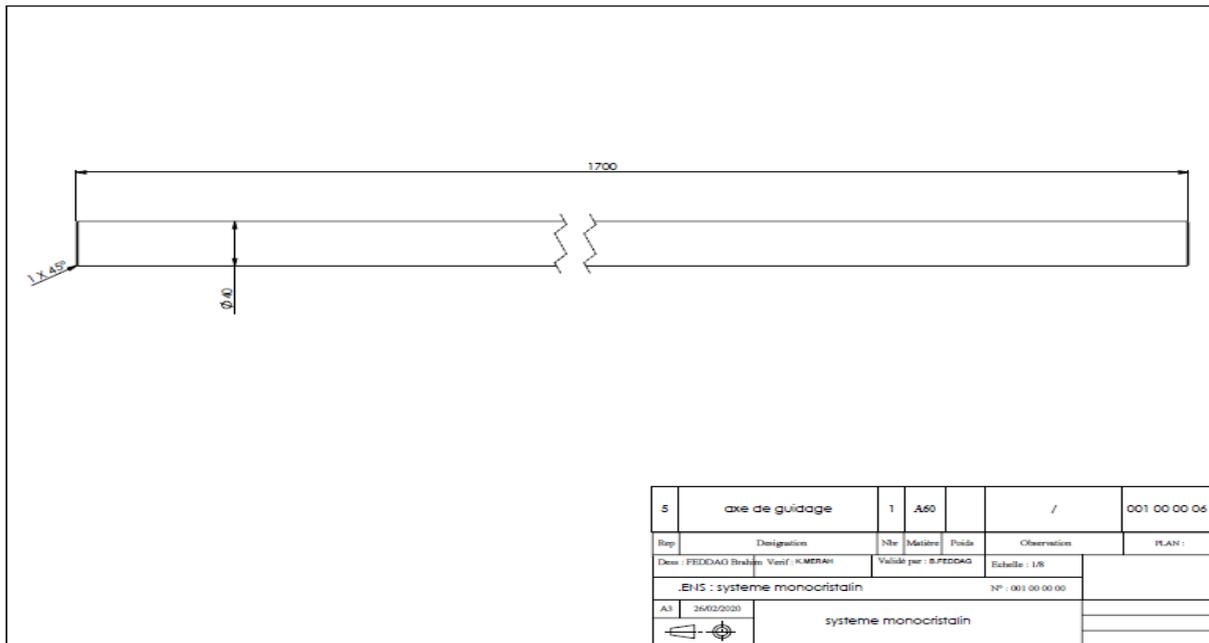


Figure III-9 : Mise en plan d'axe de guidage

III-3-7) La table fixe : (voir la figure III-10)

Cette table porte le premier moteur1 et le système d'engrenage de la tige filetée.

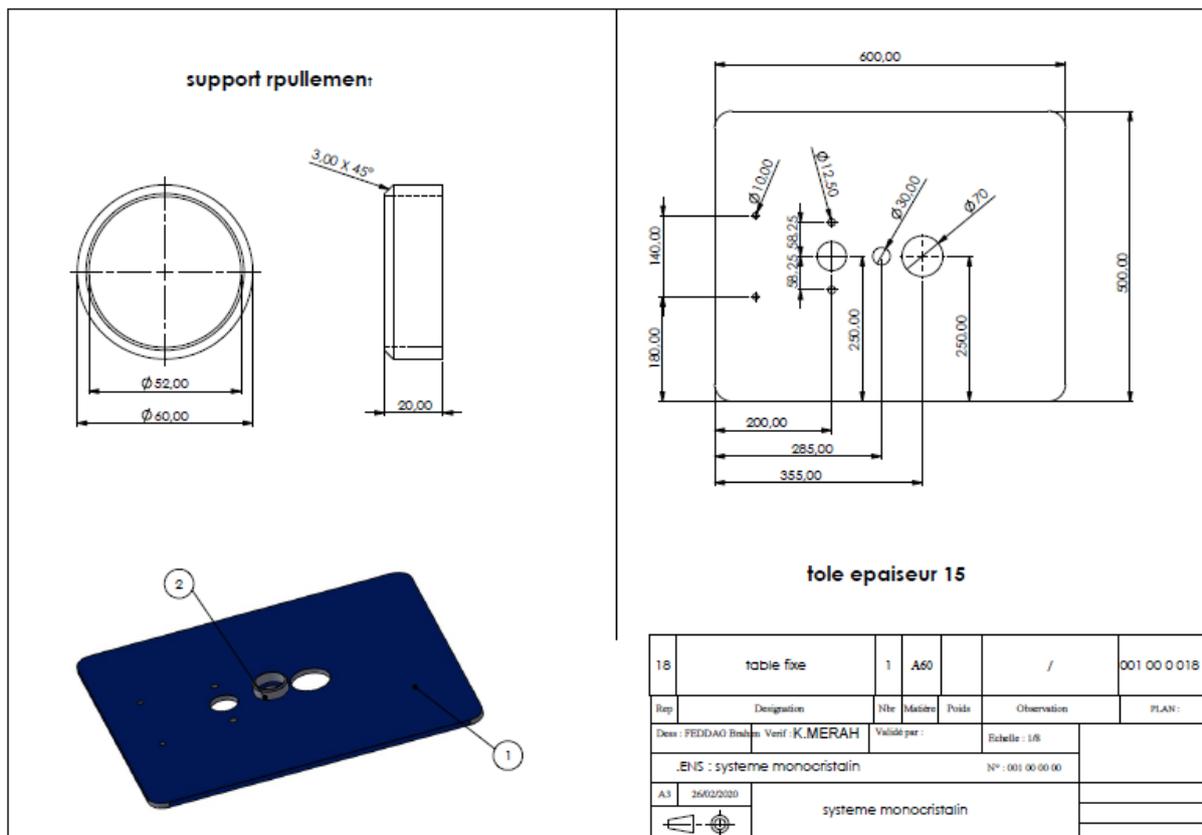


Figure III-10 : Mise en plan de la table fixe

III-3-8) La basse : (voir la figure III-11)

On a utilisé le tube fer carrée 40x40 afin d’augmenter la résistance de la base à la flexion, et les quatre pieds à la compression.

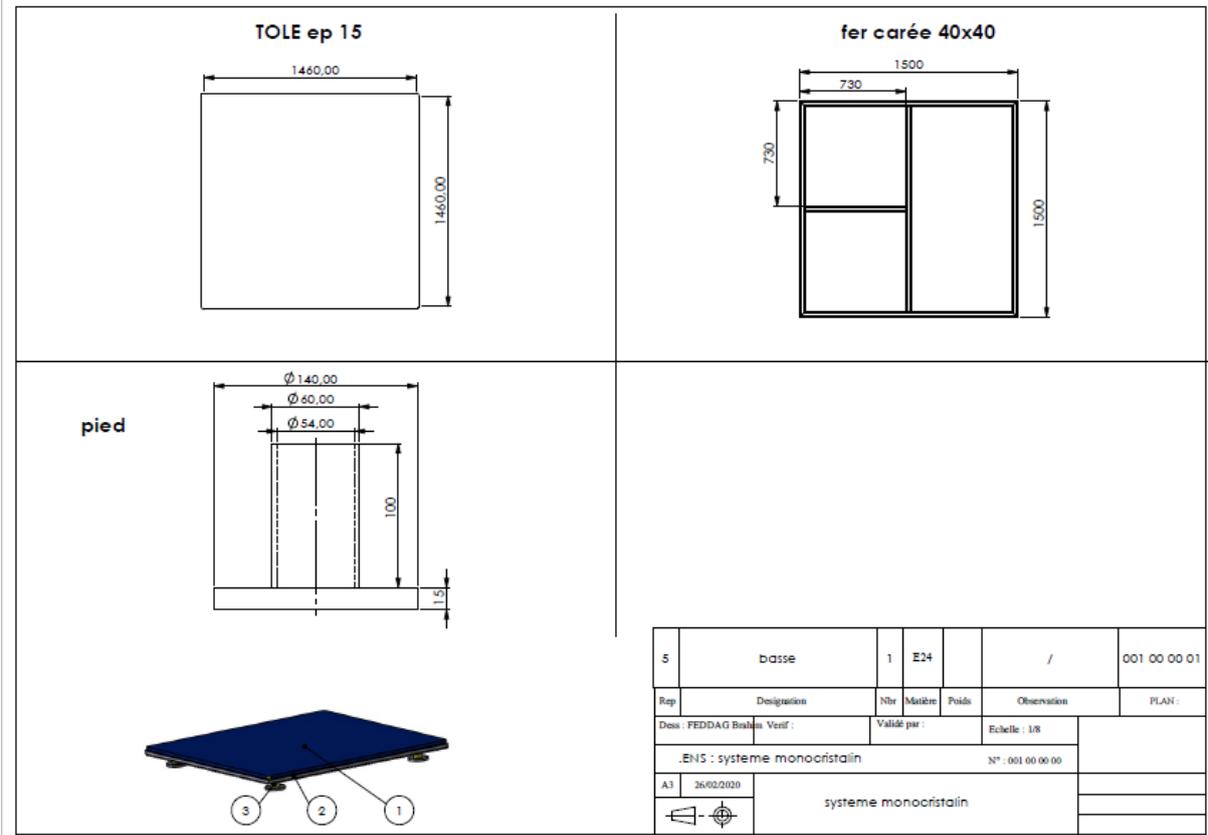


Figure III-11 : mise en plan de la base

III-3-8) support table : (voir la figure III-12)

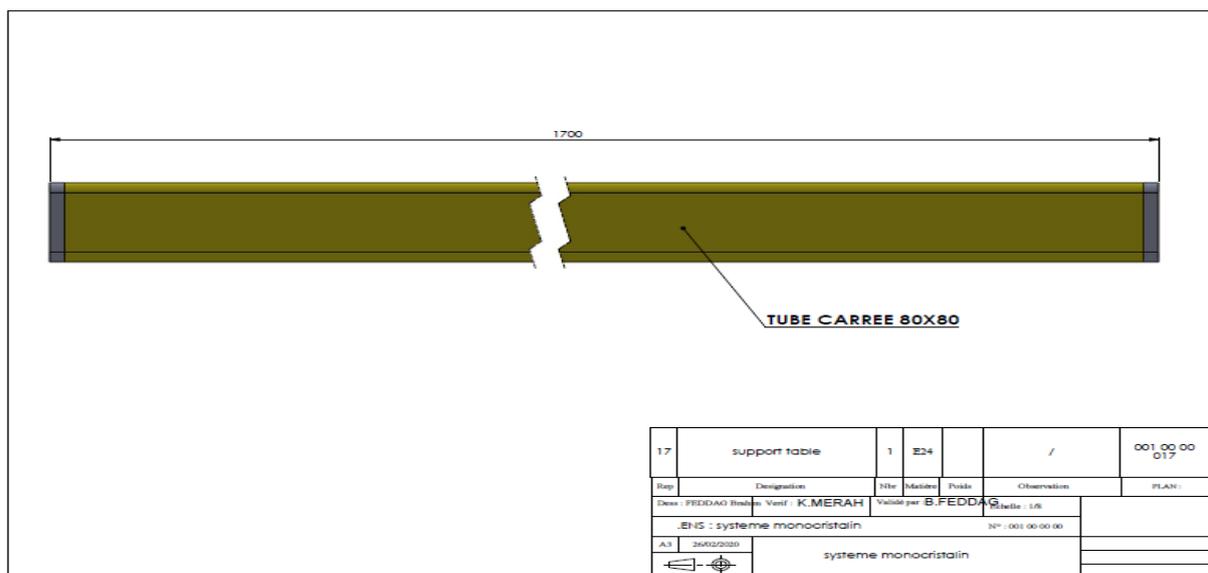


Figure III-12 : Mise en plan du support table

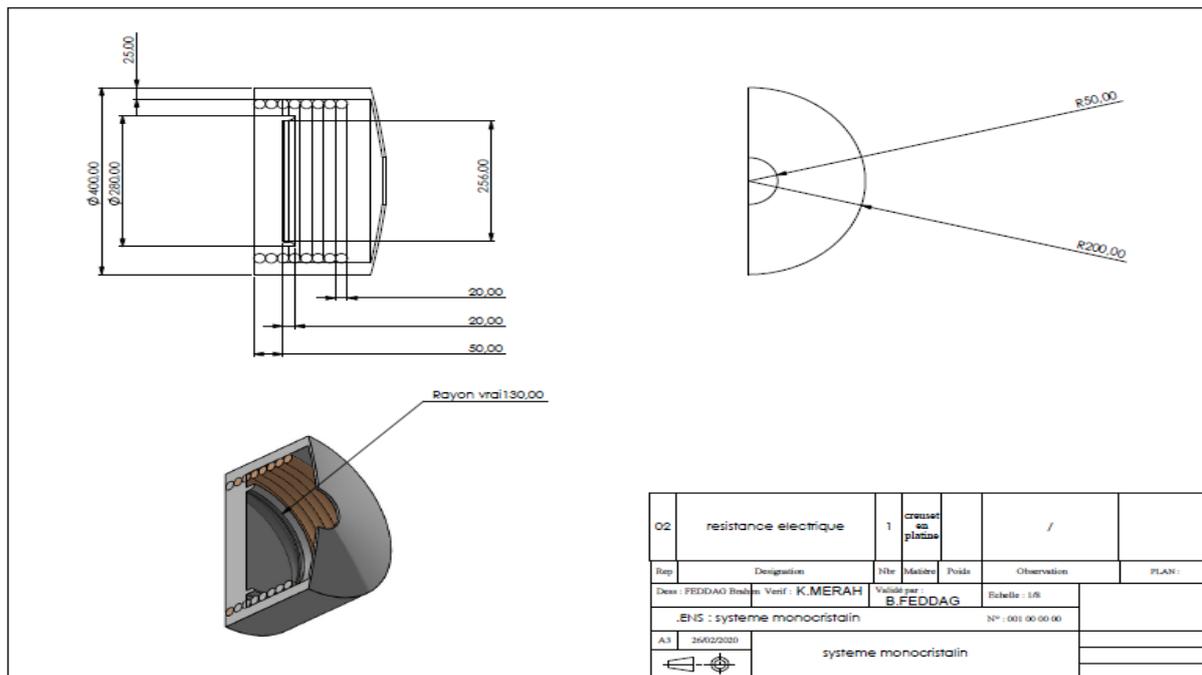
III-3-8) résistance électrique du creuset : (voir la figure III-13)

Figure III-13 : Mise en plan de la résistance électrique

III-4) Critères de choix des roulements :

Les roulements choisis pour le projet sont les roulements à billes à contact radial (7205B) et (7305B) NTN-SNR. Ils sont très économiques et les plus utilisés en petites et moyennes dimensions. Ils supportent tous les types de charges (modérées à moyennes) : axiales, radiales et combinées. Sous charges, ils se comportent comme un roulement à contact oblique dont l'angle d'inclinaison serait variable.

Il est essentiel que le roulement fonctionne sans risque de pénétration de matière étrangère, car celle-ci provoquerait une usure rapide par rodage. Les roulements sont déjà équipés de joint d'étanchéité par les deux côtes.

Critères de choix

- Nature des charges : axiale, radiale ou combinée.
- Importance des charges (intensité)
- Vitesse de rotation
- Perturbations : chocs, vibration
- Condition de montage, mise en place, accessibilité, réglage...
- Précision exigée : coaxialité, faux rond
- Rigidité exigée : déformation admissible

- Encombrement, place disponible
- Longévité, durée de vie souhaitée
- Condition ambiante : pollution, températures, lubrification...

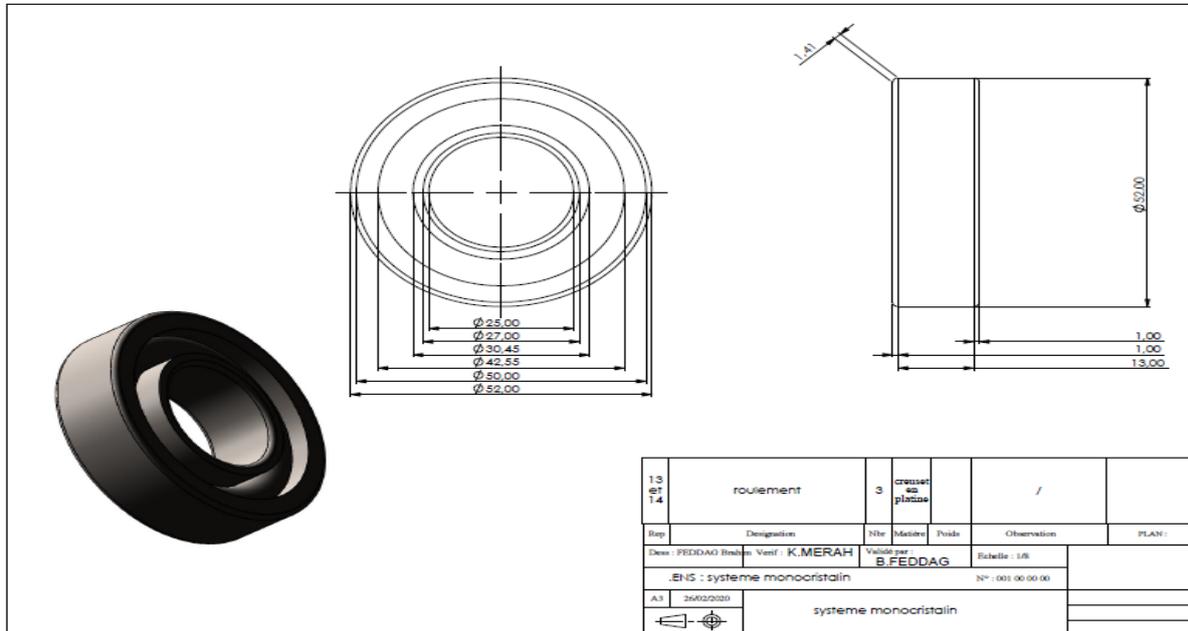


Figure III-14 : Mise en plan de roulement

Support roulement :

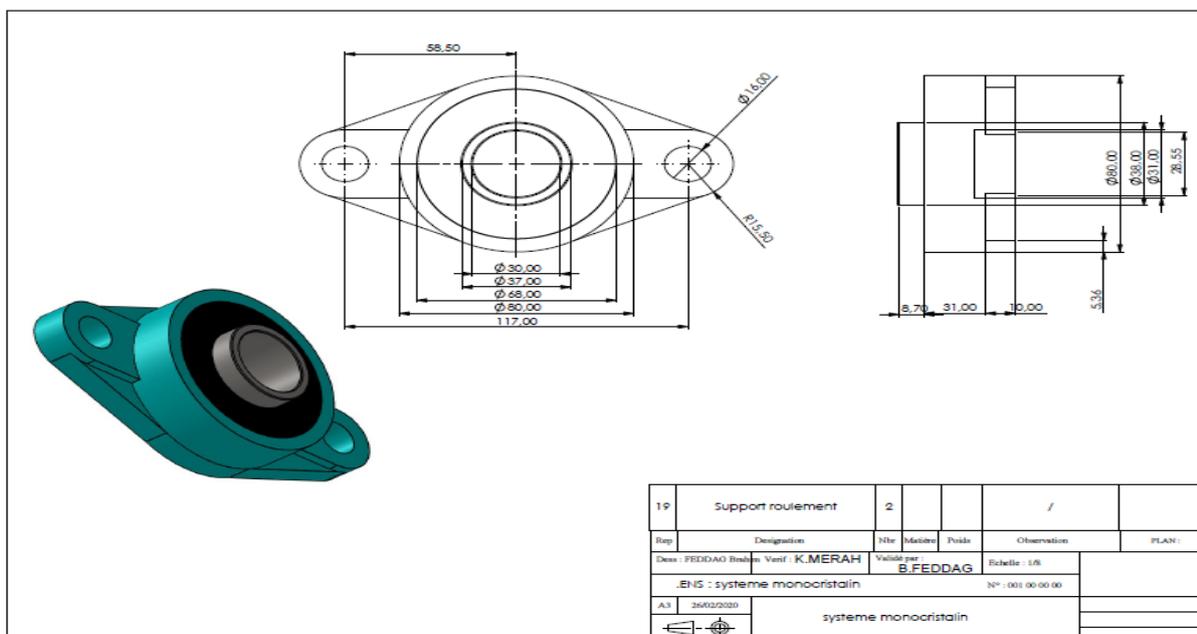


Figure III-15 : Mise en plan support roulement

III-5) Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons dimensionnés les éléments de notre conception à l'aide d'un cahier charge qui le on a établi, ceci passe évidemment par un calcul de résistance mécanique des différentes pièces conçues au sein de leur mécanisme de fonctionnement, et dans le prochain chapitre, on va faire la modélisation et la simulation numérique pour valider notre dimensionnement et vérifier la fiabilité et de notre système.

Chapitre IV : Modélisation et Simulation Numérique

IV-1) Introduction :

La simulation numérique peut nous apporter une aide précieuse dans la conception et la réalisation des pièces et des structures mécaniques. Mais avant toute simulation, il s'agit de concevoir les pièces. Et là, nous avons besoin d'exploiter des outils ou des logiciels classiques de conception assistée par ordinateur (CAO) à savoir SolidWorks, CATIA, etc. Ce type de logiciel permet en particulier de modéliser et de concevoir à l'aide d'un ordinateur la géométrie de la pièce, de l'assemblage ou de la structure à réaliser. Maintenant, pour anticiper la réaction ou le comportement de la pièce ou de l'assemblage conçu dans son environnement réel, nous avons besoin d'utiliser des logiciels d'analyse par éléments finis à l'exemple de : Ansys, Abaqes, Robot, LS-dyna, Feap, Code-Aster, Cast3M et bien d'autres. Cela permet justement de déterminer si le produit conçu pourra fonctionner tel qu'il a été conçu ou bien il va rompre ou s'user.

D'une manière globale, la structure du calcul par éléments finis est généralement composée de trois modules essentiels : le préprocesseur, le solveur et le post-processeur. Par ailleurs, le calcul par éléments finis permet de valider le design selon la démarche suivante :

- Préparation du modèle (module préprocesseur, SolidWorks dans notre cas)
- Résolution (module solveur, Abaqes, SolidWorks)
- Exploitation des résultats (module post-processeur, Abaqes, SolidWorks)

Dans ce travail, je présenterais d'abord, un travail de modélisation, de simulation et d'analyse par éléments finis a été élaboré en se servant du logiciel SolidWorks, des pièces qui composent le mécanisme de tirage de la croissance cristalline CZOCHRALSKI (la tige filetée, la tige de rotation, et la table mobile). Ensuite, un travail d'animation, pour voir le fonctionnement de notre système.

IV-2) Modélisation numérique :

IV-2-1) Analyse des résultat d'essai de torsion de la tige filetée :

Cette analyse permet de visualiser le modèle et les résultats, les déformations, les déplacements, les contraintes, etc.

La figure (IV-1) montre l'état de déplacement (module des déplacements) de la tige filetée après avoir effectué l'analyse du comportement élastique linéaire de celle-ci. Il s'avère que la pièce est décalée de sa position initiale avec un déplacement maximal de 0.258 mm tout en effectuant une rotation autour de l'axe y.

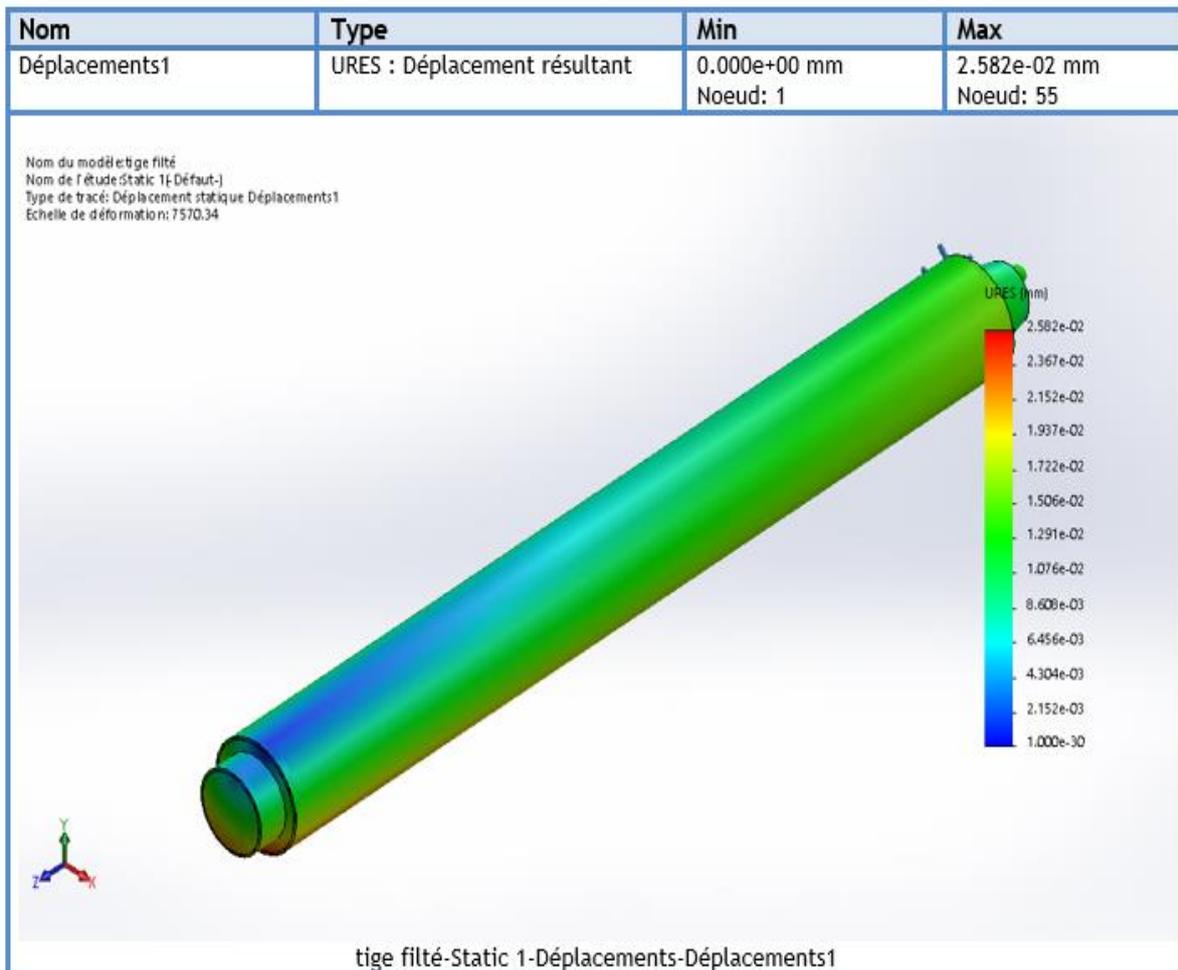


Figure IV-1 : Champ du module de déplacements de la tige filetée

Le champ de déformations suivant les directions x , y , z (ϵ_{ijk}) est présenté dans la figure (IV-2). Cette déformation représente l'état d'allongement ou de rétrécissement suivant les directions x , y , z . Nous remarquons que cette déformation est faible et elle ne dépasse pas la valeur de $4,706 \cdot 10^{-4}$ mm.

L'analyse effectuée dans ce cas est également de type statique linéaire. Un maillage d'environ 7432 éléments a été utilisé. L'affichage des contraintes induites par l'état de chargement considéré est indiqué par la figure (IV-3). Il s'avère que la répartition des contraintes de Von Mises est représentée dans l'ensemble par une couleur bleu foncée qui indique des contraintes qui ne dépassent pas $160 \cdot 10^5$ N/m². La couleur de la partie supérieure de la tige filetée tend vers le vert ce qui indique des contraintes pouvant atteindre $500 \cdot 10^5$ N/m², et la contrainte max est inférieure à la limite élastique, ceci montre grossièrement que la tige filetée ne dépasse pas sa limite élastique.

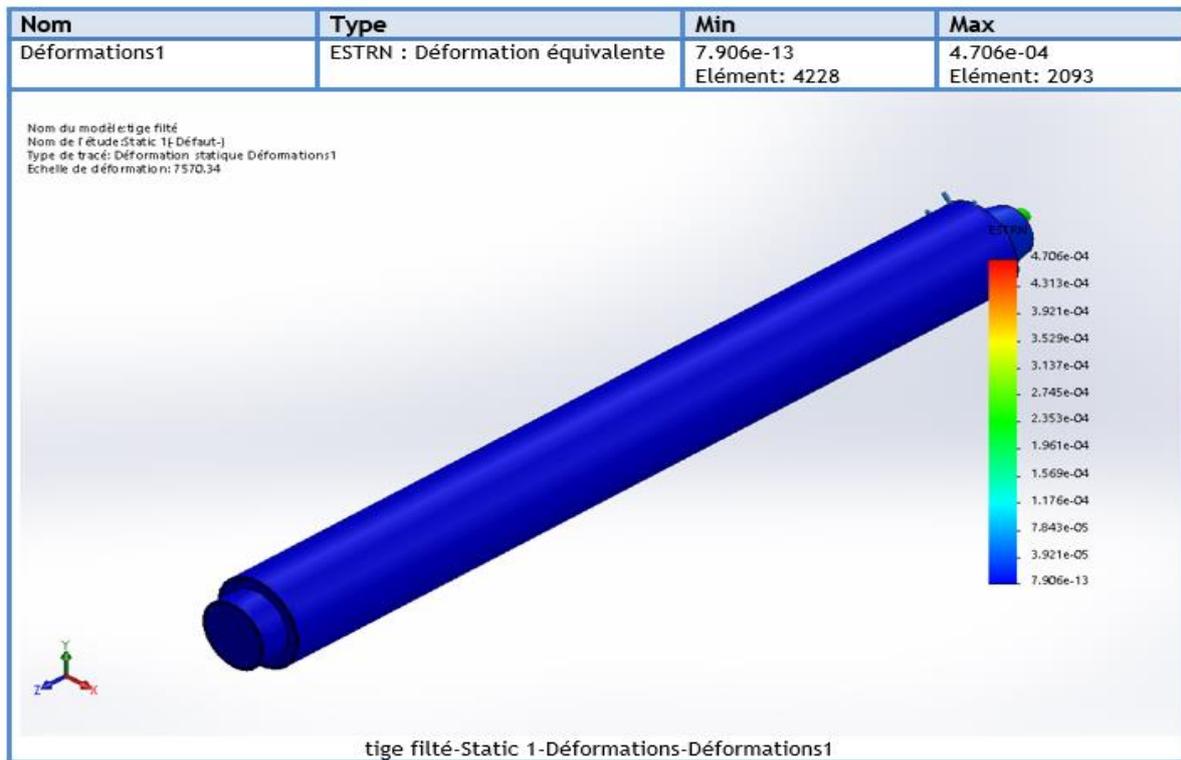


Figure IV-2 : Champ de déformation de la tige filetée

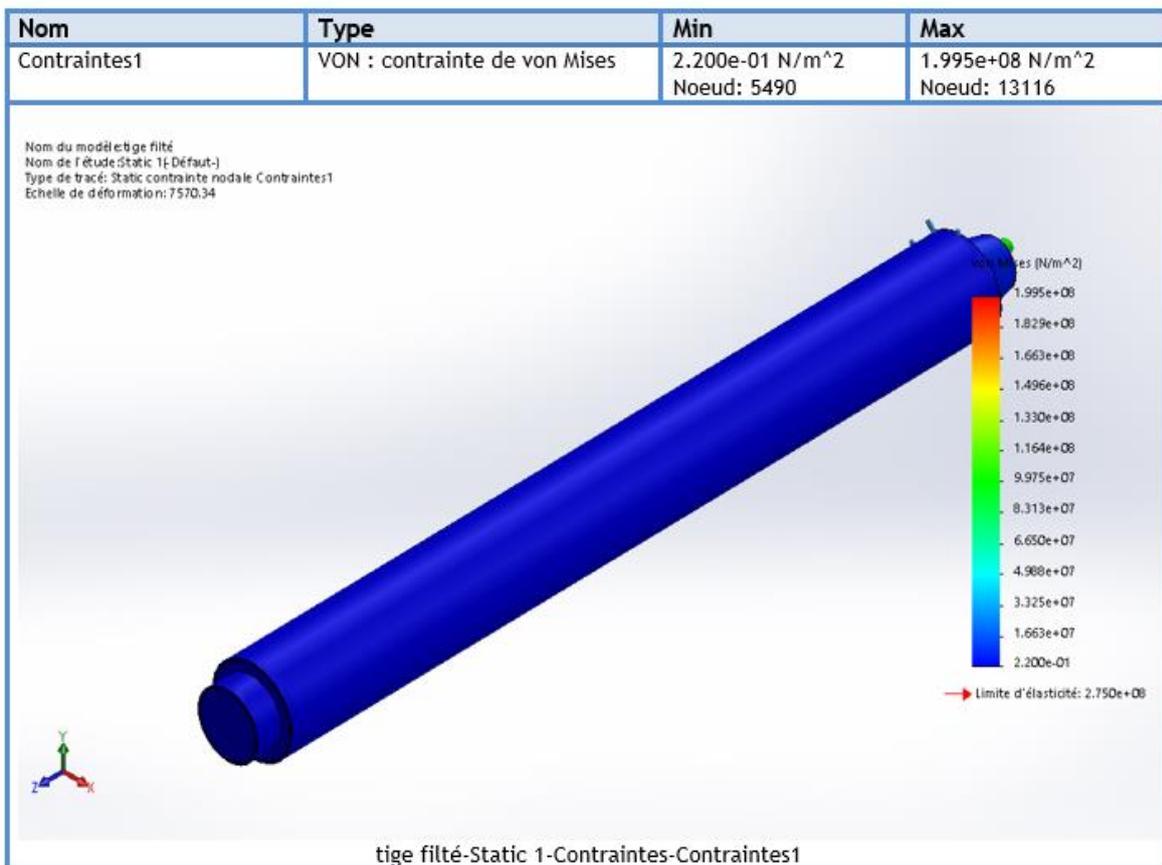


Figure IV-3 : Répartition des contraintes de Von Mises de la tige filetée

IV-2-2) Analyse des résultats d'essai de traction de la tige de rotation :

La figure (IV-4) montre l'état de déplacement (module des déplacements) de la tige de rotation après avoir effectué l'analyse du comportement élastique linéaire de celle-ci. Il s'avère que la pièce est décalée de sa position initiale avec un déplacement maximal de 0.04917 mm tout en appliquant un effort axiale suivant l'axe y.

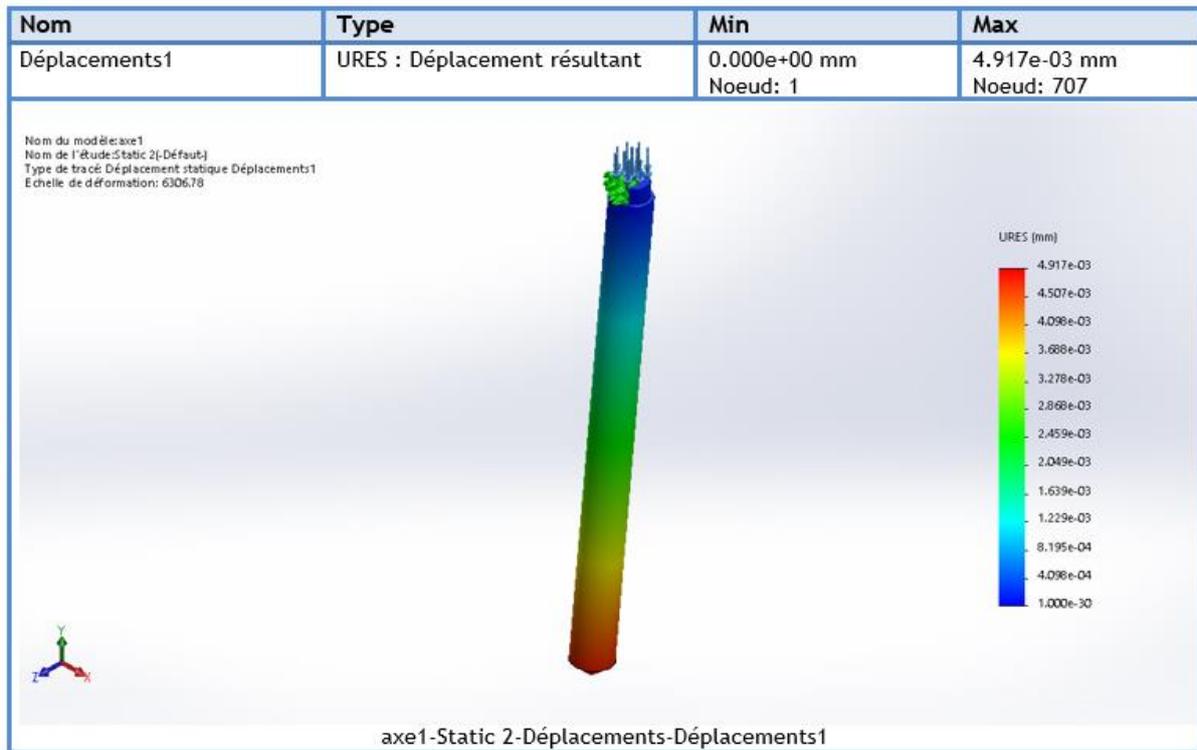


Figure IV-4 : Champ du module de déplacements de la tige de rotation (en traction)

Le champ de déformations suivant les directions x , y , z (ϵ_{ijk}) est présenté dans la figure (IV-5). Cette déformation représente l'état d'allongement ou de rétrécissement suivant les directions x , y , z . Nous remarquons que cette déformation est faible et elle ne dépasse pas la valeur de $1,915 \cdot 10^{-5}$ mm.

L'analyse effectuée dans ce cas est également de type statique linéaire. Un maillage d'environ 7396 éléments a été utilisé. L'affichage des contraintes induites par l'état de chargement considéré est indiqué par la figure (IV-6). Il s'avère que la répartition des contraintes de Von Mises est représentée dans l'ensemble par une couleur bleu foncée qui indique des contraintes qui ne dépassent pas $9 \cdot 10^5$ N/m². La couleur de la tête de la tige de rotation tend vers le vert ce qui indique des contraintes pouvant atteindre $35 \cdot 10^5$ N/m², et aussi on a remarqué que notre pièce ne tend pas vers le rouge, ceci montre grossièrement que la tige de rotation reste dans son domaine élastique.

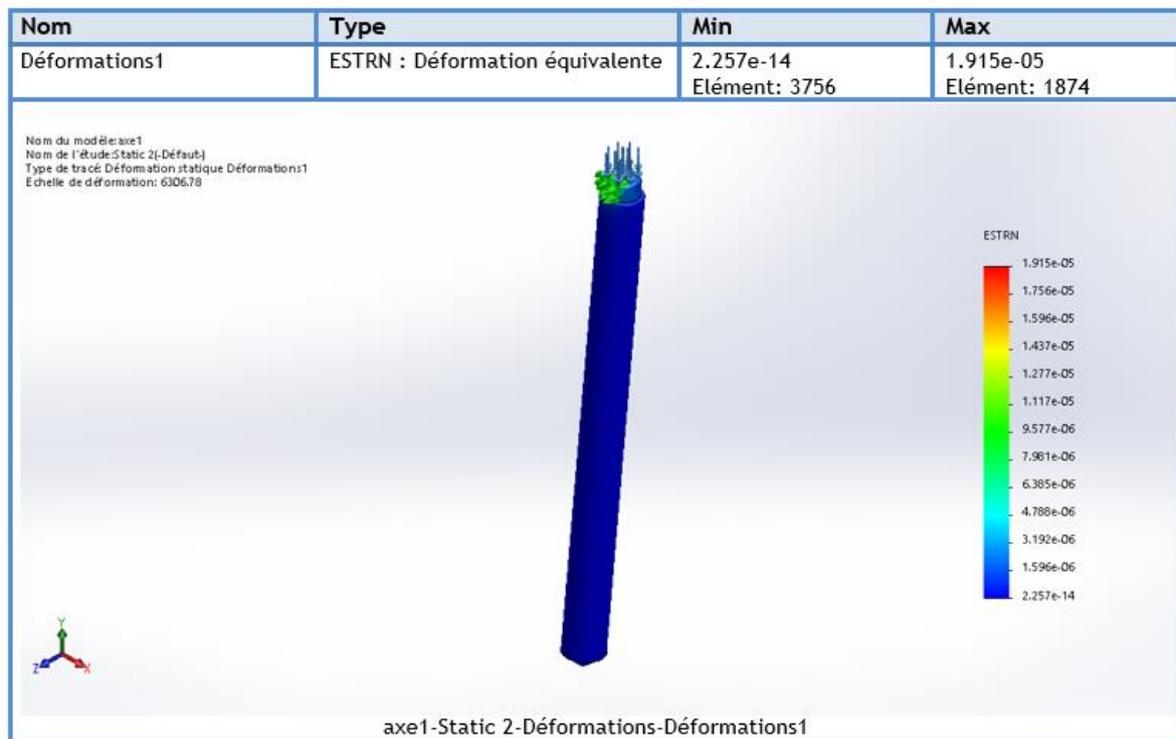


Figure IV-5 : Champ de déformation de la tige de rotation (en traction)

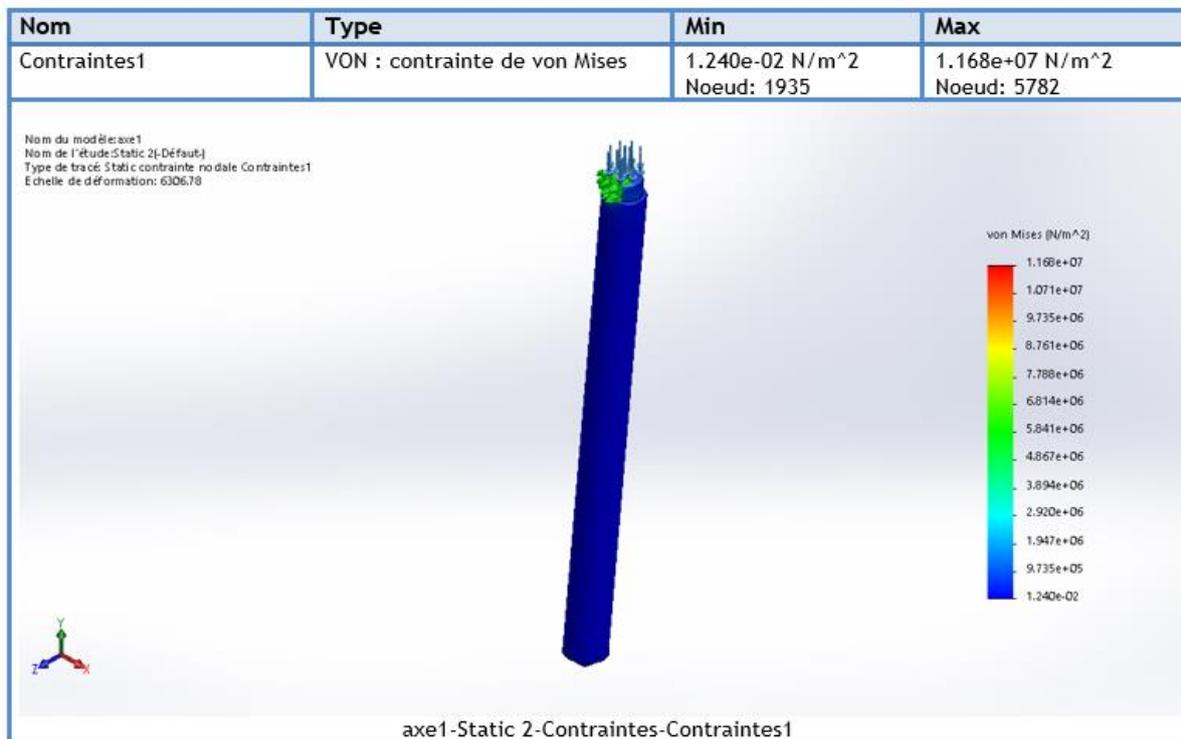


Figure IV-6 : Répartition des contraintes de Von Mises de la tige de rotation (en traction)

IV-2-3) Analyse des résultat d’essai de torsion de la tige de rotation :

La figure (IV-7) montre l’état de déplacement (module des déplacements) de la tige de rotation après avoir effectué l’analyse du comportement élastique linéaire de celle-ci. Il s’avère

que la pièce est décalée de sa position initiale avec un déplacement maximal de 0.00478 mm tout en effectuant une rotation autour de l'axe y.

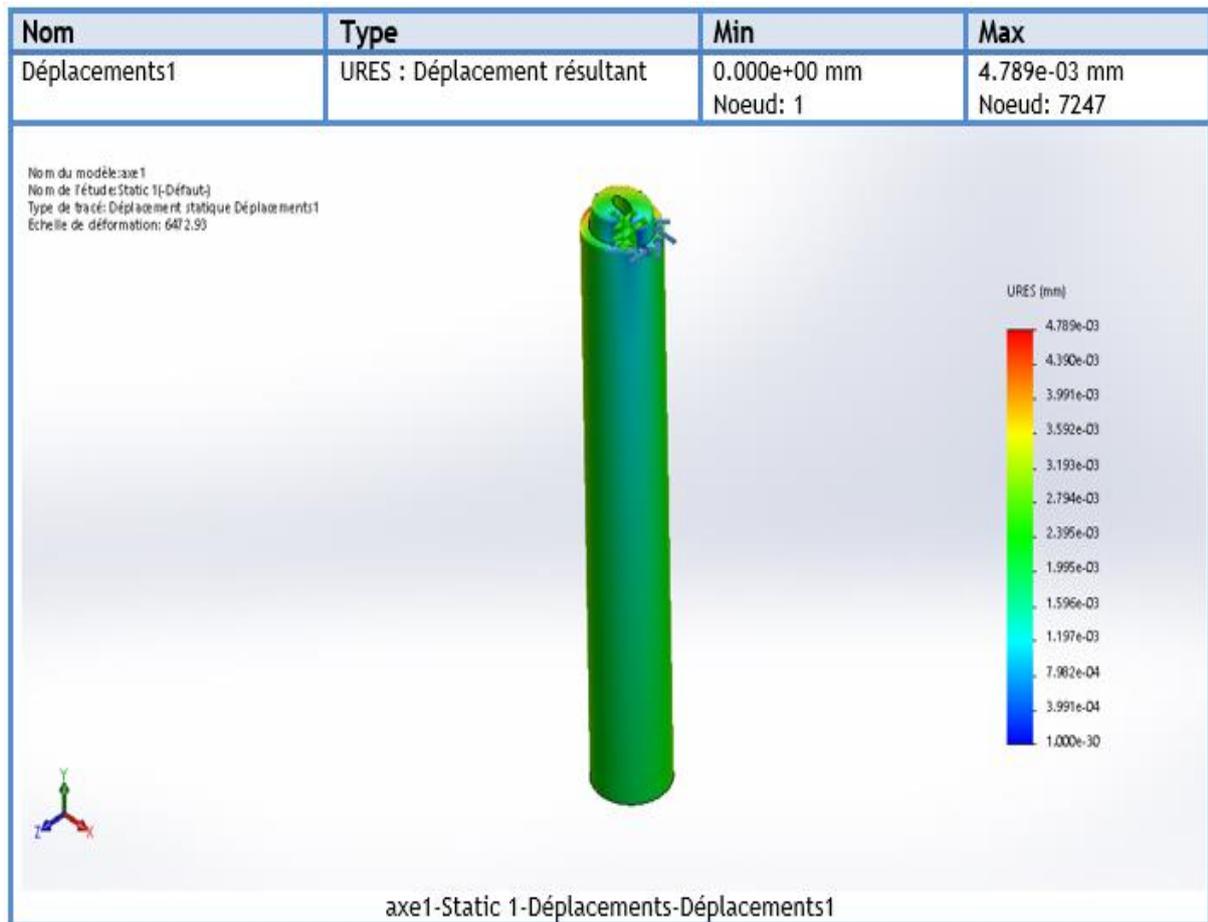


Figure IV-7 : Champ du module de déplacements de la tige de rotation (en torsion)

Le champ de déformations suivant les directions x , y , z (ε_{ijk}) est présenté dans la figure (IV-8). Cette déformation représente l'état d'allongement ou de rétrécissement suivant les directions x , y , z . Nous remarquons que cette déformation est faible et elle ne dépasse pas la valeur de $2,231.10^{-4}$ mm.

L'analyse effectuée dans ce cas est également de type statique linéaire. Un maillage d'environ 7600 éléments a été utilisé. L'affichage des contraintes induites par l'état de chargement considéré est indiqué par la figure (IV-9). Il s'avère que la répartition des contraintes de Von Mises est représentée dans l'ensemble par une couleur bleu foncée qui indique des contraintes qui ne dépassent pas 160.10^5 N/m². La couleur de la tête de la tige de rotation tend vers le vert ce qui indique des contraintes pouvant atteindre 600.10^5 N/m², et aussi on a remarqué que notre pièce ne tend pas vers le rouge, ceci montre grossièrement que la tige de rotation reste dans son domaine élastique.

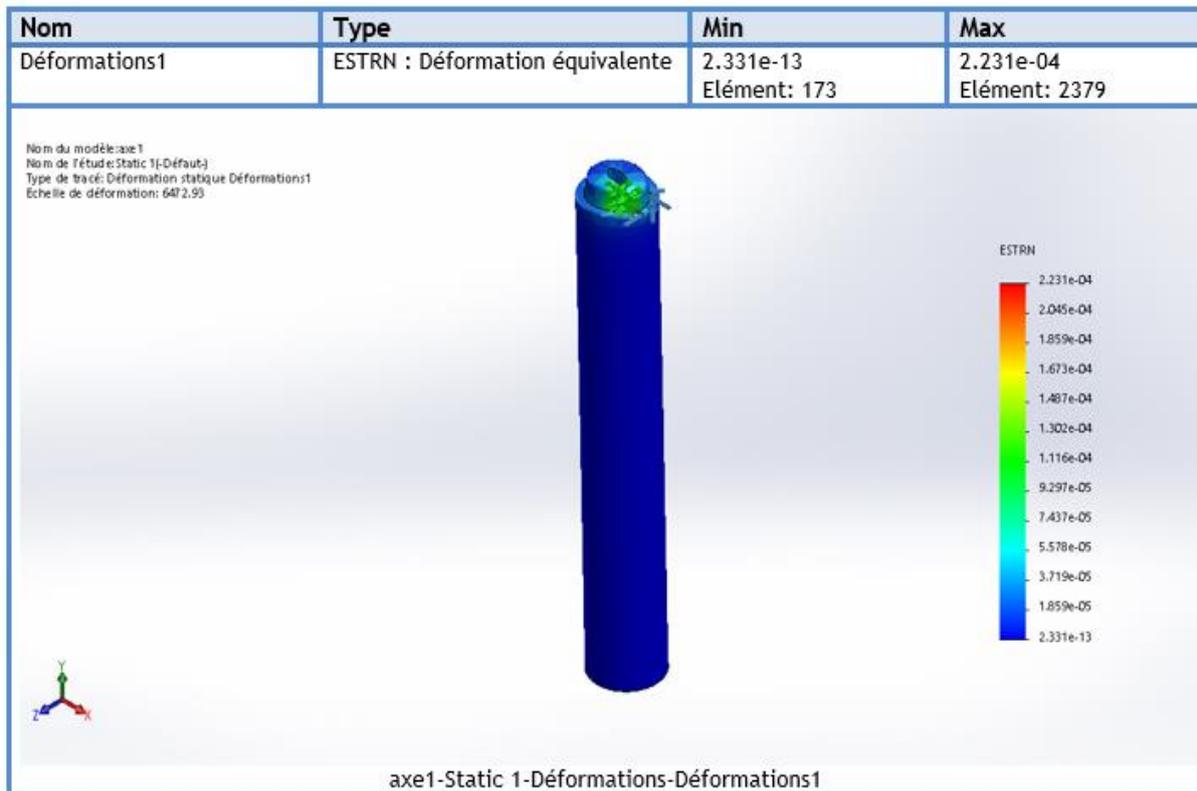


Figure IV-8 : Champ de déformation de la tige de rotation (en torsion)

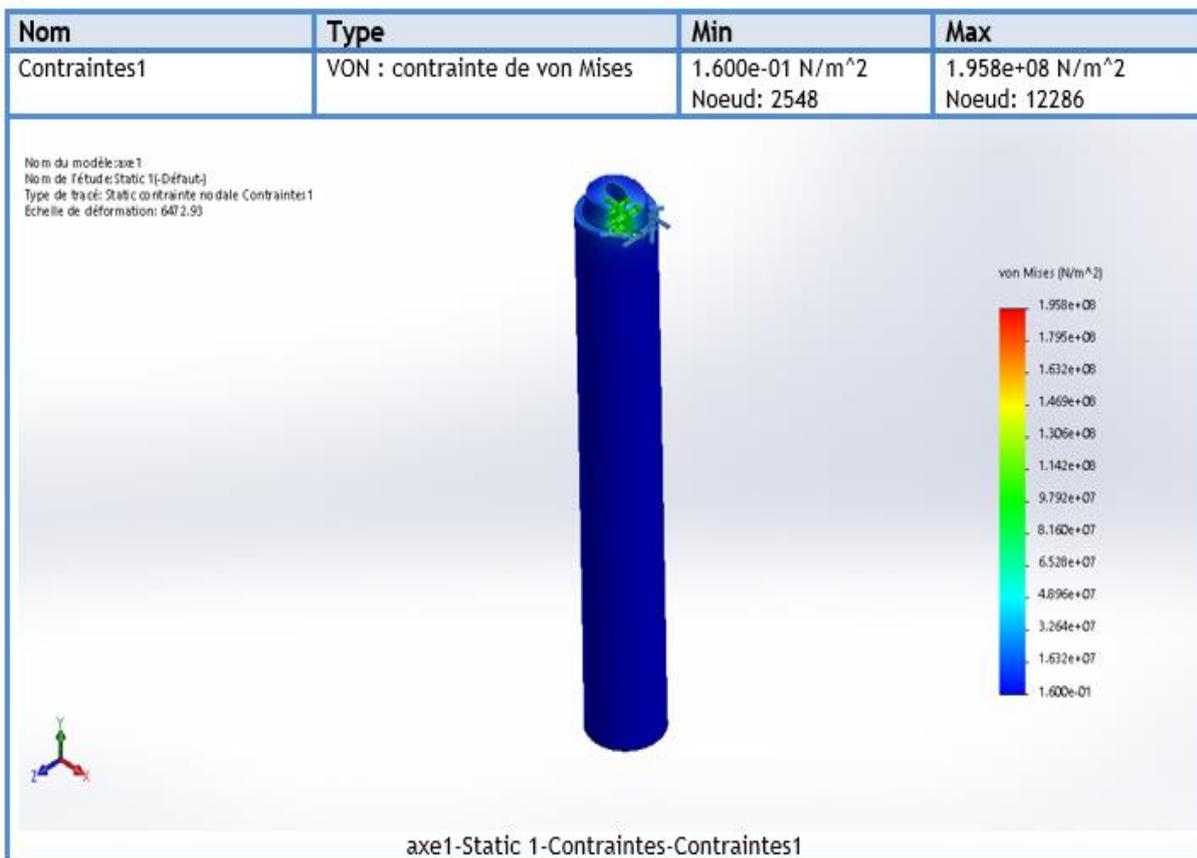


Figure IV-9 : Répartition des contraintes de Von Mises de la tige de rotation (en torsion)

IV-2-4) Analyse des résultats de la table mobile :

En ce qui concerne les efforts auxquels la table mobile est soumis, deux forces ont été considérées dans cette étude. La première est une force qui reflète la réaction de la partie taraudée de la partie prismatique de la table mobile. Cette réaction est générée suite à la transmission de l'effort tangentiel $F = 407,25$ N, qui est produit par le couple de torsion de la tige filetée $C_t = 16,29$ N.m vers le trou taraudé via la liaison filetage-taraudage. Cette réaction a été modélisée de telle manière à ce qu'elle soit répartie uniformément sur toute la partie taraudée de la bague de la table mobile. Une deuxième force de valeur 213,4 N est imposée également au table mobile. Cette dernière représente l'effort appliqué par la charge de la tige de rotation et lingot de silicium sur la table mobile lors la formation de lingot terminée.

La figure (IV-10) montre l'état de déplacement (module des déplacements) de la table mobile après avoir effectué l'analyse du comportement élastique linéaire de celle-ci. Il s'avère que la pièce est décalée de sa position initiale avec un déplacement maximal de 0.0339 mm tout en effectuant un effort axial autour de l'axe y et un effort tangentiel autour de l'axe x.

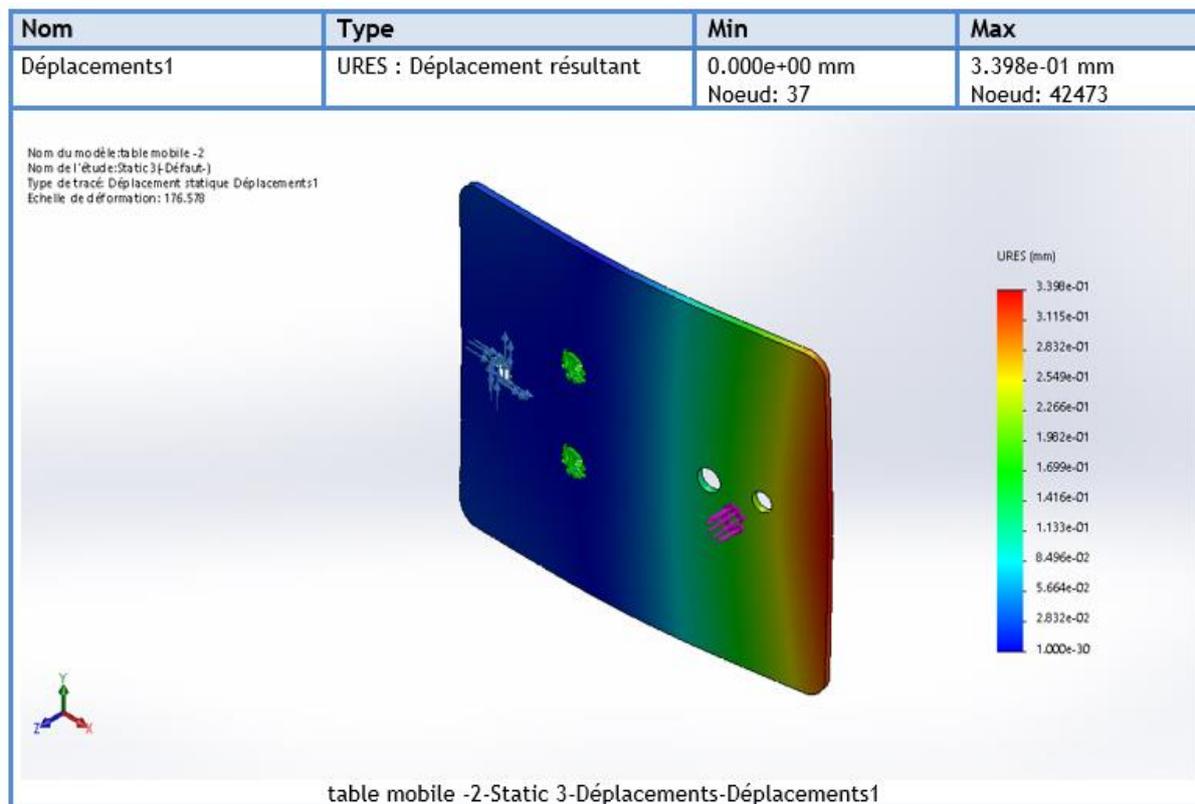


Figure IV-10 : Champ du module de déplacements de la table mobile

Le champ de déformations suivant les directions x, y, z (ϵ_{ijk}) est présenté dans la figure (IV-11). Cette déformation représente l'état d'allongement ou de rétrécissement suivant les

directions x, y, z. Nous remarquons que cette déformation est faible et elle ne dépasse pas la valeur de $5,195 \cdot 10^{-5}$ mm.

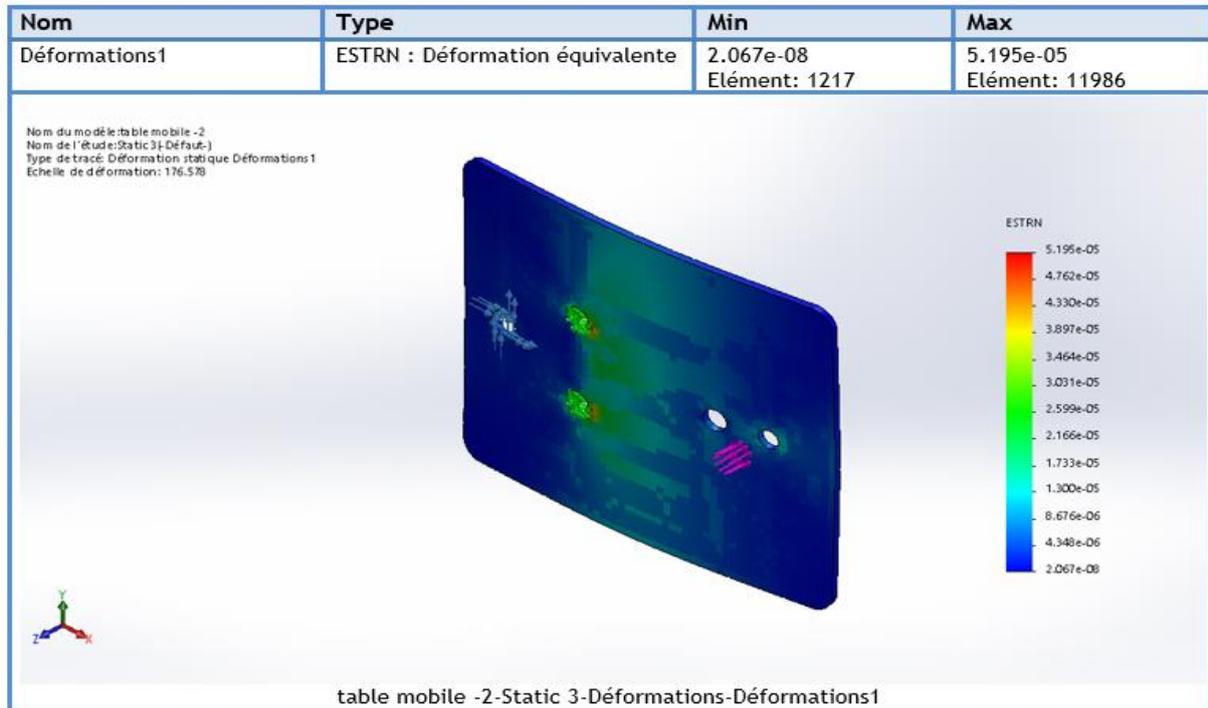


Figure IV-11 : Champ de déformation de la table mobile

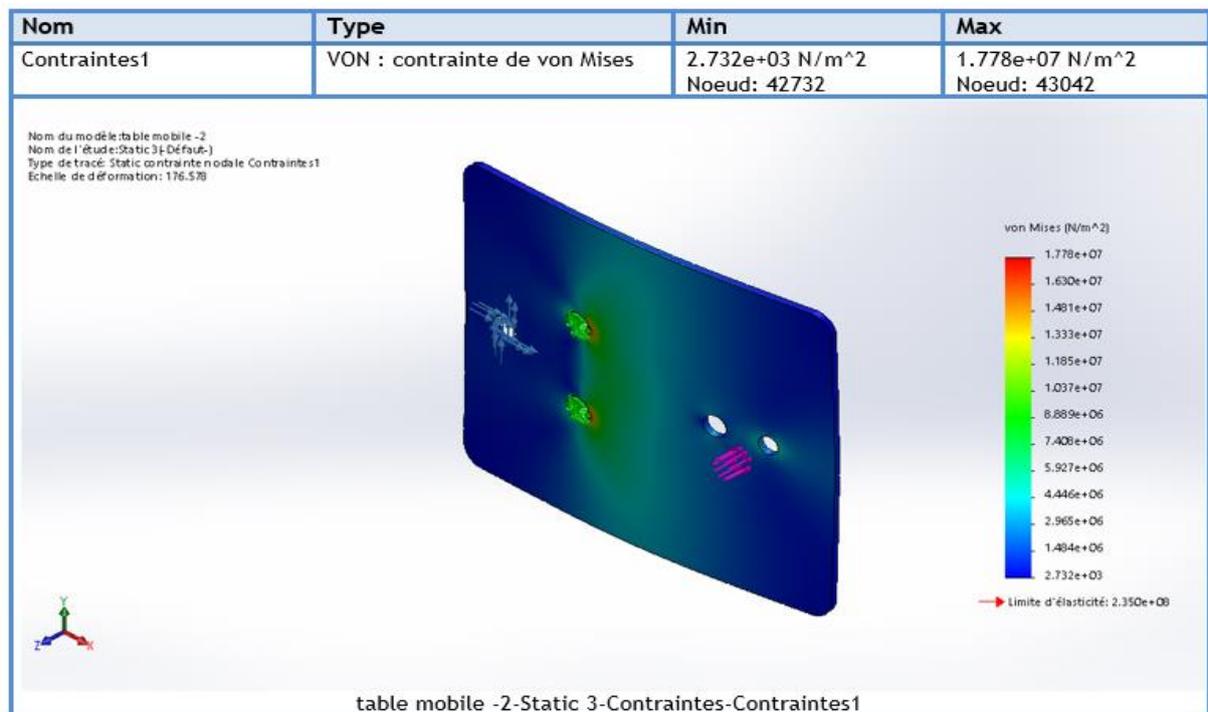


Figure IV-12 : Répartition des contraintes de Von Mises de la table mobile

L'analyse effectuée dans ce cas est également de type statique linéaire. Un maillage d'environ 23792 éléments a été utilisé. L'affichage des contraintes induites par l'état de chargement considéré est indiqué par la figure (IV-12). Il s'avère que la répartition des contraintes de Von Mises est représentée dans l'ensemble par une couleur bleu foncée qui indique des contraintes qui ne dépassent pas 14.10^5 N/m^2 . La partie de la couleur de la table mobile qui tend vers le vert ce qui indique des contraintes pouvant atteindre 55.10^5 N/m^2 , et la contrainte max est inférieure à la limite élastique, ceci montre grossièrement que la table mobile ne dépasse pas sa limite élastique.

IV-3) dévoilement de système finale :

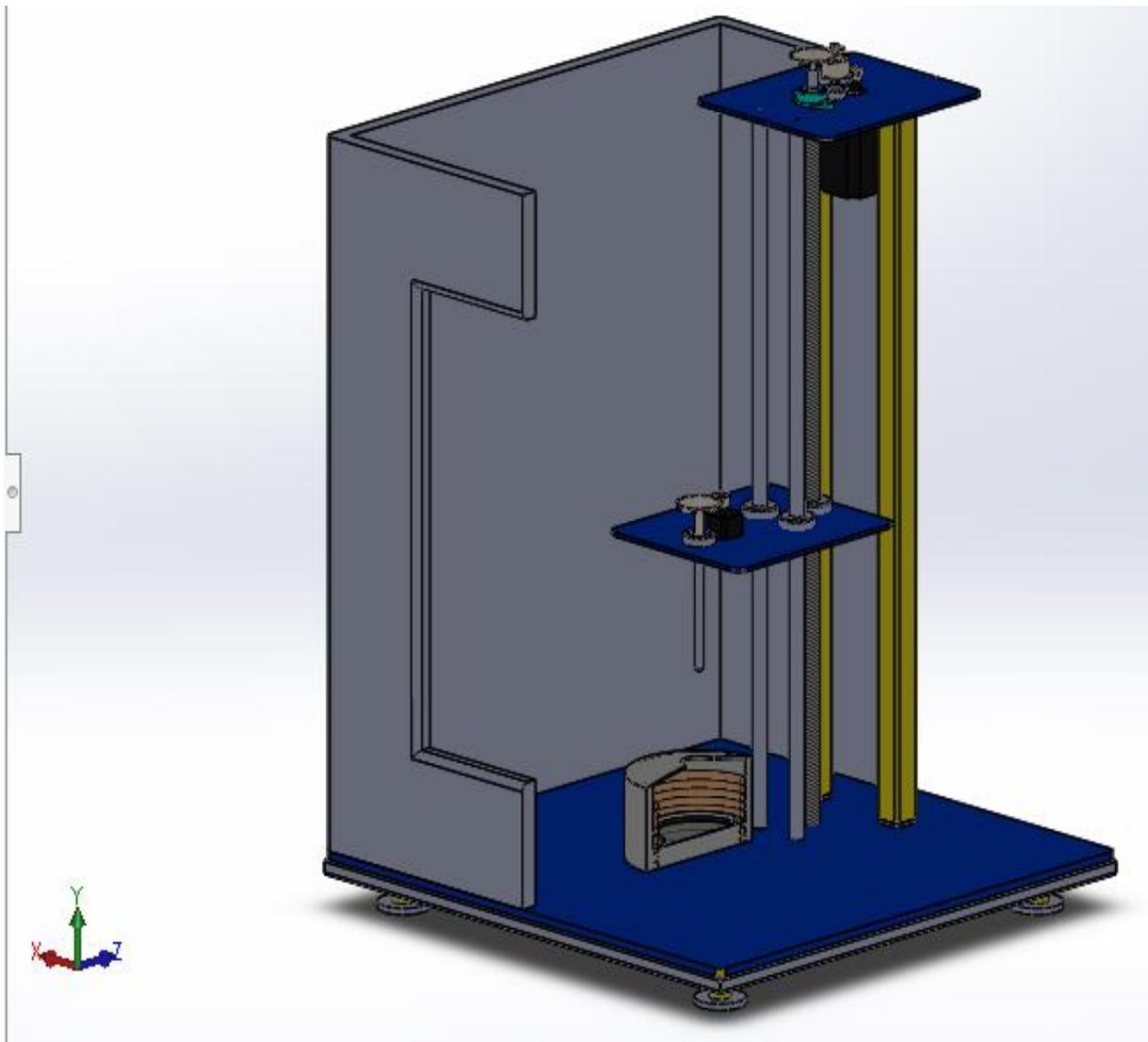


Figure IV-13 : photo de l'assemblage de système final en SolidWorks 2018

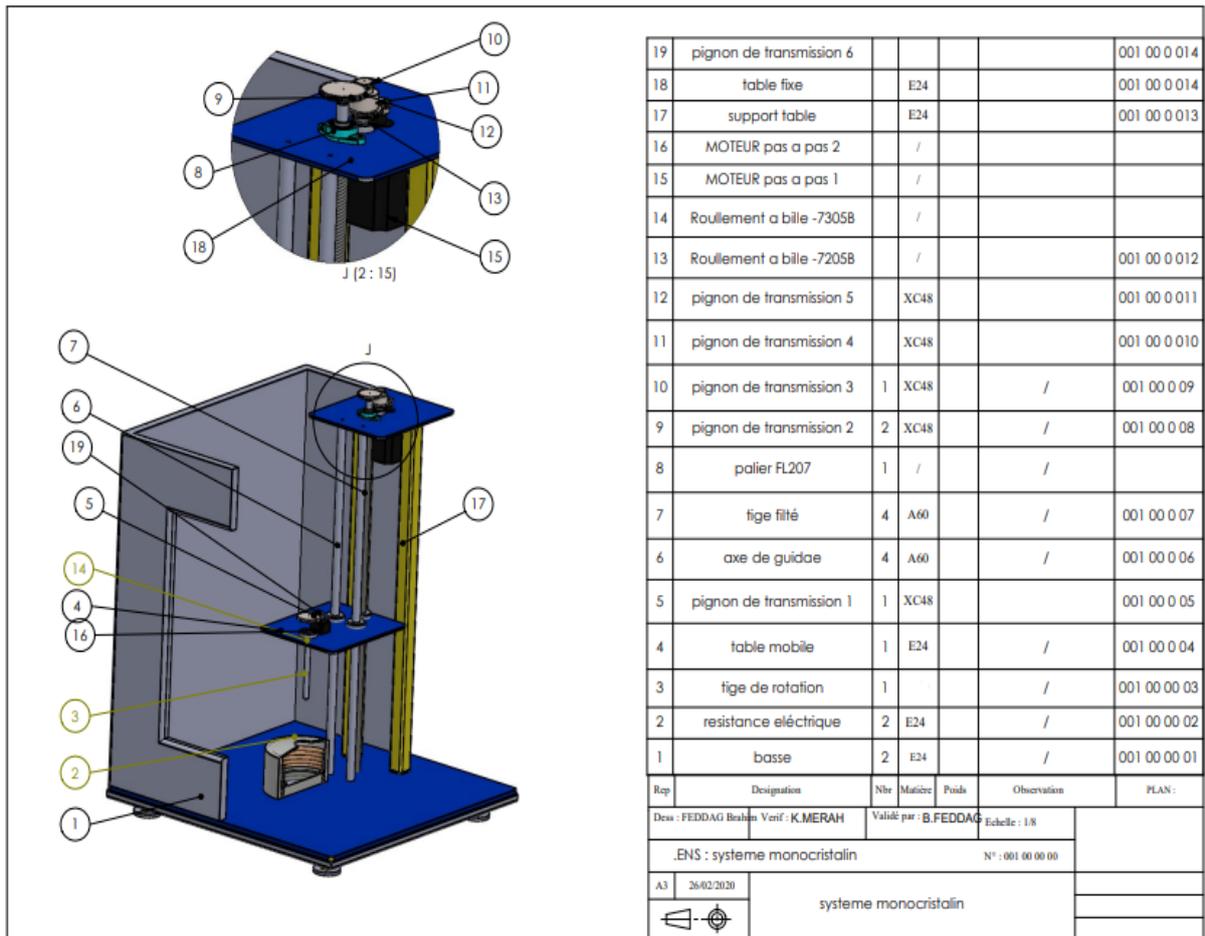


Figure IV-14 : Mise en plan de système final

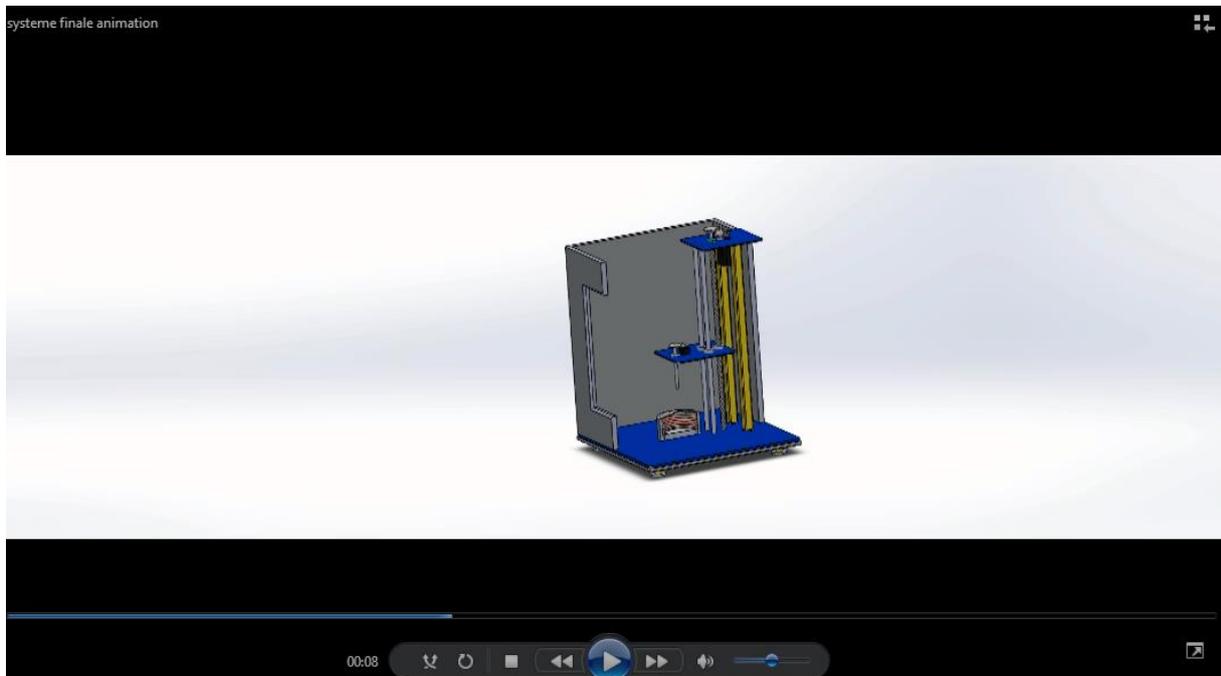


Figure IV-15 : Capteur d'écrans de la vidéo de fonctionnement de système final

Vous trouvez la vidéo en DVD rom, pour pouvoir justement prononcer le fonctionnement du notre système de tirage proposé.

IV-4) Conclusion :

Comme conclusions primordiales de ce travail, nous pouvons en citer les suivantes :

- Ce travail nous a initié aux sujets ayant trait aux problèmes liés à l'analyse des comportements mécaniques des structures métalliques via des logiciels d'analyse par éléments finis, en l'occurrence SolidWorks.
- La modalisation de la réponse élastique linéaire des différentes pièces composant le système de tirage de la croissance cristalline CZOCHRALSKI a montré que les déformations induites par l'état de chargement sont assez faibles pour pouvoir empêcher le bon fonctionnement de ce système.
- La visualisation des contraintes internes induites par les sollicitations extérieures a montré que celles-ci ne dépassent pas globalement la résistance élastique des matériaux à base desquelles les pièces sont fabriquées. Toutefois, ces pièces présentent quelques zones où il y a des concentrations des contraintes élevées pouvant induire des déformations plastiques, permanentes et irréversibles.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail était de proposer une conception technologique permettant de concevoir le système de tirage de croissance cristalline au procédé CZOCHRALSKI. Ce travail m'a été proposé par le promoteur Mr. MERAH Abdelkrim, dans le cadre de projet fin d'étude.

Le travail effectué dans le premier chapitre nous a permis de mieux comprendre les phénomènes de la croissance cristalline, la solidification, et l'influence de la température de solidification au cours de la transformation liquide vers solide est que, pour un matériau pur, les étapes de la solidification, et l'importance et l'influence de la germination sur la microstructure finale des cristaux ou du monocristal tiré. De même on a présentée la croissance et les principales techniques de la croissance cristalline en basent sur les méthodes utilisées pour l'élaboration des cristaux a grand diamètre. Après avoir rappelé compendieusement les principaux objectifs de ce travail, nous avons étudiés dans le deuxième chapitre la technique de croissance cristalline CZOCHRALSKI, et nous avons détaillés le mode et le principe de fonctionnement de cette technique par la description de son four et l'influence des vitesses sur les paramètres de la croissance, dans notre étude, on a trouvé que la méthode de CZOCHRALSKI a été utilisé par les chercheurs beaucoup plus pour la croissance du silicium pour son utilisation dans une large gamme de l'industrie moderne. Dans le troisième chapitre, nous avons dimensionnés les éléments de notre conception à l'aide d'un cahier charge qui le on a établi, ceci passe évidemment par un calcul de résistance mécanique des différentes pièces conçues au sein de leur mécanisme de fonctionnement. Enfin, le dernier chapitre concerne la modélisation numérique, la simulation et l'analyse par éléments finis, les pièces importantes de notre conception qui composent le mécanisme de tirage de la croissance cristalline CZOCHRALSKI (la tige filetée, la tige de rotation, et la table mobile). Ceci a été fait en utilisant de logiciel SolidWorks 2018.

Les résultats obtenus en troisième chapitre ont montré que la table mobile a résiste bien à la flexion. De plus, la résistance à la traction et à la torsion de la tige de rotation a été également vérifiée.

Le dernier chapitre qui concerne la modalisation numérique des pièces conçues nous a permis d'avoir une initiation aux sujets ayant trait aux problèmes liés à l'analyse des comportements mécaniques des structures métalliques via des logiciels d'analyse par éléments finis, en l'occurrence SolidWorks. La modalisation de la réponse élastique linéaire des

Conclusion générale

différentes pièces composant le système de tirage de la croissance cristalline CZOCHRALSKI a montré que les déformations induites par l'état de chargement sont assez faibles pour pouvoir empêcher le bon fonctionnement du système de freinage. De plus, La visualisation des contraintes internes induites par les sollicitations extérieures a montré que celles-ci ne dépassent pas globalement la résistance élastique des matériaux à base desquelles les pièces sont fabriquées. Néanmoins, ces pièces présentent quelques zones où il y a des concentrations des contraintes élevées pouvant induire des déformations plastiques, permanentes et irréversibles.

Bibliographies

- [1] : C. Morand, contribution à l'étude de la cristallisation du sel de Glauber ; école polytechnique fédérale. Zurich, 1959. [1] C. Morand, contribution à l'étude de la cristallisation du sel de Glauber ; école polytechnique fédérale. Zurich, 1959.
- [2] : B. Muceddu, Observateur pour un procédé de cristallisation en batch, université de Lyon, 2011.
- [3] : Méthode de fabrication des pierres synthétique et artificielles, germes synthèse & imitation.
- [4] : Pierres Papon. Jaucques Leblond. Physique de transition de phases.
Paul.H.E. Meijer.Mai 1999.
- [5] : Benahmed Benabdallâh Nadia. Propriété physique des semi-conducteurs (Si et monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe.
- [6] : Charles Kittel. Physique de l'état solide. Dunod, Paris, 1998.ISBN 2 10 003267 4.
Ystal G.
- [7] : Marina Marchenko. C. R. Mécanique 335 (2007) 315-322.
- [8] : W.C. WINEGARD. Introduction à la solidification des métaux. DUNOD. Paris1971.
- [9] : M. Patric Roux. Modélisation de la Solidification Colonnaire et Equiaxe De Mélanges Binaires. Paris. Décembre 2000.
- [10] : Patricia Dery. Etude de la croissance des grains à l'aide d'un appareil de mesure électrique. L'université de Québec à Chicoutimi. Aout 2001.
- [11] : A. oçafon, mise en œuvre et utilisation de la méthode de l'échangeur de chaleur pour obtention des monocristaux à application spécifique et céramique supraconductrice orientées , université de bordeaux 1 ,1995.
- [12] : S. Lamine, étude expérimental et thermodynamique du procédé de mouillage appliqué aux semi-conducteurs, institut national polytechnique de Grenoble 2008.
- [13] : omega-crystal.com/en/technology/Krypoulos_method-1.html.

[14] : Méthode d'élaboration de cristaux massifs pour l'optique. Bernard Ferrand. LETI/DOPT/SCOPI/LCDO/Matériaux/CEA-Grenoble 17 rue des Martyrs, F-38054 GRENOBLE CEDEX 9, FRANCE

Bernard.ferrand@cea.fr

<http://www-leti.cea.fr>

[15]: N. Ye, Z. Weng, B. Wu, and C. Chen, (Two new nonlinear optical crystals $\text{BaAl}_2\text{B}_2\text{O}_7$ and $\text{K}_2\text{Al}_2\text{B}_2\text{O}_7$), Electro-Optic Second Harmon. Gener. Mater. Devices Appl. II, 3556, pp. 21-23, 1998.

[16] : Z. S. Lin, L. F. Xu, L. Liu, J. Xu, M. H. Lee. Fang, and C. Chen, (Eliminating ultraviolet optical absorption through Fe-impurity engineering: Ab initio study of the nonlinear optical crystal $\text{K}_2\text{Al}_2\text{B}_2\text{O}_7$), Phys. Rev. B, 82, pp. 035124_1-035124_6, 2010.

[17]: C. Zhang, J. Wang, X. Hu, H. Jiang, Y. Liu, and C. Chen, (Growth of large $\text{K}_2\text{Al}_2\text{B}_2\text{O}_7$ crystals), J. Cryst. Growth, 235, pp. 1-4, 2002.

[18]: C. Zhang, J. Wang, X. Hu, H. Liu, J. Wei, Y. Liu, Y. Wu, and C. Chen, (Top-seeded growth of $\text{K}_2\text{Al}_2\text{B}_2\text{O}_7$), J. Cryst. Growth, 231, pp. 439-441, 2001.

[19]: Z. Hu, T. Higashiyama, M. Yoshimura, Y. Mori, and T. Sasaki, (Flux growth of the new nonlinear optical crystal: $\text{K}_2\text{Al}_2\text{B}_2\text{O}_7$), J. Cryst. Growth, 212, pp. 368-371, 2000.