



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI, TIZI-OUZOU**

**FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER**

**EN GENIE MECANIQUE**

**SPECIALITE : FABRICATION MECANIQUE ET PRODUCTIQUE**

**THEME**

**Conception et réalisation d'un four  
de frittage**

**Présentée par :**

ABDI Belkacem

**Proposé et dirigé par :**

Mr DJEBALI S

**Membre de juré :**

**Président de jury :** Mr ALMANSBA M. professeur, UMMTO

**Examineur :** Mr BELDI M. M.C.B, UMMTO

**Promoteur :** Mr DJEBALI S. M.C.A, UMMTO

**co-promoteur :** Mr NECHICHE M. M.C.A UMMTO

**Promotion : 2022-2023**

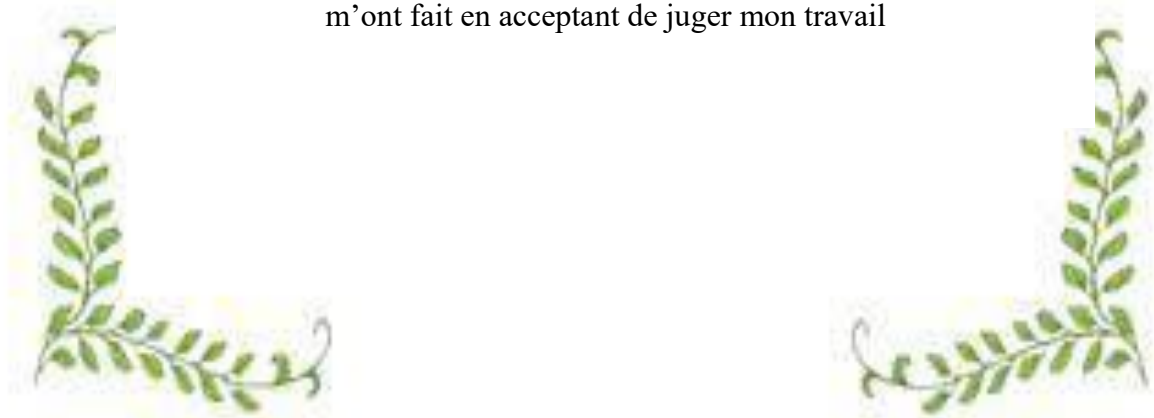


## Remerciements

Je remercie avant tout Allah le tout puissant de m'avoir guidé et donné la volonté, la force et le courage pour réaliser et mettre au point ce mémoire de fin d'études. « الحمد لله »

Je tiens aussi à remercier et à exprimer toute ma reconnaissance envers tous nos enseignants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leur soutien et leurs critiques constructives ont contribué à alimenter mes réflexions, en particulier mon promoteur Mr DJEBALI.S et mon co-promoteur Mr NECHICHE.M pour leurs patience, leurs disponibilité et surtout pour leurs judicieux conseils et orientations prodigues tout au long de la réalisation de ce mémoire de fin d'étude, ainsi que pour tout le temps qu'ils m'ont consacré.

Je remercie chaleureusement les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger mon travail





## *Dédicace*

### **Je dédie ce mémoire à :**

A ma mère, pour son amour, sa générosité, sa patience, et pour avoir été de bon conseil pendant toutes ses années, A la mémoire de mon cher papa que dieu le garde dans son vaste paradis.

A mes sœurs, Hanna et Amina.

A mon ami Belaid.

Toutes les personnes qui m'ont aidé à réaliser ce travail.





**Listes  
des figures**

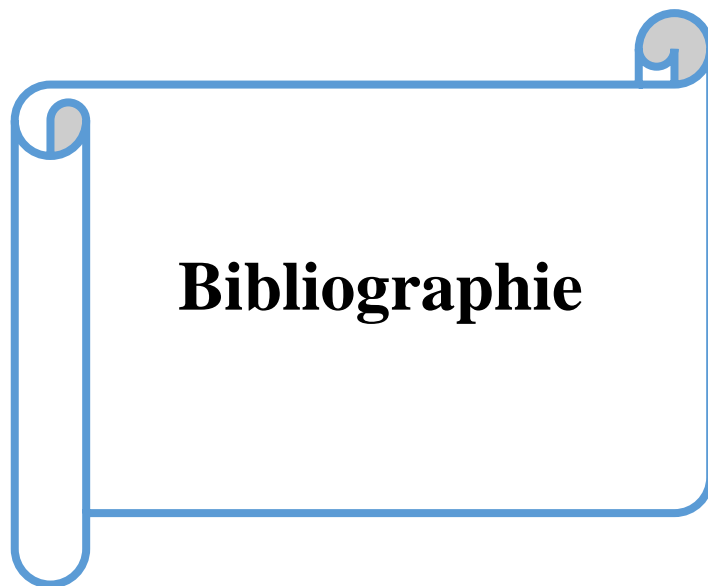
# Liste des figures

## Chapitre I :

<b>Figure 1:</b> polymere des polystyrènes .....	4
<b>Figure 2:</b> Architecture atomique des polymères.....	5
<b>Figure 3:</b> types des polymères. ....	6
<b>Figure 4:</b> le comportement thermique des polymères .....	7
<b>Figure 5:</b> température de transition vitreuse .....	8

## Chapite II :

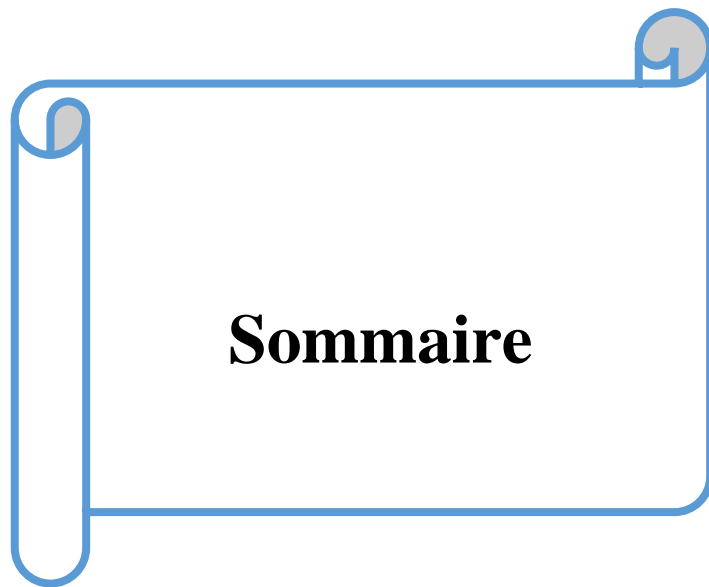
<b>Figure 1:</b> Evolution de la densité relative au cours des étapes de densification lors d'un frittage isotherme. ....	13
<b>Figure 2:</b> différents types de frittage .....	14
<b>Figure 3:</b> Schématisation du procédé de frittage en phase solide .....	14
<b>Figure 4:</b> Les étaês de frittage en phase liquide .....	15



# Bibliographie

## Références bibliographiques

- [1] J, Rault. Les polymères solides. Amorphes, élastomères, semi-cristallins, Cépaduès-Editions, Toulouse (2002).
- [2] J, M. Haudin. Structures et morphologies des polymères semi-cristallins », in C. G'Sell et J.M. Haudin (éditeurs), Introduction à la mécanique des polymères, Presses de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy (1995) pp 97-115.
- [3] G.Cizeron. Le frittage sous son aspect physico-chimique. Extrait de l'industrie céramique, vol. 611 n°10,713-729 , 1968.
- [4] German R.M. Sintering theory and practice. John Wiley and sons, New- York, 1996.
- [5] Bonnet J. P., Bernache-Assolan D. Frittage : Aspect physico chimique – Partie 1: frittage en phase solide. Technique de l'ingénieur, AF 6 6620, 2005.
- [6] L olmos: étude de frittage de poudre par microtomographie in situ et modélisations Discrete. genie des procédés. institut national polytechnique de gronoble-inpg, 2009
- [7] sintering theory and practice R,M, german , et john wily and son
- [8] D.Bernache-Assolant, « Le frittage des céramiques et des métaux : Deuxième partie, Le frittage en phase liquide ». L'industrie céramique et verrière, vol.932, pp.871-874 (décembre 1997).
- [9] J.W.Cahn, R. B. Heady, Met. Trans.,vol.1, pp.185-190, 1970
- [10] M. Eudier : fabrication des produits frités. M864 .Techniques de l'ingénieur.
- [11] E. H. Rabin. A Bose and R. M. German, Reactive Sintering Nickel- Aluminide to Near density, Powder metallurgy international, Vol. 20, n°3, 1988.
- [12] C. Lea , B.C. Muddle, D.V. Edmonds, segregation to interface boundaries in liquid phase sintering tungsten alloys, metallurgical transactions A, Vol. 14A, pp.667-677, 1983.



# Sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

## **Partie 01 : Etude théorique**

### **Chapitre I : GENERALITES SUR LES POLYMERES**

<b>Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>Définitions.....</b>	<b>4</b>
<b>2-Les polymères.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1- Généralités sur les polymères.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2- Définition.....</b>	<b>5</b>
<b>2.3- Différents types de polymères.....</b>	<b>5</b>
<b>2.3.1- Les homopolymères.....</b>	<b>5</b>
<b>2.3.2- Les copolymères.....</b>	<b>5</b>
<b>2.4- Généralités sur le comportement thermique des polymères.....</b>	<b>6</b>
<b>2.4.1-Température de transition vitreuse.....</b>	<b>7</b>
<b>2.4.2-Etat vitreux.....</b>	<b>7</b>
<b>2.4.3-Zone de transition.....</b>	<b>7</b>
<b>2.4.5-Zone caoutchoutique.....</b>	<b>8</b>
<b>2.4.5-Zone fluide.....</b>	<b>8</b>
<b>2.5- Les conditions d'utilisation.....</b>	<b>8</b>
<b>3-Les Plastiques.....</b>	<b>9</b>
<b>3.1- Définition.....</b>	<b>9</b>
<b>3.2- Différents types des matières plastiques.....</b>	<b>9</b>
<b>3.2.1- Les thermodurcissables.....</b>	<b>9</b>
<b>3.2.2- Les thermoplastiques.....</b>	<b>10</b>
<b>3.2.3- Les élastomères.....</b>	<b>10</b>
<b>4- Matériaux métallique.....</b>	<b>10</b>
<b>5-Conclusion.....</b>	<b>10</b>

### **Chapitre II : FRITTAGE**

<b>1. Introduction.....</b>	<b>12</b>
<b>2. Définition.....</b>	<b>12</b>
<b>3. Frittage des polymères.....</b>	<b>12</b>
<b>4. Différentes étapes de frittage.....</b>	<b>13</b>
<b>5. Types de frittage.....</b>	<b>14</b>

5.1 Frittage en phase solide.....	14
5.2 Frittage en phase liquide.....	15
5.3. Le frittage Naturel.....	16
5.4. Le frittage sous charge.....	16
6. Frittage réactif .....	17
7. Paramètres influençant le frittage .....	17
7.1- Atmosphère de frittage .....	17
7.2- Température et durée du frittage.....	17
7.3- La structure géométrique des particules de poudre .....	18
7.4- La densité des comprimés de poudres.....	18
7.5- La vitesse de chauffage .....	18
7.6- Impuretés .....	18
8. APPLICATIONS.....	18
8.1- Fabrication de pièces métalliques.....	19
8.2- Fabrication de céramiques .....	19
8.3- Fabrication de poudres métalliques .....	19
8.4- Fabrication additive.....	19
8.5- Applications médicales et dentaires .....	19
9- Les types de fours de frittage .....	20
9.1- Four de frittage en atmosphère contrôlée.....	20
9.2- Four de frittage sous vide .....	20
9.3- Four de frittage par micro-ondes .....	20
9.4- Four de frittage à lit fluidisé .....	20
9.5- Four de frittage à haute température .....	20
10. CONCLUSION.....	21

## 2ème partie : CONCEPTION DU FOUR

### DESCRIPTION DU FOUR

1. Introduction .....	22
2. Fonctionnement du four .....	22
3- Description du four .....	23
4. Présentation des éléments constitutifs .....	24
1. La cuve ou corps du four .....	24
1.1- Couvercle de la cuve .....	25

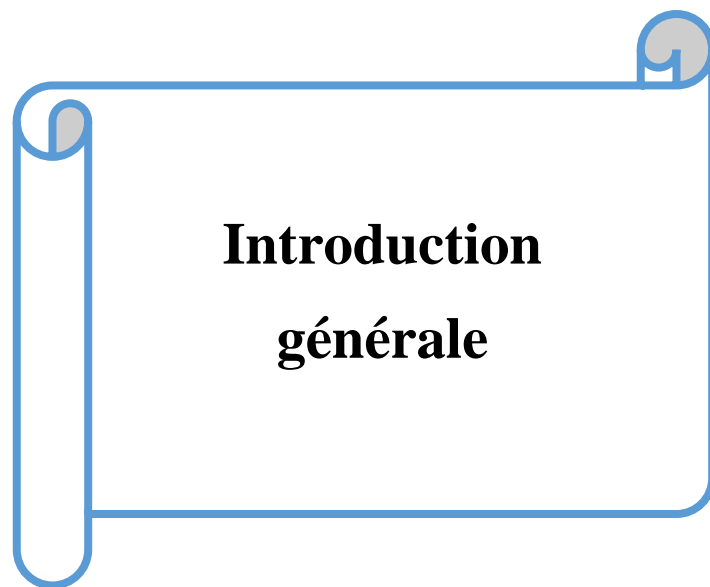
1.2- Système de refroidissement.....	26
1.3- Guide de thermocouple.....	26
1.4- Guide du câble électrique .....	26
1.5- Guide de la buse de mise sous vide .....	27
1.6- Bras de levage du couvercle .....	27
1.7 - Brique réfractaire .....	27
2. Le système d'ouverture du four .....	28
2.1- Volant .....	28
2.2- Vis de manœuvre.....	28
2.3- Fourreau et manette de guidage .....	29
2. 4- Corps .....	29
2.5- Bague de guidage et clavette .....	29
3. La table du four .....	30
3.1- Support réglable de la cuve .....	30
3.2- Système de fixation de la cuve.....	31
4- Principales caractéristiques techniques .....	31
5- Conclusion .....	31

### **3ème partie : REALISATION ET VALIDATION**

#### **REALISATION ET MISE A L'ESSAI**

1-Dessins de définitions .....	36
2-Fiche technique du four de frittage .....	36
2.1- Principales caractéristiques techniques .....	36
2.2- Eléments de contrôle du four .....	36
3-Mode d'emploi du four de frittage .....	39
4-Mise à l'essai du four .....	39
5-Conclusion .....	40
Conclusion générale.....	42

#### **Mises en plan**



**Introduction  
générale**

# Introduction générale

Un four de frittage est un dispositif utilisé pour réaliser un traitement thermique d'un compacté de poudre (poudre métallique, céramique, polymère) selon un cycle de température bien déterminé. Vu la nature pulvérulente des matériaux à traiter et les hautes températures de frittage, le cycle thermique doit être le plus précis possible pour réduire au maximum les différences de températures entre les différents points de l'échantillon.

Aussi, les faibles granulométries (quelques micromètres) des particules de poudres et leur forte réactivité, notamment à hautes températures, les traitements thermiques de frittage doivent être réalisés, généralement, sous une atmosphère inerte ou protectrice. Le four de frittage nécessite par conséquent de puissants éléments chauffants, une bonne isolation thermique et un système de régulation du cycle de température suffisamment précis. De plus, le dispositif de contrôle de l'atmosphère de frittage doit être fiable pour réduire au maximum l'influence de la présence d'impuretés sur l'échantillon.

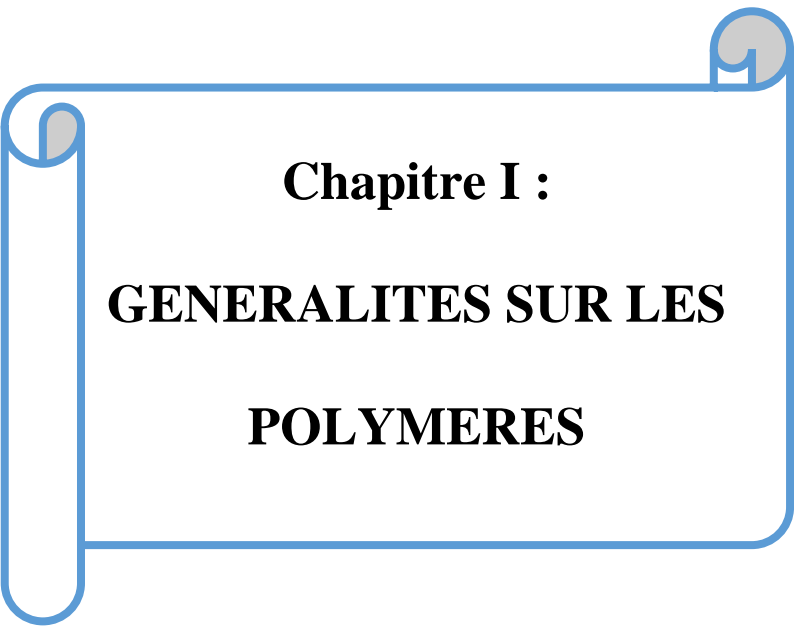
L'objet de la présente étude est la conception et la réalisation d'un four de frittage de poudres de polymères. Ce projet a pour objectif de répondre à un besoin formulé par l'équipe de recherche « Elaboration des matériaux par métallurgie des poudres ». Vu l'urgence de la demande et la nécessité d'optimiser les dépenses nous nous sommes imposé l'introduction d'un maximum de composants de récupération dans notre conception.

Notre mémoire est composé de trois parties :

- Une étude théorique dans laquelle nous présentons une synthèse bibliographique sur les polymères et les plastiques au premier chapitre et des généralités sur le frittage au deuxième chapitre.
- Une deuxième partie consacrée à la conception du four dans laquelle nous présentons les différentes solutions technologiques retenues et la fiche technique du four.
- La réalisation du four et sa mise à l'essai sont exposées dans la troisième partie. Dans un premier temps, nous y présentons les plans des différentes pièces à fabriquer et, ensuite la mise à l'épreuve du four pour laquelle nous donnons le mode opératoire et les différents réglages pour réaliser un cycle thermique. Nous testerons l'étanchéité de la chambre de chauffage, l'efficacité du système de refroidissement et la robustesse du système de régulation de la température (réponse du système comparée à la consigne instantanée lors du cycle thermique).

Nous terminons notre manuscrit par une conclusion générale et des perspectives.

**1ÈRE PARTIE**  
**ETUDE THEORIQUE**



**Chapitre I :**  
**GENERALITES SUR LES**  
**POLYMERES**

# Chapitre I - GENERALITES SUR LES POLYMERES

## 1- Introduction

Les polymères thermoplastiques sont des matériaux largement utilisés dans de nombreux domaines tels que l'automobile, l'emballage et l'électronique. Ils peuvent être ramollis et remodelés plusieurs fois grâce à la chaleur, sans se dégrader chimiquement.

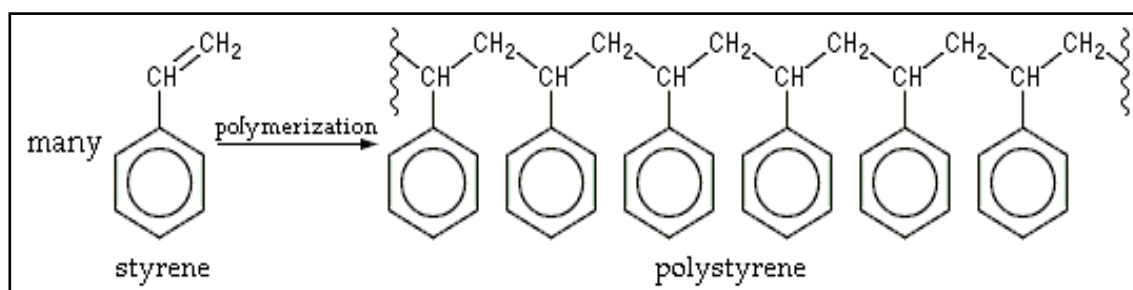
## 2- Les polymères

### 2-1- Généralités sur les polymères

Les polymères sont des macromolécules (généralement organiques) formées en joignant par covalence une ou plusieurs unités individuelles appelées monomères. Il se forme de longues chaînes qui sont reliées entre elles par les forces de Van Der Waals. Il existe trois types de polymères ; les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

L'amidon, la cellulose, la soie et l'ADN sont des exemples de polymères naturels, et le nylon, le polyéthylène et la bakélite sont des polymères synthétiques qui résultent d'une polymérisation.

Exemple : le polystyrène est un polymère formé par l'union de nombreux monomères qui sont les styrènes. «  $n$  » étant le degré de polymérisation.



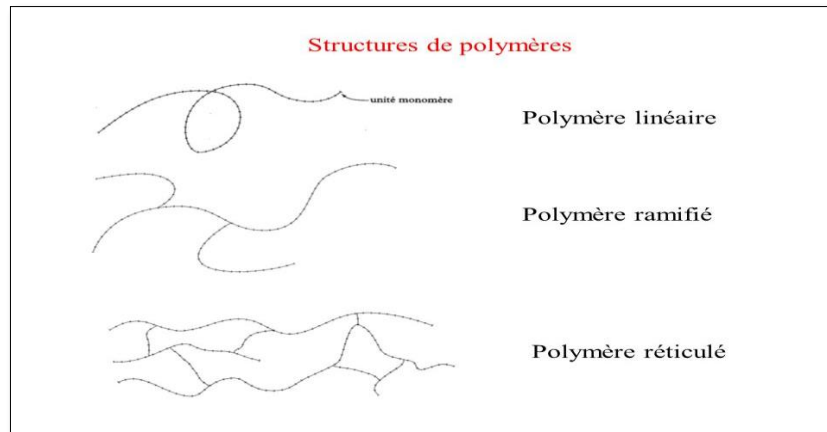
**Figure 1 : polymère des polystyrènes**

Pour synthétiser des composés en polymères, il faut unir des composés en basses molécules au moyen de la température, la pression ou le catalyseur. Cette réaction est appelée (Polymérisation). Les procédés les plus employés actuellement pour former des polymères à partir des basses molécules sont la Polycondensation et la Polyaddition. Il y a en outre la copolymérisation et la polymérisation par fission de chaîne.

Lorsque des polymères sont formés, il existe trois structures moléculaires communes, réticulée, linéaire et ramifiée. La réticulation se produit lorsqu'un matériau thermodurcissable polymérise ou durcit et que les molécules se lient entre elles dans un réseau ou une bande souvent comparées à la toile d'araignée. Une molécule linéaire ressemble à une corde avec très peu de branches latérales. Elles peuvent être empilées ensemble sans interaction avec les branches latérales. D'autre part, les molécules ramifiées ont de nombreuses branches latérales créant une structure tridimensionnelle. En utilisant le

polyéthylène comme exemple, le chimiste peut produire un matériau linéaire et ramifié.

Le matériau linéaire a tendance à être de densité supérieure, moins translucide, plus dur et plus rigide et à avoir une meilleure résistance chimique que le matériau ramifié de densité inférieure.



**Figure 2 : Architecture atomique des polymères**

## 2.2- Définition

Polymère est un mot qui vient du grec « pollus » plusieurs, et « meros » partie. C'est une macromolécule, organique ou inorganique, constituée de l'enchaînement répété d'un même motif, le monomère (du grec monos : un seul ou une seule, et meros, partie), reliés les uns aux autres par des liaisons covalentes. Les polymères forment un corps qui peut se présenter sous forme liquide ou solide à température ambiante. Un polymère peut être naturel (ex : polysaccharides, ADN), obtenu par modification chimique d'un polymère naturel (ex : méthyle cellulose), ou bien entièrement synthétisé par voie chimique (ex : polystyrène, polyisoprène) par une réaction de polymérisation. L'enchaînement des monomères peut se faire de façon linéaire (polymères linéaires). Présenter des ramifications aléatoires (polymères branchés) ou systématiques et réticulés.

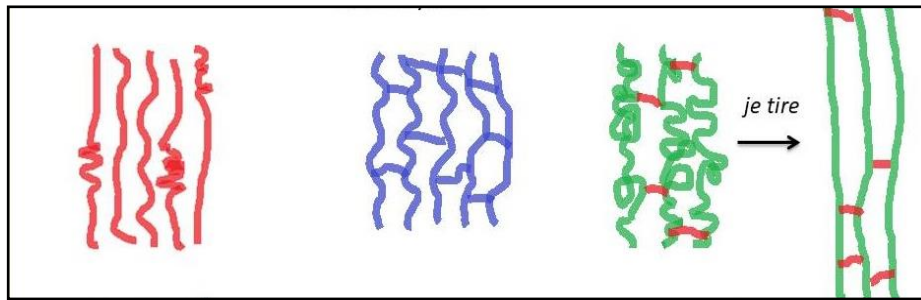
## 2.3- Différents types de polymères

### 2.3.1- Les homopolymères

C'est la répétition d'un seul motif dans la macromolécule, ce qui résulte le plus souvent de la polymérisation d'un seul type de monomère.

### 2.3.2- Les copolymères

C'est la répétition de plusieurs motifs différents. On distingue ensuite plusieurs types de copolymères suivant l'organisation entre les différents monomères. Dans le cas le plus fréquent, on a un copolymère statistique, un copolymère séquencé et un copolymère alterné.



**Figure 3: types des polymères**

Les polymères sont souvent classés d'après leurs propriétés thermomécaniques. Citons notamment : les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères. Les thermoplastiques deviennent malléables quand ils sont chauffés ce qui permet leur mise en œuvre. Les thermodurcissables durcissent sous l'action de la chaleur ou par addition d'un additif. Les élastomères sont déformables de manière réversible.

Les polymères sont devenus l'élément essentiel d'un nombre très important d'objets, dans lequel ils ont souvent remplacé les substances naturelles. Le terme désigne des matières abondantes et variées : des protéines les plus ténues aux fibres de kevlar à haute résistance. Certains polymères sont utilisés en solution comme par exemple dans les shampoings ; d'autres forment des matériaux solides. Pour ces applications, les polymères sont généralement mélangés à d'autres substances, des charges telles que la silice, des additifs tels que les antioxydants, dans des opérations de formulation. La fabrication des objets eux-mêmes résulte la plupart du temps d'une opération de mise en œuvre dans un procédé industriel qui relève du domaine de la plasturgie.

Pour la préparation des polymères, on distingue deux grandes catégories de réactions chimiques permettant la préparation des polymères : la polymérisation en chaîne, et la polycondensation (polymérisation par étapes).

#### **2.4- Généralités sur le comportement thermique des polymères**

Les propriétés mécaniques des polymères dépendent fortement de la température. A basse température la plupart des polymères présentent un état vitreux, ils sont rigides. Lorsque la température augmente ils passent par un état vitreux, les chaînes macromoléculaires glissent les unes par rapport aux autres et le polymère se ramollit, cette plage de température est appelée température de transition vitreuse notée **T<sub>g</sub>**. A une température plus élevée le polymère passe à l'état caoutchoutique : son comportement est viscoélastique. A cet état les forces de Van Der Waal et la réticulation entre chaînes servent de force de rappel lorsque l'on déforme le matériau. Enfin lorsque l'on élève la température du polymère peu réticulé, on peut assister à une phase d'écoulement visqueux, correspondant au désenchevêtrement des chaînes. Ce dernier comportement est utilisé pour mettre en forme les matières plastiques.

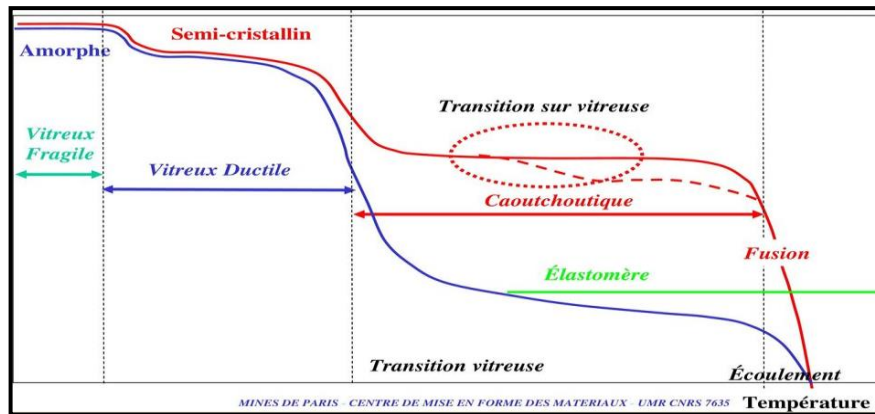


Figure 4: le comportement thermique des polymères

### 2.4.1-Température de transition vitreuse

Pour la plupart des polymères il existe une température qui marque la frontière entre deux états fondamentaux état vitreux et état caoutchoutique.

Ce phénomène a été observé la première fois sur des élastomères (caoutchouc naturel). Très rapidement il a été constaté sur l'ensemble des polymères thermoplastiques que la transition est d'autant plus apparente que le matériau est amorphe, car dans un polymère partiellement cristallin seule la partie amorphe est concernée par le phénomène. A titre d'exemple, ceci peut être illustré par les variations du volume spécifique en fonction de la température [1].

Pour un polymère totalement amorphe on voit qu'il y a un changement de pente bien net. Par convention, la température de transition vitreuse correspond à l'intersection des deux pentes. En revanche lorsque le polymère est totalement cristallin on ne remarque aucune variation de la pente de la courbe jusqu'au moment de la fusion, il n'y a donc pas de Tg pour ce type de polymère.

### 2.4.2- Etat vitreux

A l'état vitreux (basse température) les mouvements moléculaires associés aux déformations sont faibles et le module de Young est élevé, la déformation élastique est contrôlée par le terme enthalpie de son énergie interne, comme pour les métaux. Le processus de déformation plastique peut être activé à température dite température de transition ductile/fragile, inférieure à la température de transition vitreuse. Le comportement apparent du polymère lorsqu'il est vitreux est viscoplastique, avec une ductilité macroscopique plus ou moins développée en fonction de la température et de la vitesse [2].

### 2.4.3- Zone de transition

La zone de transition, associée à la relaxation vitreuse ou zone viscoélastique marque le moment où des mouvements coopératifs le long du squelette de la chaîne, deviennent possible. Le module de Young décroît donc rapidement et le comportement est très évolutif.

### 2.4.4- Zone caoutchoutique

Sur la zone caoutchoutique la température est suffisante pour que la chaîne balaie spontanément toutes ses conformations possibles en un temps très court devant le temps représentatif de la sollicitation. Par contre la température est trop faible pour autoriser le désenchevêtrement des chaînes à grande échelle. Macroscopiquement, les chaînes apparaissent donc souples mais l'écoulement est interdit. Le matériau devient progressivement hyper-élastique, en fait, visco hyper élastique, s'il n'est pas réticulé. Les processus élastiques cèdent le pas à l'élasticité entropique aux grandes déformations. Le plateau caoutchoutique d'un semi cristallin est plus haut et plus long que celui d'un amorphe. Ces deux points expliquent qu'un semi cristallin, tel le PP, PE, peut être utilisé au-dessous de sa transition vitreuse, tandis qu'un amorphe, tel le PS, sera limité à son plateau vitreux, pour utiliser un amorphe au-delà de sa transition vitreuse il faut le réticuler.

Un polymère semi cristallin reste donc visco élastique, avec un durcissement structural et/ou endommagement, sur son plateau caoutchoutique.

### 2.4.5- Zone fluide

La zone fluide apparaît quand le désenchevêtrement devient probable. Les chaînes apparaissent statiquement indépendantes les unes des autres la sollicitation pourra donc très facilement les déplacer les unes par rapport aux autres. Le comportement devient majoritairement visqueux, mais reste visqueux élastique.

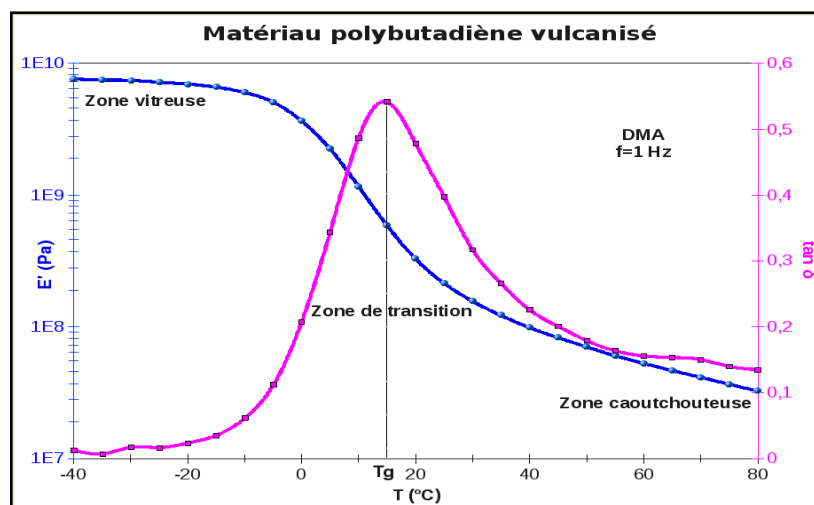


Figure 5: température de transition vitreuse

## 2.5- Les conditions d'utilisation

La réponse d'un polymère peut dépendre :

- ✓ Du type de sollicitation : traction, compression ou cisaillement.
- ✓ De la température qui est un paramètre primordial que nous allons détailler.
- ✓ De la vitesse de sollicitation qui est d'importance équivalente à celle de la température.
- ✓ De la pression (du moins à haute pression).
- ✓ Du taux de déformation, car la déformation se traduit par une évolution structurale et donc une évolution des propriétés.

- ✓ Du passé thermomécanique, c'est à dire d'une éventuelle dégradation pendant la mise en œuvre.
- ✓ De l'environnement : dans certains cas le taux d'humidité peut changer le comportement des polymères hydrophiles, les hydrocarbures peuvent gonfler le matériau.

NB : Tous les polymères ne sont pas sensibles dans les mêmes proportions à chacun de ces paramètres. Il convient donc de les traiter au cas par cas.

## **3- Les Plastiques**

### **3.1- Définition**

Le terme « plastique » décrit une grande variété de composés organiques obtenus par synthèse chimique. Produites essentiellement à partir du pétrole, les matières plastiques sont l'un des symboles du XXe siècle, la bakélite (1909) est le plus ancien plastique entièrement synthétique. Il existe également des plastiques naturels : poix, latex, bitume, brai, résines, laques, ambre, écaille, come, et des plastiques d'origine animale généralement extraits du lait et utilisés dans la fabrication des produits médicaux.

La matière plastique est composée principalement de polymères, qui a la propriété de se mettre en forme facilement par moulage, extrusion, coulage après un chauffage modéré (100-300°C).

### **3.2- Différents types des matières plastiques**

Les matières plastiques sont légères, hygiéniques, durables et faites sur mesure. C'est grâce à toutes leurs qualités qu'elles sont devenues irremplaçables et omniprésentes dans les objets de notre vie quotidienne. Les fabricants offrent une très grande diversité de produits, mais il existe trois grandes catégories de matières plastiques synthétiques les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

#### **3.2.1- Les thermodurcissables**

Les thermodurcissables sont des plastiques qui prennent une forme définitive au premier refroidissement. La réversibilité de forme est impossible car ils ne se ramollissent plus une fois moulés.

Sous de trop fortes températures, ils se dégradent et brûlent (carbonisation). Les molécules de ces polymères sont organisées en de longues chaînes dans lesquelles un grand nombre de liaisons chimiques solides et tridimensionnelles ne peuvent pas être rompues et se renforcent quand le plastique est chauffé. La matière thermodurcissable garde toujours sa forme en raison de ces liaisons croisées et des pontages très résistants qui empêchent tout glissement entre les chaînes.

#### **3.2.2- Les thermoplastiques**

C'est de loin la famille la plus utilisée : ils représentent près de 90% des applications des matières plastiques. Ils sont moins fragiles, plus faciles à fabriquer (machine à injecter et cadences élevées) et permettent des formes plus complexes que les thermodurcissables.

Ils existent sous forme rigide ou souple, compacte ou en faible épaisseur, sous forme de feuille très mince (film...), de revêtement, expansé ou allégé.

### 3.2.3- Les élastomères

Les élastomères sont un type particulier de matériaux polymère, qui possède l'impressionnante faculté de pouvoir supporter de très grandes déformations, ils se caractérisent aussi par la quasi-recouvrance de leurs propriétés initiales quand la sollicitation cesse. Composé naturel ou synthétique présentant l'élasticité du caoutchouc à sa température d'utilisation, en général proche de la température ambiante.

Ce sont des polymères dont la température de transition vitreuse se situe bien en dessous de la température ambiante. Un élastomère possède les propriétés suivantes : il est souple, s'allonge facilement sous l'effet d'une traction, et possède donc un module d'élasticité peu élevé ; il possède une résistance à la rupture importante à son allongement maximal ; il est élastique et retrouve rapidement sa longueur initiale lorsque la sollicitation mécanique cesse ; enfin, il conserve ses propriétés dans un large domaine de températures. Les élastomères sont constitués de chaînes polymères de masse moléculaire moyenne élevée de 100 000 à 500 000 unités monomères par chaînes. On peut citer des exemples d'élastomères.

**ABS:** Acrylonitrile Butadiene Styrene.

**SBR:** Styrene Butadiene Rubber.

**EPDM :** Ethylène Propylène Diène Monomère

## 4- Matériaux métalliques

Les matériaux métalliques, ou métaux, sont des substances caractérisées par leur capacité à conduire la chaleur et l'électricité, leur malléabilité et leur ductilité. Ils sont généralement solides à température ambiante et ont une structure cristalline ordonnée. Extraits sous forme de minerais, les métaux subissent des processus métallurgiques pour devenir des matériaux utilisables. Leurs propriétés physiques et chimiques, comme la conductivité électrique et la résistance mécanique, les rendent essentiels dans des secteurs tels que la construction, l'ingénierie et l'aérospatiale.

## 5- Conclusion

Les polymères thermoplastiques sont des matériaux polyvalents largement utilisés. Ils sont généralement caractérisés par leur faible densité, leur résistance chimique, leur flexibilité et leur conductivité thermique et électrique. Les polymères thermoplastiques peuvent être ramollis et remodelés à des températures élevées, ce qui les rend facilement transformables par moulage, extrusion, thermoformage et sondage. Ils sont utilisés dans de nombreux secteurs industriels, tels que l'automobile, l'aérospatiale, l'emballage et le médical. De plus, ils sont recyclables, ce qui en fait des matériaux respectueux de l'environnement. Cependant, certaines limitations, telles que la sensibilité à la chaleur ou aux solvants chimiques, peuvent restreindre leur utilisation. En résumé, les polymères thermoplastiques sont des matériaux essentiels, polyvalents et prometteurs pour l'avenir.



**CHAPITRE II :**  
**FRITTAGE**

## Chapitre II- FRITTAGE

### 1. Introduction

Le frittage est un procédé de fabrication utilisé dans l'industrie pour créer des objets solides à partir de poudres. Il consiste à chauffer la poudre à une température inférieure à son point de fusion, ce qui permet aux particules de se lier et de former un matériau solide. Le frittage exploite les phénomènes de diffusion et de fusion superficielle entre les particules de poudre lorsqu'elles sont chauffées. Ce processus favorise la croissance des grains et la consolidation du matériau. Le frittage offre des avantages tels que la production de pièces complexes et la création de matériaux composites avec des propriétés spécifiques. En résumé, le frittage est un procédé de fabrication qui transforme les poudres en objets solides en utilisant la chaleur et la diffusion atomique.

### 2. Définition

Il est difficile de donner une définition universelle du frittage, mais parmi celles qui sont largement reconnues et acceptées par la communauté scientifique, il y a la définition proposée par G. Cizeron : "Le frittage est un processus thermique qui transforme un système composé de particules individuelles (ou d'un aggloméré poreux) en l'absence ou en présence d'une pression externe, de manière à modifier au moins certaines propriétés du système (voire toutes) en réduisant l'énergie libre globale. Ce processus entraîne également une diminution significative (voire complète) de la porosité initiale. De plus, il suppose la présence continue d'une phase solide pendant tout le traitement thermique afin de maintenir la forme et les dimensions du système considéré. [3]

Cette définition est complète car elle intègre des termes importants pour décrire le procédé de frittage tels que le traitement thermique, les particules, la pression, la réduction de l'énergie libre, la porosité, la phase solide et les dimensions. Nous examinerons ces éléments plus en détail par la suite.

### 3. Frittage des polymères

Le frittage des polymères est un procédé de fabrication additive qui consiste à chauffer des particules de polymère à une température inférieure à leur point de fusion, provoquant leur fusion partielle et leur agglomération pour former un objet solide. Ce processus est souvent utilisé dans le domaine de l'impression 3D pour créer des pièces en trois dimensions à partir de poudres de polymère. Pendant le frittage, les particules de polymère

sont chauffées juste assez pour qu'elles se lient entre elles, tout en conservant leur forme globale. Cette méthode permet la fabrication de pièces complexes avec des détails précis, offrant des avantages tels que la personnalisation, la légèreté et la possibilité de produire des prototypes rapidement.

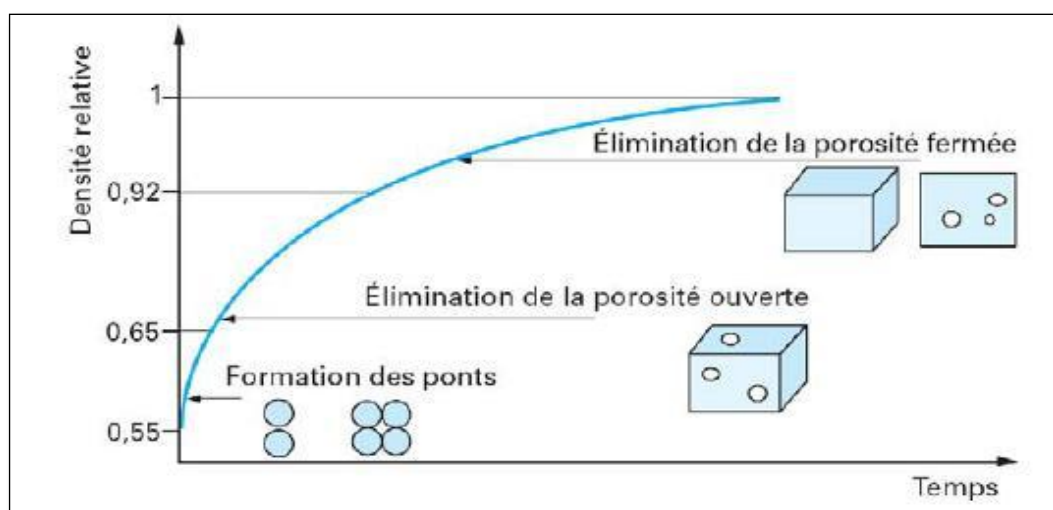
## 4. Différentes étapes de frittage

Si un matériau constitué de grains en contact est chauffé à une température suffisante pour le frittage, sa densité relative évoluera selon une courbe similaire à celle représentée dans la figure I.1. Pendant ce processus, on peut distinguer trois stades d'évolution [4]:

- Au début du frittage, des ponts se forment entre les grains, créant des joints. Le matériau acquiert une certaine cohésion sans que les grains ne grossissent significativement. À ce stade, on observe une légère diminution de la surface spécifique (ce qui correspond à une légère augmentation de la densité).

- La deuxième étape consiste à éliminer la porosité ouverte. Cela s'accompagne d'une augmentation significative de la densité. Il est important de noter qu'au début de cette étape, la densité relative est d'environ 0,65, les grains ont perdu leur identité distincte et forment une structure tridimensionnelle traversée par une porosité ouverte sous la forme de canaux cylindriques.

- À la fin du frittage (avec une densité relative d'environ 0,9 à 0,95), les pores sont réduits à des sphères. Ce processus est souvent lent et difficile car les gaz piégés à l'intérieur du matériau doivent être évacués par diffusion à travers le volume. Cette étape est généralement accompagnée d'une croissance granulaire importante.



**Figure 1: Evolution de la densité relative au cours des étapes de densification lors d'un frittage isotherme [5].**

## 5. Types de frittage

Du point de vue physico-chimique, on distingue principalement deux types de frittage lors du traitement thermique. Lorsque le frittage est réalisé à une température inférieure à celle de fusion de tous les constituants de la poudre, on parle de frittage en phase solide. Si l'un ou plusieurs des constituants passent à l'état liquide, cela correspond à un frittage en phase liquide. Peu importe le type de frittage, solide ou liquide, il peut être effectué soit sous pression atmosphérique (frittage naturel), soit sous pression externe (frittage sous charge, uniaxial ou isostatique). Dans certains cas, la densification du matériau obtenu pendant le traitement thermique est associée à une réaction de synthèse, ce qui est appelé frittage réactif.

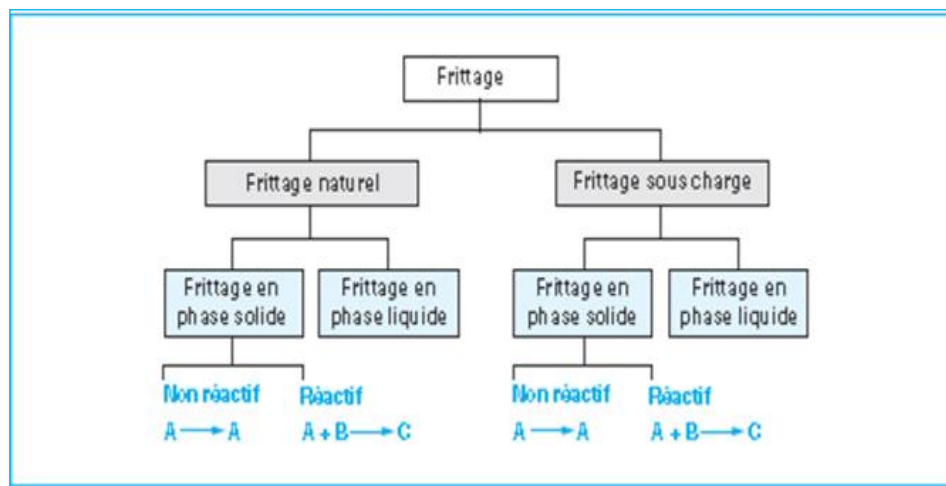
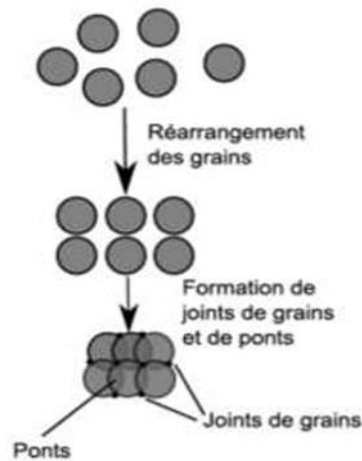


Figure 2: différents types de frittage

### 5.1 Frittage en phase solide :

La poudre est chauffée à une température appropriée sans atteindre la fusion des composants. Les particules se lient par diffusion d'atomes, et la consolidation se produit par l'augmentation des contacts entre les particules grâce à la diffusion de matière. Des additifs peuvent être ajoutés pour accélérer le processus de densification. Ce type de frittage est couramment utilisé pour les matériaux céramiques. On distingue trois étapes de densification au cours de ce processus, comme illustré dans la figure 1.2. Ces trois étapes comprennent la formation de ponts, l'élimination des pores ouverts et l'élimination des pores fermés [6].



**Figure 3: Schématisation du procédé de frittage en phase solide**

## 5.2 Frittage en phase liquide

Dans ce type de frittage, l'un des composants du mélange de poudres se liquéfie, et l'humectation de la phase solide par la phase liquide est une propriété essentielle pour le frittage. Le processus de densification pendant le frittage en phase liquide se déroule en trois étapes : réarrangement, dissolution-précipitation et croissance des grains, comme illustré dans la figure 1.3. Lors du chauffage, pendant l'atteinte de la température de fusion d'un des composants, une densification en phase solide peut se produire. Une fois qu'un des composants atteint sa température de fusion et devient liquide, la phase de réarrangement des grains se déroule rapidement. Pendant cette phase, une grande quantité de porosité est éliminée, entraînant une réduction significative du volume de l'échantillon.

Ensuite, une deuxième étape plus lente appelée dissolution-précipitation conduit à une nouvelle élimination des pores. Ce phénomène implique la dissolution de matière solide dans la phase liquide, suivie de sa précipitation sur d'autres grains ou sur des parties des mêmes grains. La force motrice de ce phénomène est la tendance du système à minimiser son énergie de surface en favorisant la sphérisation des grains et des interfaces solide/liquide. Enfin, la dernière étape se caractérise par une croissance microstructurale au cours de laquelle la taille moyenne des grains augmente progressivement. Une élimination très lente des pores se produit pendant cette étape. [7].

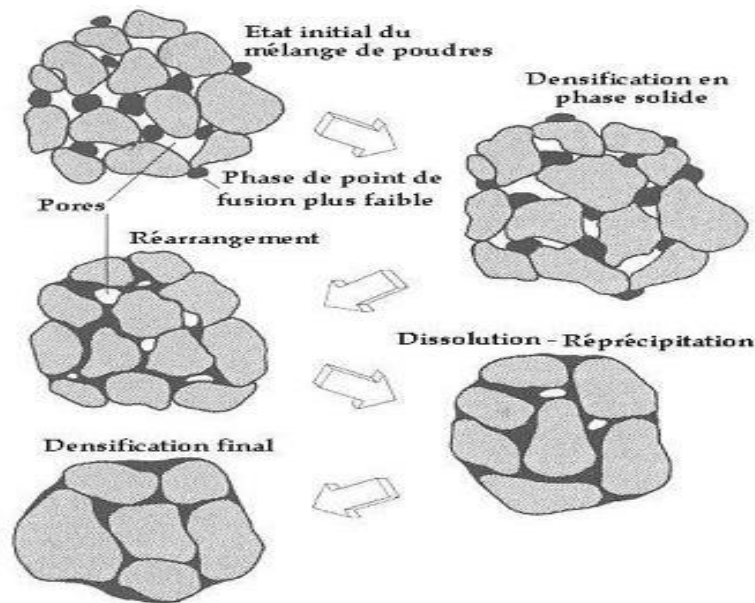


Figure 4: Les étapes de frittage en phase liquide

### 5.3. Le frittage Naturel

Le frittage naturel implique l'absence de contraintes mécaniques externes. La poudre est chauffée soit à l'air libre, soit dans une atmosphère contrôlée lorsque la matière est sujette à l'oxydation.

### 5.4. Le frittage sous charge

Lorsque l'objectif est d'obtenir une densification complète à une température relativement basse, le frittage sous charge est utilisé. Pour appliquer la pression, deux méthodes peuvent être employées : la compaction en matrice ou la compaction isostatique. Les contraintes exercées activent la diffusion entre les particules à des températures relativement basses par rapport au frittage traditionnel, ce qui peut entraîner une déformation plastique dans le cas des métaux. Les dislocations ainsi créées accélèrent également les phénomènes de diffusion.

Comme nous l'avons démontré, toutes les étapes du processus de fabrication d'un matériau par MDP (Moulage par Dépose de Poudre) revêtent une grande importance. Cependant, le frittage est l'étape la plus critique car elle détermine les propriétés finales du matériau.

## 6. Frittage réactif

Les mélanges inertes sont rarement rencontrés, car la plupart du temps, les constituants du mélange réagissent, ne serait-ce que par interdiffusion, pendant le processus de frittage. Dans certains cas, la réaction est même l'objectif principal du procédé, comme lors de la synthèse de composés par frittage. Le frittage réactif vise à obtenir, après un traitement thermique, un produit fritté avec une structure ou une composition chimique différente de celle des produits initiaux [8]. L'énergie libérée lors du frittage réactif est considérablement plus élevée que celle du frittage classique. Il présente l'avantage économique de combiner la synthèse et la densification du matériau en une seule étape. Cependant, cela rend la maîtrise des paramètres du procédé complexe.

Deux problèmes majeurs limitent l'application du frittage réactif :

- La difficulté d'obtenir un matériau homogène en raison d'une réaction incomplète.
- La difficulté de contrôler la microstructure finale en raison de la complexité ajoutée par la réaction [9].

## 7. Paramètres influençant le frittage

### 7.1- Atmosphère de frittage

Différentes atmosphères peuvent être utilisées lors du frittage, et chacune d'entre elles a un impact sur la qualité du produit final.

Les pièces frittées dans une atmosphère d'air sont exposées à l'oxygène et à la vapeur d'eau, ce qui altère significativement les propriétés physico-chimiques des produits frittés en raison de l'inclusion d'oxydes fragiles qui affectent les propriétés mécaniques.

En revanche, une atmosphère neutre telle que l'azote ou l'argon protège la composition contre la corrosion à haute température pendant le frittage, mais les oxydes présents avant le frittage demeurent dans le matériau fritté.

### 7.2- Température et durée du frittage

L'élévation de la température accélère considérablement le processus de frittage, ce qui peut être évalué par le niveau de retrait observé. Cependant, l'utilisation de températures excessivement élevées par rapport à la température de fusion n'est pas toujours recommandée en raison des déformations induites par le fluage des pièces [10].

La durée du frittage diminue à mesure que la température augmente. De plus, lorsque la température de frittage se rapproche de la température de fusion de la poudre, la densité de la pièce frittée augmente et le temps de frittage est réduit.

### **7.3- La structure géométrique des particules de poudre**

Les poudres fines ou à grande surface spécifique frittent plus rapidement que les poudres compactes de plus grande taille, en fonction du type de frittage. Cependant, il existe un dilemme car les poudres plus fines sont plus difficiles à comprimer que les plus grosses. De plus, les comprimés fabriqués à partir de poudres fines subissent un retrait plus important lors du frittage par rapport à ceux fabriqués à partir de poudres de plus grande taille.

### **7.4- La densité des comprimés de poudres**

Lorsque la densité d'un comprimé est élevée, la surface de contact entre les particules de poudre augmente, ce qui favorise les processus de liaison et d'alliage, les rendant ainsi plus efficaces.

### **7.5- La vitesse de chauffage**

La composition finale de notre fritté est influencée par la vitesse de chauffe pendant le processus de frittage. En effet, une vitesse de chauffe extrêmement lente peut entraîner une augmentation de la taille des grains [11].

### **7.6- Impuretés**

D'après les recherches de Lea, les caractéristiques mécaniques d'un matériau sont fréquemment affectées par la présence de certaines impuretés. L'oxygène ou la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère de frittage réagissent avec les grains pour former des oxydes, ce qui crée une barrière de diffusion qui affaiblit la solidité du matériau fritté. [12]

## **8. APPLICATIONS**

Le frittage est un processus de fabrication utilisé pour transformer des poudres en objets solides. Il existe plusieurs applications du frittage dans différents domaines. Voici quelques exemples courants d'applications de frittage :

### **8.1- Fabrication de pièces métalliques**

Le frittage est utilisé dans l'industrie pour produire des pièces métalliques complexes. Les poudres métalliques sont compactées en forme souhaitée, puis chauffées à une température inférieure à leur point de fusion. Ce processus permet aux particules de se lier entre elles, formant une pièce solide.

### **8.2- Fabrication de céramiques**

Le frittage est une technique couramment utilisée pour produire des céramiques techniques. Les poudres céramiques sont compactées et chauffées à des températures élevées, ce qui permet aux particules de se fusionner et de former une pièce céramique dense et solide.

### **8.3- Fabrication de poudres métalliques**

Le frittage est également utilisé dans la production de poudres métalliques. Les poudres métalliques sont chauffées à des températures inférieures à leur point de fusion pour les agglomérer en granules plus gros ou en formes spécifiques. Ces poudres métalliques peuvent ensuite être utilisées dans d'autres processus de fabrication, tels que la métallurgie des poudres.

### **8.4- Fabrication additive**

Le frittage sélectif par laser (FSL) est une technique utilisée dans l'impression 3D pour créer des objets en utilisant des poudres. Un laser est utilisé pour chauffer sélectivement les poudres dans les zones souhaitées, le fusionnant ensemble pour former un objet solide couche par couche.

### **8.5- Applications médicales et dentaires**

Le frittage est utilisé dans la fabrication de prothèses médicales et dentaires. Des poudres spécifiques, telles que des céramiques ou des alliages de titane, sont utilisées pour fabriquer des implants ou des couronnes dentaires résistantes et sur mesure.

Il convient de noter que les applications de frittage sont en constante évolution et que de nouvelles utilisations sont régulièrement développées à mesure que la technologie progresse.

## **9- Les types de fours de frittage**

Le frittage est un processus de chauffage utilisé dans diverses industries pour solidifier ou agglomérer des matériaux en poudre. Différents types de fours de frittage sont utilisés en fonction des matériaux et des applications spécifiques. Voici quelques-uns des types de fours de frittage couramment utilisés :

### **9.1- Four de frittage en atmosphère contrôlée**

Ce type de four permet de contrôler l'atmosphère à l'intérieur de la chambre de frittage en ajustant les niveaux d'oxygène, d'azote ou d'autres gaz. Il est utilisé pour des matériaux sensibles à l'oxydation ou nécessitant une atmosphère spécifique pour obtenir les propriétés souhaitées.

### **9.2- Four de frittage sous vide**

Ces fours fonctionnent dans des conditions de vide en éliminant l'air et les gaz réactifs de la chambre de frittage. Le frittage sous vide est utilisé pour des matériaux sensibles à l'oxydation ou lorsque des atmosphères spécifiques ne sont pas réalisables par d'autres moyens.

### **9.3- Four de frittage par micro-ondes**

Ce type de four utilise des micro-ondes pour générer de la chaleur à l'intérieur des matériaux. Il offre un chauffage rapide et uniforme, ce qui permet d'obtenir des cycles de frittage plus courts. Les fours de frittage par micro-ondes sont souvent utilisés dans l'industrie céramique et des poudres métalliques.

### **9.4- Four de frittage à lit fluidisé**

Dans ce type de four, les particules à fritter sont suspendues dans un flux d'air ou de gaz chaud. Le lit fluidisé permet un chauffage rapide et uniforme des matériaux, favorisant ainsi un frittage efficace.

### **9.5- Four de frittage à haute température**

Ces fours sont conçus pour atteindre des températures élevées nécessaires au frittage de certains matériaux, tels que les céramiques techniques ou les matériaux composites.

Ces types de fours de frittage sont adaptés à différentes applications et matériaux spécifiques, et le choix du four dépendra des exigences du processus de frittage et des propriétés recherchées dans le matériau final.

## **10. CONCLUSION**

Le frittage est un procédé de fabrication utilisé dans différentes industries pour créer des objets solides à partir de poudres métalliques ou céramiques. Il consiste à chauffer les particules de poudre juste en dessous de leur point de fusion, ce qui les fait fusionner pour former un matériau cohésif. Le frittage permet de produire des pièces complexes avec de bonnes propriétés mécaniques, mais peut réduire la densité des pièces finales. Malgré ces limitations, le frittage est largement utilisé dans des secteurs tels que l'automobile, la médecine, l'aérospatiale et l'électronique. Les progrès dans les matériaux et les techniques de frittage continuent d'améliorer la qualité des pièces frittées, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives industrielles.

**2ÈME PARTIE**  
**CONCEPTION DU FOUR**

# DESCRIPTION DU FOUR

## 1. Introduction

Le four de frittage est un équipement essentiel dans l'industrie manufacturière moderne, particulièrement dans le domaine de la métallurgie, de la céramique, de la fabrication de poudres, et de l'impression 3D. Ce dispositif de traitement thermique joue un rôle crucial dans la transformation de matériaux en poudre en pièces solides et durables, en les exposant à des températures élevées sans atteindre leur point de fusion. Le processus de frittage permet de créer des objets complexes, précis et résistants, ce qui en fait une technologie incontournable pour de nombreuses applications industrielles, allant de l'aérospatiale à la médecine, en passant par l'automobile et l'électronique.

## 2. Fonctionnement du four

Les fours de frittage sous atmosphère contrôlée sont des équipements sophistiqués utilisés pour traiter divers matériaux, tels que les céramiques, les métaux et les poudres, dans des conditions spécifiques d'atmosphère pour obtenir des propriétés désirées.

Les fours de frittage sous atmosphère contrôlée permettent d'obtenir des matériaux de haute qualité avec des propriétés spécifiques en contrôlant de manière précise les conditions environnementales tout au long du processus. Ces étapes peuvent varier en fonction du matériau, de la taille des pièces et des spécifications du processus.

Voici les étapes générales d'utilisation d'un four de frittage sous atmosphère contrôlée :

### 1. Préparation du four :

- s'assurer que le four est propre et exempt de tout résidu précédent qui pourrait contaminer le processus.
- Vérifier le fonctionnement des systèmes de contrôle de la température, de la pression et de la composition de l'atmosphère.
- Charger les pièces à fritter sur des plateaux ou dans des supports appropriés, en veillant à maintenir une certaine distance entre elles pour éviter la fusion ou la déformation due au contact.

### 2. Réglage des paramètres :

- Programmer les paramètres de température, de pression et de composition de l'atmosphère selon les spécifications du matériau à fritter et des propriétés souhaitées.
- Certains fours de frittage offrent des courbes de frittage personnalisées, permettant de contrôler avec précision la montée en température, les paliers de maintien et le refroidissement.

### 3. Mise sous atmosphère contrôlée :

- Purger l'enceinte du four avec un gaz inerte ou un mélange de gaz approprié pour éliminer l'oxygène et d'autres contaminants de l'atmosphère.

- Établir la pression atmosphérique souhaitée dans le four, généralement en utilisant de l'argon, de l'azote ou de l'hydrogène.

#### 4. Montée en température :

- Augmenter progressivement la température conformément au programme de frittage.
- Surveiller en permanence la température à l'intérieur du four pour garantir un chauffage uniforme.

#### 5. Paliers de maintien :

- À des températures spécifiques, maintenir le four à une température constante pendant une durée déterminée. Ces paliers permettent la diffusion des particules et la consolidation du matériau.

#### 6. Refroidissement contrôlé :

- Réduire progressivement la température pour éviter les chocs thermiques et les déformations excessives des pièces.
- Certains matériaux, comme les céramiques, peuvent nécessiter un refroidissement très lent pour éviter les fissures.

#### 7. Évacuation de l'atmosphère contrôlée :

- Lorsque le processus de frittage est terminé, évacuer lentement et en toute sécurité l'atmosphère contrôlée du four pour éviter tout accident.

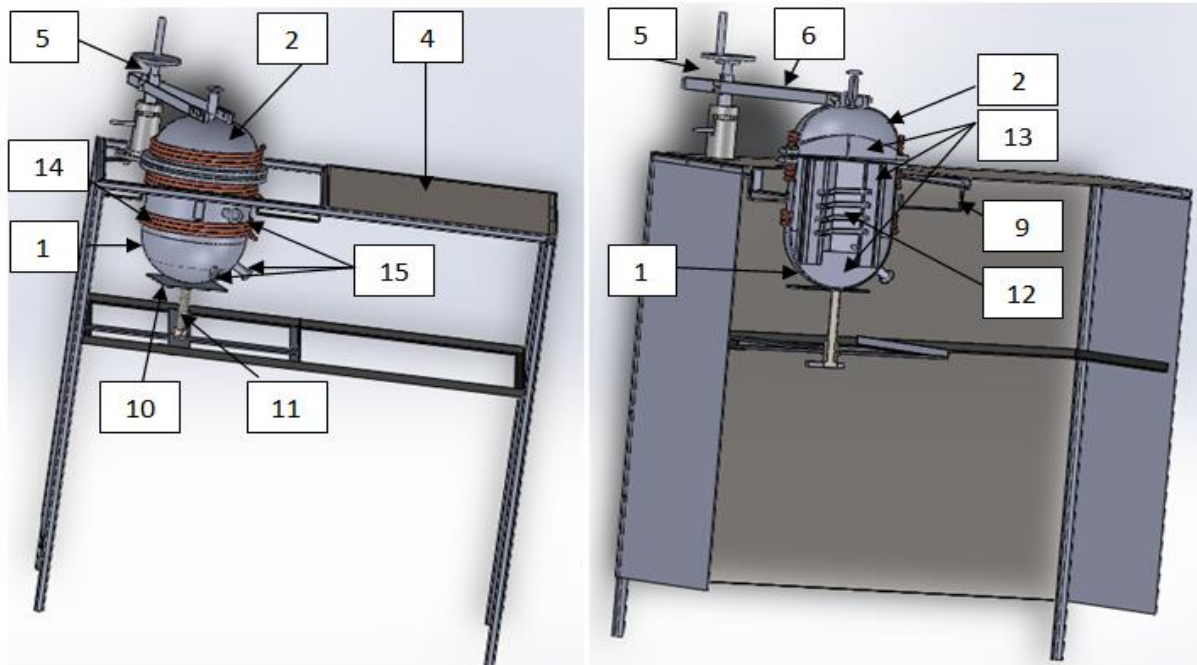
#### 8. Retrait des pièces :

- Attendre que le four refroidisse à une température sécuritaire avant de retirer les pièces frittées.

### 3- Description du four

Le four est composé d'une cuve 1 de forme cylindrique à fond bombé destinée à recevoir les échantillons à fritter et d'un couvercle en forme de dôme 2. La fermeture du four est assurée par un jeu de brides 3. Lors de l'ouverture du couvercle il est soulevé d'une hauteur de 2 à 3 cm au dessus de la cuve et déposé sur la table 4, après l'avoir fait pivoter de 90 degrés pour lui faire quitter le dessus de la cuve, à l'aide d'un système d'ouverture 5 conçu à cet effet. Le couvercle peut être maintenu aussi en l'air au dessus de la table grâce à l'équilibre assuré par le contre poids 7 accroché au bout du levier du système d'ouverture 6. La cuve est montée sur la table mécano soudée à l'aide de 4 vis de pression 8 vissées sur 4 pattes 9 soudées sur les éléments de structure de la table et d'un plateau 10 pouvant ajuster avec finesse la position verticale de la cuve à l'aide d'une vis 11. Le chauffage du four est obtenu à l'aide une résistance 12, son isolation thermique est assurée avec des briques réfractaires 13 et la fibre d'alumine et son refroidissement à l'extérieur est assuré par la circulation de l'eau dans un serpentin en cuivre 14 entourant la cuve et le couvercle. Trois orifices sont exécutés sur la

cuve pour pouvoir recevoir le câble électrique, le thermocouple et la buse de mise sous vide. Le câble électrique, le thermocouple et la buse de mise sous vide passent à travers les guides 15 soudés sur la cuve. Le four est équipé d'un système de régulation pour le contrôle de la température, de la vitesse de chauffe et des paliers de maintien en température.



Seules certaines pièces de la construction seules certaines pièces de la construction sont fabriquées. Les autres sont soit achetées, soit récupérées et certaines sont disponibles au niveau du hall de technologies les pièces fabriquées sont :

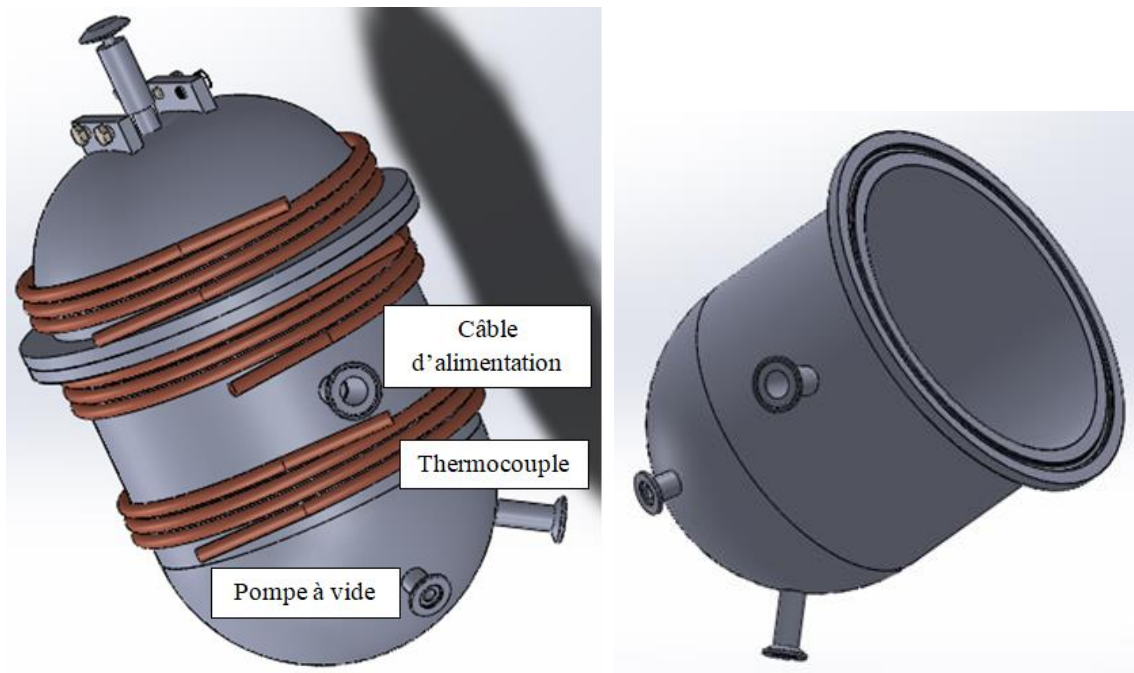
1. Couvercle du four
2. Cuve du four
3. Table du four
4. Pattes de fixation de la cuve
5. Support de la cuve du four
6. système d'ouverture du four
7. Les parois en tôle de la table
8. Brique réfractaire
9. Les guides

#### 4. Présentation des éléments constitutifs

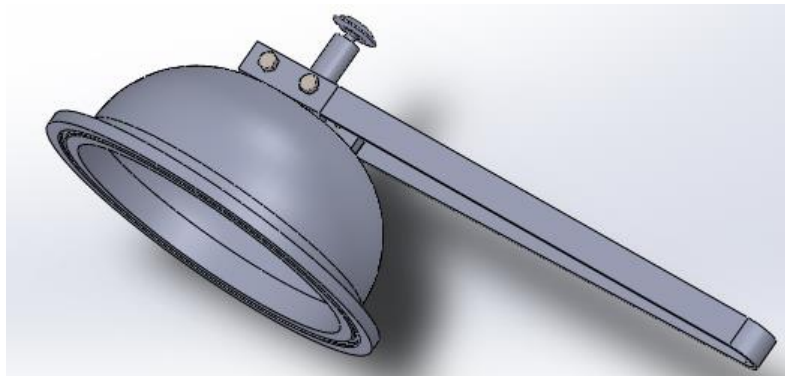
##### 1. La cuve ou corps du four

La cuve ou corps du four est un cylindre avec un fond bombé en tôle d'acier. Il reçoit tous les éléments constitutifs du four (résistance, thermocouple, ...). L'isolation thermique du four est assurée par la brique réfractaire taillée de sorte à épouser la forme de la cuve et recevoir le filament résistant et le thermocouple. La chambre contenant les pièces à fritter est formée par la brique réfractaire. Sur cette cuve sont soudés les guides du câble d'alimentation en

électricité, le thermocouple et la buse de mise sous vide. Le refroidissement du four de l'extérieur est assuré par la circulation de l'eau dans un serpentín en cuivre.

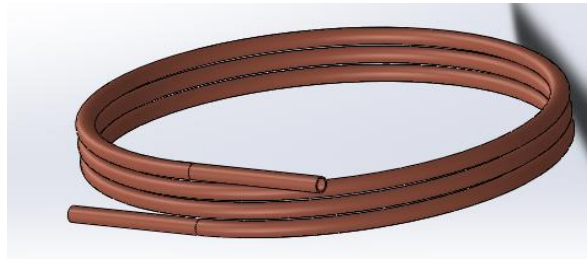


### 1.1- Couvercle de la cuve



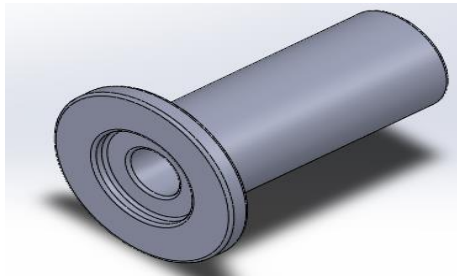
Le couvercle en forme de dôme est la partie supérieure du four. Il sert à confiner hermétiquement les échantillons à l'intérieur de la cuve. Il doit permettre la protection contre la contamination de l'enceinte et prévenir tout déversement pendant le chauffage. La fermeture du couvercle est obtenue par pincement avec la cuve à l'aide de brides. Le couvercle, comme la cuve, est isolé thermiquement de l'intérieur avec la brique réfractaire et refroidi à l'extérieur par la circulation de l'eau dans un serpentín en cuivre. Un bras est prévu pour soulever le couvercle lors de l'ouverture du four à l'aide d'un mécanisme conçu à cet effet. Un robinet jouant le rôle d'une soupape de sécurité est prévu au sommet du couvercle.

### 1.2- Système de refroidissement



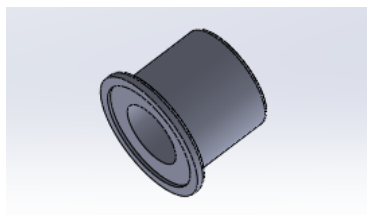
Un système de refroidissement du four (cuve et couvercle) par la circulation de l'eau dans un tuyau en cuivre enroulé autour du four est prévu. Il a pour rôle de refroidir le four de l'extérieur afin d'assurer la sécurité de l'opérateur lors de son utilisation.

### 1.3- Guide de thermocouple



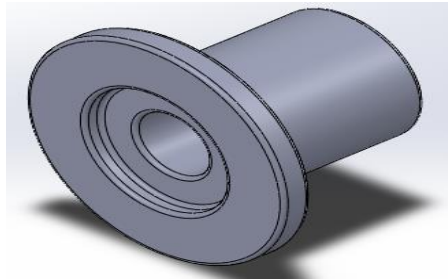
Cette pièce a pour rôle de guider le thermocouple lors de son introduction dans le four et de le protéger contre les agents extérieurs.

### 1.4- Guide du câble électrique



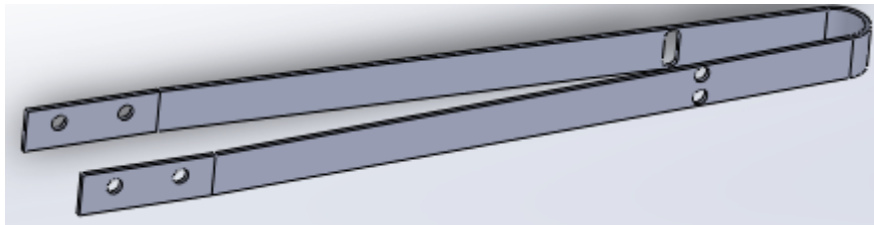
Cette pièce a pour rôle de guider le câble d'alimentation en électricité, de la résistance électrique servant à chauffer le four, lors de son introduction dans le four. Cette pièce permet aussi de maintenir le câble droit et de lui éviter ainsi sa rupture par flexion répétée.

### 1.5- Guide de la buse de mise sous vide



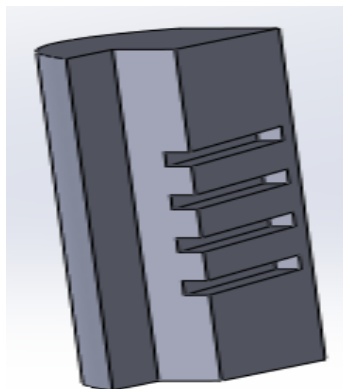
Cette pièce a pour rôle de guider la buse de mise sous vide de la chambre du four. Le frittage devant se faire sous vide ou atmosphère contrôlée, il convient donc de faire le vide dans la chambre de chauffage à l'aide d'une pompe à vide avant d'entamer l'opération de frittage.

### 1.6- Bras de levage du couvercle



Ce bras est complètement lié au système d'ouverture du four et au couvercle. En actionnant le système d'ouverture le bras soulève le couvercle du four, une fois le couvercle hors du four il est maintenu suspendu dans la position voulue grâce au contre poids accroché à l'extrémité du bras de levage.

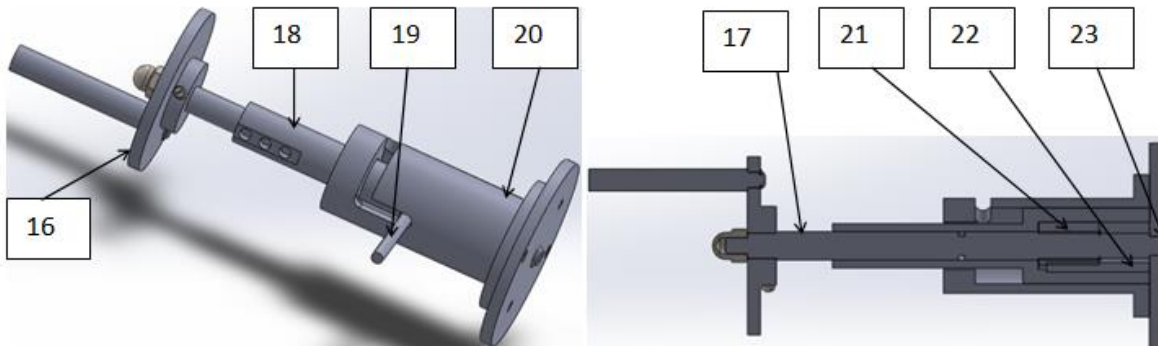
### 1.7 - Brique réfractaire



Les briques réfractaires sont des matériaux utilisés dans la construction de fours thermiques. Elles servent à isoler thermiquement le four, à protéger ses parois contre la chaleur et les chocs thermiques, à soutenir les éléments chauffants et à résister à la corrosion chimique. Leur durabilité et leur capacité à maintenir des températures constantes en font des composants recherchés pour une variété d'applications de chauffage et de traitement thermique. Ces briques sont taillées de sorte à former la chambre de chauffage en les

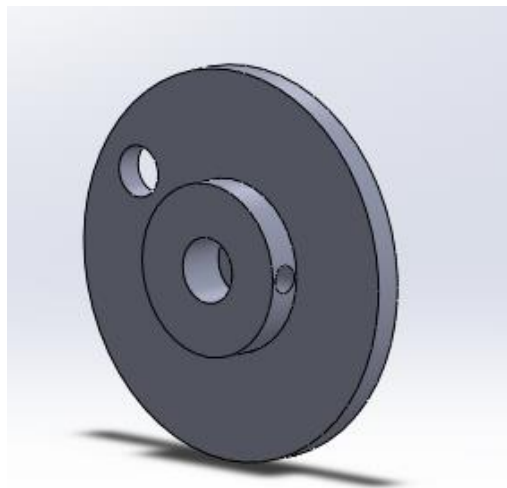
imbriquant les unes dans les autres, à recevoir la résistance électrique et épouser la forme du couvercle et de la cuve du four.

## 2. Le système d'ouverture du four



Ce système permet de soulever et faire pivoter le couvercle du four. En tournant le volant 16 lié à la vis de manœuvre 17 le fourreau 18 auquel est relié le bras de levage monte, une fois la hauteur voulue (environ 2 cm) atteinte on tourne la manette 19 couissant dans le corps 20 et le couvercle pivote dans le sens voulu grâce au bras de levage. Le couvercle est maintenu dans cette position par un contre poids accroché au bras. Le fourreau est entraîné dans son mouvement de translation de montée ou descente du couvercle par la bague de guidage 21 guidée en translation et liée en rotation avec 18 à l'aide de la clavette 22. La vis de manœuvre est arrêtée en translation par le circlips 23.

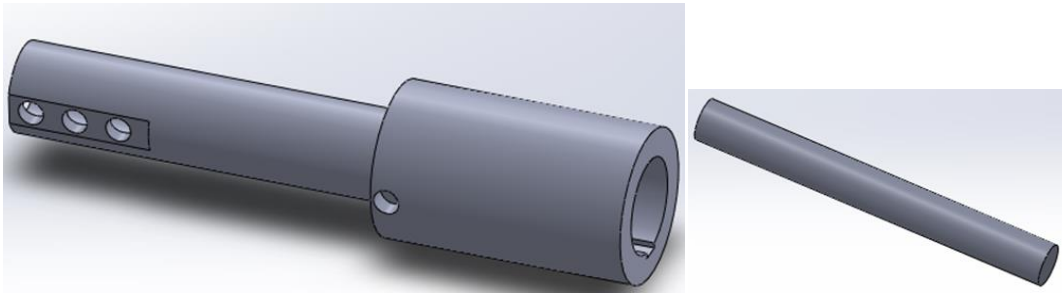
### 2.1- Volant



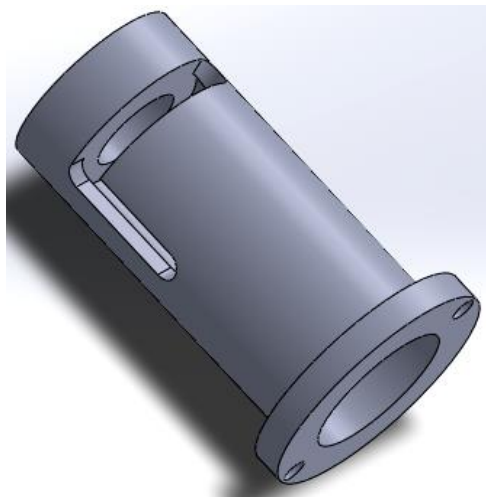
### 2.2- Vis de manœuvre



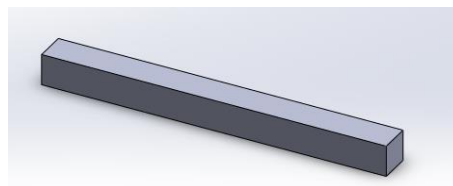
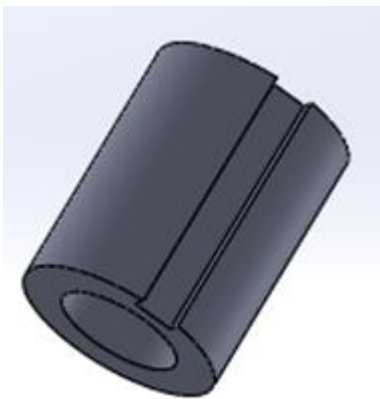
### 2.3- Fourreau et manette de guidage



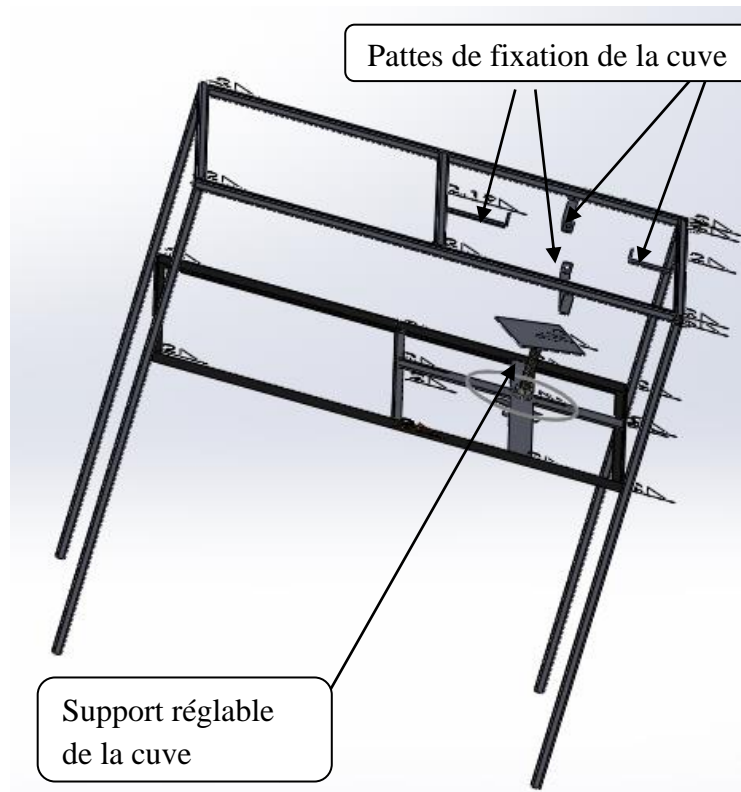
### 2.4- Corps



### 2.5- Bague de guidage et clavette

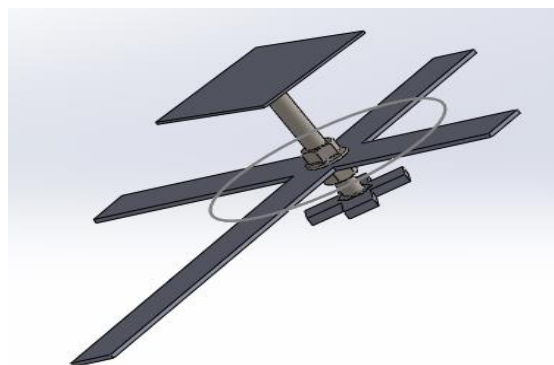


### 3. La table du four



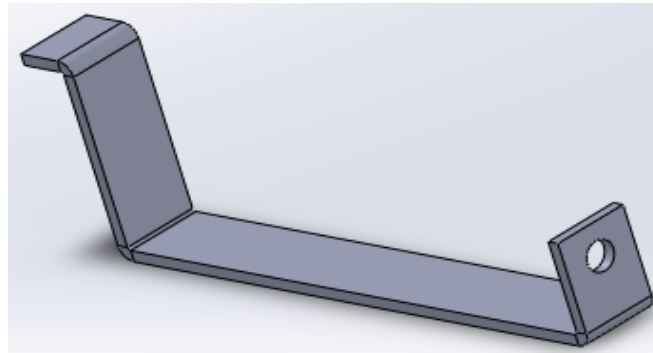
La table réalisée par mécano-soudure doit pouvoir supporter le four et accueillir tous les accessoires du four tels que les instruments de régulation et de contrôle. Elle peut aussi posséder des espaces de rangements. Elle doit assurer la stabilité du four, la sécurité de l'opérateur et résister aux différentes sollicitations mécaniques et thermiques auxquelles elle est soumise. En plus de ces exigences techniques elle doit présenter une esthétique agréable.

#### 3.1- Support réglable de la cuve



Le support réglable de la cuve est destiné à recevoir le four, le soutenir et assurer un son positionnement précis. Son rôle principal est d'offrir une base solide, stable et ajustable en hauteur.

### 3.2- Système de fixation de la cuve



La fixation du four sur la table est assurée par 4 vis de pression vissées dans 4 pattes soudées à la structure de la table. Ce système de fixation nous donne une certaine flexibilité du montage du four grâce aux possibilités qu'il nous offre dans le réglage du positionnement axial et diamétral du four. Cette liberté dans le réglage est obtenue par l'utilisation des vis de pression.

#### 4- Principales caractéristiques techniques :

- Alimentation électrique : courant alternatif 220V, 50Hz
- Gaz de traitement : argon, azote et gaz neutre
- Température maximale : 1400°C
- Volume de la chambre du four : 75x75x150 mm (massif ou compacté)
- Régulation PID du cycle thermique : rampe de chauffage (en °C/min), maintien à la température de consigne SP1 pendant une durée Dwell (en min) et refroidissement avec rampe (en °C/min).
- Régulation manuelle de l'atmosphère de traitement thermique : sous vide primaire (jusqu'à  $10^{-3}$  atm) ou sous atmosphère contrôlée en gaz inerte (pression maximale 2 atm).
- Refroidissement par circulation d'eau depuis un bac de contenance 80 L minimum à l'aide d'une pompe.

#### 5- Conclusion

Pour optimiser les coûts de réalisation et réduire le temps de fabrication nous avons utilisé un certain nombre d'éléments de récupération tels que la cuve, la tuyauterie, des éléments constitutifs de la table...

Une vue d'ensemble du four, de la chambre chauffante et du système d'ouverture du four sont présentés successivement sur les planches 1a, 1b, 2 et 3. Les dessins de définition des pièces composant le four sont donnés dans la partie 3.

## **3ÈME PARTIE**

### **REALISATION ET MISE À L'ESSAI**

## REALISATION ET MISE A L'ESSAI DU FOUR

Dans cette partie nous exposons les différents dessins de définition des pièces composant le four. Ces dessins serviront de base à l'élaboration des gammes d'usinage pour une éventuelle production en série du four. Une fiche technique et un mode opératoire accompagnent ces dessins.

### 1- Dessins de définitions :

Voire les planches 4 à 26ci jointes.

### 2- Fiche technique du four de frittage

Le four objet de ce travail permet de réaliser des cycles thermiques sous atmosphère inerte (Argon ou Azote) ou traitement thermochimique (avec gaz non corrosif) d'échantillons massifs de dimensions pouvant atteindre 75x75x150 mm à des températures pouvant atteindre 1400°C.

#### 2.1- Principales caractéristiques techniques :

- Alimentation électrique : courant alternatif 220V, 50Hz
- Gaz de traitement : argon, azote et gaz neutre
- Température maximale : 1400°C
- Volume de la chambre du four : 75x75x150 mm (massif ou compacté)
- Régulation PID du cycle thermique : rampe de chauffage (en °C/min), maintien à la température de consigne SP1 pendant une durée Dwell (en min) et refroidissement avec rampe (en °C/min).
- Régulation manuelle de l'atmosphère de traitement thermique : sous vide primaire (jusqu'à 10<sup>-3</sup>atm.) ou sous atmosphère contrôlée en gaz inerte (pression maximale 2 atm).
- Refroidissement par circulation d'eau depuis un bac de 80 L minimum.

#### 2.2- Eléments de contrôle du four :

La figure 1 montre une photographie du tableau de commande du four.

- En haut et à droite du tableau se trouve un interrupteur général qui permet, en l'actionnant au moyen d'une clé adaptée, d'alimenter le circuit électrique du four. L'utilisation du four, par mesure de sécurité, est du ressort de personnels formés.
- Un bouton d'arrêt d'urgence (en haut et à droite) est également monté dans le circuit pour pouvoir couper l'alimentation électrique en cas de problème électrique.
- Trois interrupteurs double ligne permettent d'alimenter en électricité et donc d'actionner (1) le régulateur de température, (2) la pompe à vide et (3) la jauge de vide (les 3 boutons alignés en haut, au milieu du tableau).

- Le régulateur de température est disposé entre son interrupteur (1) et l'interrupteur général. C'est le régulateur qui permet de faire exécuter le cycle thermique. Son utilisation sera décrite plus loin.
- Manomètre indiquant la pression dans le four. Cet appareil indique les pressions allant du vide primaire jusqu'à 17 bars.
- Robinet d'admission du gaz de traitement : bien qu'il soit solidaire du manomètre, ce robinet permet de maîtriser le débit du gaz rentrant dans le four. La pression indiquée par le manomètre est celle régnant dans le four.
- Débitmètre servant à estimer le débit du gaz d'échappement (gaz en « surpression » dans le four). Le robinet de réglage du débit permet de maintenir une pression donnée dans le four. Pour ce, il convient de régler en agissant, simultanément sur le débit rentrant réglé (robinet du manomètre de la bouteille de gaz) et sortant.
- Jauge de vide : cet instrument permet de situer avec une meilleure précision (que celle du manomètre) le niveau de vide primaire atteint.
- Robinet d'isolation de la jauge de vide : cette dernière ne doit pas être utilisée lorsque la pression dans le four est supérieure à 1 atm. Le robinet qui l'isole du tube communiquant avec le four permet de fermer le capteur.
- Le robinet d'ouverture vers la pompe à vide : lors de l'utilisation de la pompe à vide, il est plus prudent de réaliser un pompage progressif. Raison pour laquelle ce robinet est placé.

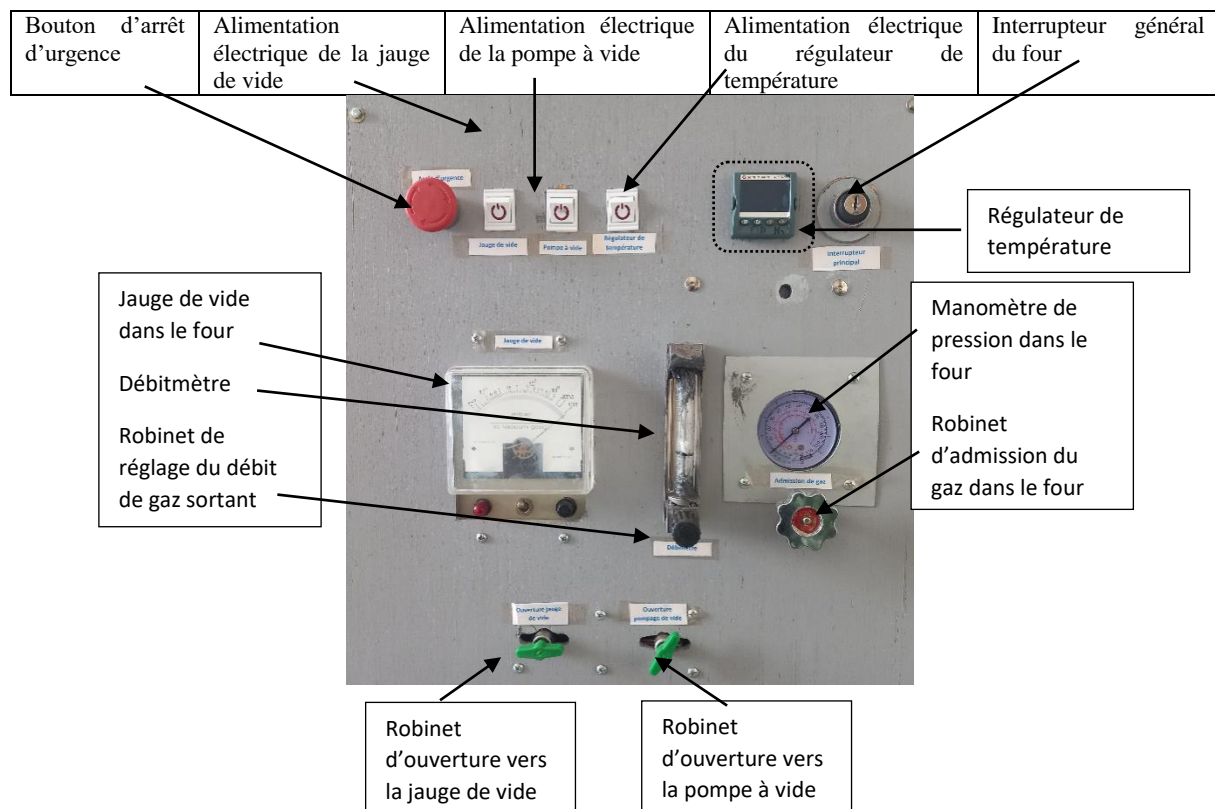


Figure 1 : vue générale du tableau de commande du four

### Partie 3 Réalisation et validation

Sur le système d'ouverture du four (Fig.2), un volant permet de faire soulever verticalement le couvercle et, à la fin de ce mouvement de translation, de faire tourner, au moyen du bAZQras l'ensemble du couvercle d'un quart de tour.

Un disjoncteur différentiel (Fig. 2) protégeant ses deux lignes (phase et neutre) est placé sur le côté latéral du four. Cet appareil supporte les courants jusqu'à 30 A avec une sensibilité de 300 mA. En cas de fuite ou court-circuit, le disjoncteur coupe indépendamment l'alimentation de la résistance chauffante.

NB : Les éléments de refroidissement (pompe à eau et ventilateurs) sont branchés sur la ligne sortant de l'interrupteur général. Cette disposition permet, par mesure de sécurité, de faire actionner le refroidissement dès que le four est sollicité.



**Figure 2 :** Couvercle et système d'ouverture

Disjoncteur du circuit de puissance



**Figure 3 :** Vues du four à son ouverture : en haut à gauche vue générale, à droite vue de dessous montrant le creux dans la brique du couvercle ; en bas vue de dessus de la chambre de confinement contenant une nacelle en alumine, n forme de panier.

### 3- Mode d'emploi du four de frittage

Avant toute manipulation d'un quelconque élément du four, vérifier sa dernière utilisation (notes mentionnées dans le registre de l'appareil)

- 1- Vérifier, sinon ouvrir les robinets pour remettre le four sous atmosphère. Vérifier que la bouteille de gaz est bien fermée. Vérifier, à travers le manomètre (Fig. 1), que la pression dans le four est de 1 atm.
- 2- Mettre l'ensemble sous tension en tournant la clé de l'interrupteur général.
- 3- Actionner le régulateur de température au moyen du bouton prévu à cet effet. Au bout de quelques secondes, la température dans le four doit s'afficher (en haut). **Si cette température est supérieure à 200°C, ne pas poursuivre les étapes ci-après (risques de brûlures).**
- 4- Ouvrir le couvercle en tournant le volant (Fig. 2) ; ce mouvement doit s'accompagner d'une translation vers le haut de l'ensemble porte couvercle. Au bout de ce mouvement, faire tourner l'ensemble porte couvercle en agissant sur le bras latéral. Le mouvement du bras dans la rainure limite ces deux mouvements. La chambre de confinement doit apparaître comme le montre la figure 3. En retirant le plafond amovible de la chambre de confinement, l'intérieur du four apparaît (Fig. 3).
- 5- Placer l'échantillon, bien préparé (\*), dans une nacelle en alumine avec couvercle. Dans le cas où l'échantillon est de dimensions supérieures à celles de la nacelle, utiliser les plaques fines en céramique pour protéger les résistances chauffante d'une éventuelle contamination. Pour une meilleure précision, positionner l'échantillon à mi-hauteur de la chambre (le thermocouple est situé à ce niveau). Remettre le plafond amovible de la chambre et refermer le four en remettant le couvercle. Veiller à ce que le joint torique d'étanchéité soit bien en place.
- 6- Fermer tous les robinets de contrôle de l'atmosphère du four : les 4 robinets situés sur le tableau de commande et le robinet d'échappement situé en tête du couvercle.
- 7- Actionner la pompe à vide à l'aide de l'interrupteur. Ouvrir le robinet progressivement. Le son produit par la pompe change de tonalité. Attendre jusqu'à ce que le vide primaire soit atteint (aiguille du manomètre sur les graduations de la zone  $P < 1$  atm). Maintenir le pompage du vide pendant une dizaine de minutes. Pour vérifier le niveau poussé du vide, actionner la jauge de vide (interrupteur puis bouton d'allumage de la jauge situé au-dessous de son cadran).
- 8- Pour mettre fin à l'opération de mise sous vide, et faire un premier balayage par le gaz protecteur, fermer le robinet de la pompe.
- 9- Pour un traitement thermique sous argon (ou azote), faire un premier balayage en injectant de l'argon jusqu'à ce que la pression approche 1 atm. Pour ce faire, ouvrir la bouteille de gaz et régler son manomètre. Dès que la pression dans le four atteint 1 atm, ouvrir, simultanément mais graduellement, le robinet d'échappement de gaz en « surpression » situé sur la tête du couvercle (duquel provient le tuyau rouge longeant le bras porte couvercle) et celui du débitmètre.
- 10- Pour un deuxième balayage, fermer de nouveau les robinets puis refaire le vide comme décrit précédemment (étapes 8, 9 et 10).
- 11- Pour un traitement thermique sous argon, maintenir la pression dans le four équivalente à 1 atm. Pour un traitement sous vide, couper l'alimentation en gaz et maintenir le pompage et suivre l'évolution de la pression dans le four.

**Attention : Ne pas réaliser de traitement sous vide dynamique (pompage en continu) d'échantillons pouvant dégazer à la température de traitement.**

### 4- Mise à l'essai du four

La mise à l'essai consiste à vérifier l'étanchéité de la chambre de chauffage, la température de chauffage atteinte, la réalisation d'un cycle thermique, la résistance à la

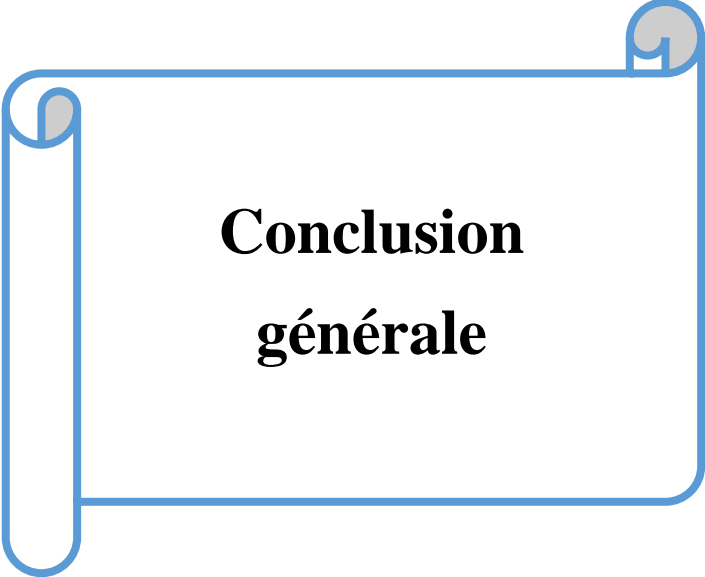
chaleur de la brique réfractaire et l'efficacité du système de refroidissement du corps du four et l'isolation électrique de l'ensemble four et table.

Les essais menés ont montré que :

- La température de chauffage atteinte avoisine 1000°C
- L'étanchéité de la chambre de chauffage est garantie pour au moins 48h.
- La brique réfractaire garde ses caractéristiques et résiste à une température de 1400°C
- La température sur la paroi extérieure de la cuve avoisine les 80°C
- L'isolation électrique du four est effectuée avec succès.

## **5- Conclusion**

Au terme de cette série d'essais nous constatons que notre four répond aux exigences que nous nous sommes fixées. Des améliorations doivent cependant être apportées essentiellement sur le côté esthétique et le choix des matériaux car pour ce prototype nous nous sommes contenté des éléments dont nous disposons (tuyaux, profilés, tôles, ...).



**Conclusion  
générale**

## Conclusion générale

La fabrication d'un four de frittage sous atmosphère contrôlée est un processus complexe qui nécessite une planification minutieuse, des compétences techniques avancées et une compréhension approfondie des exigences spécifiques liées au frittage des matériaux. Une telle installation doit garantir la qualité, la précision et la reproductibilité voulues des pièces.

La fabrication de notre four s'est avérée une opération complexe en ce sens qu'il a fallu gérer un nombre important de paramètres. Parmi les principales exigences auxquelles doit répondre le four nous avons :

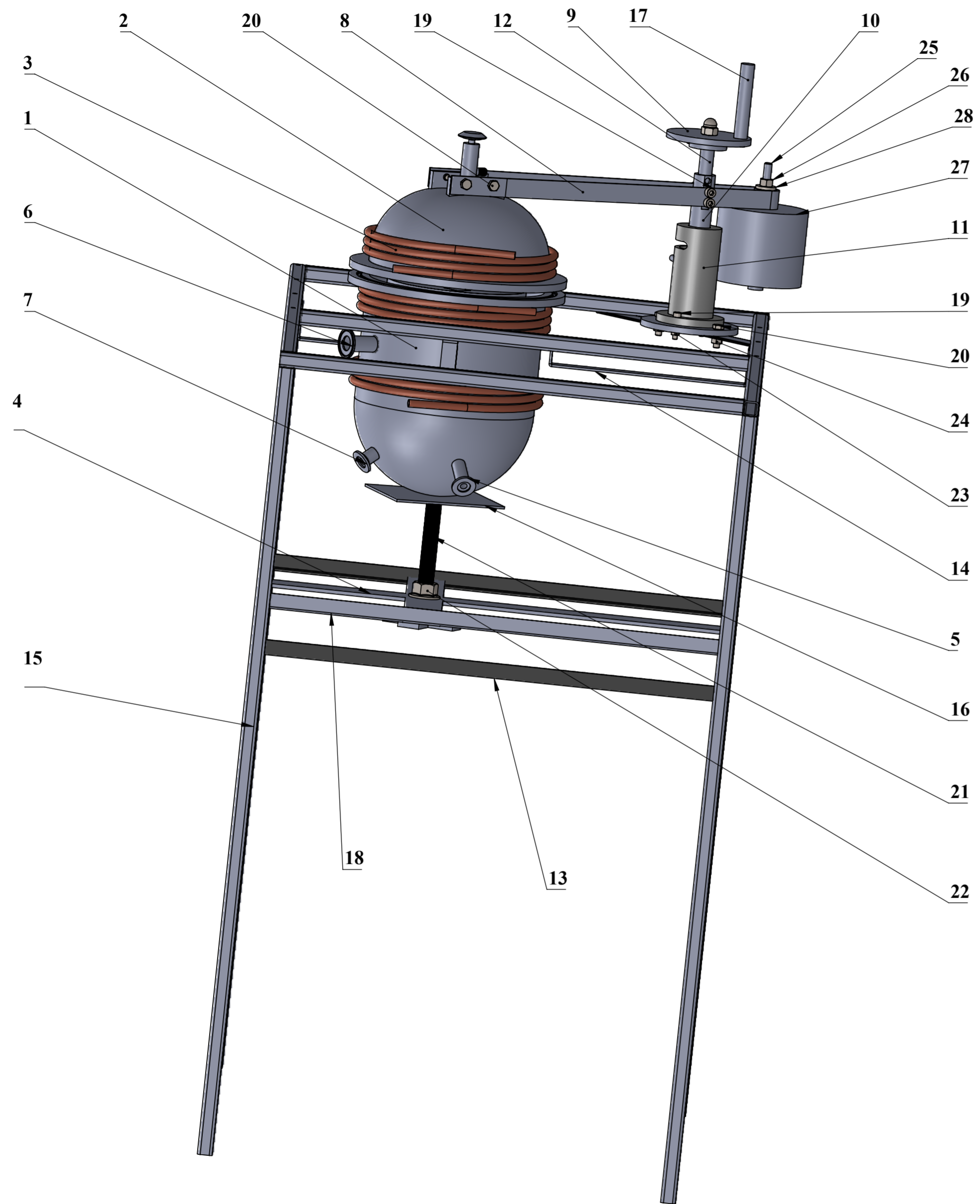
- **Atmosphère contrôlée** : La principale caractéristique d'un four de frittage sous atmosphère contrôlée est la capacité à réguler l'environnement gazeux à l'intérieur de la chambre de frittage. Cela permet de minimiser l'oxydation des matériaux, d'optimiser la qualité des pièces produites et de garantir des propriétés mécaniques précises. Pour assurer cette fonction il est nécessaire de garantir l'étanchéité du four. Au niveau du couvercle, cette étanchéité est obtenue grâce à un joint torique qu'il faut protéger contre la chaleur. Un système de refroidissement par circulation d'eau est prévu à cet effet. Ce système placé autour du four protège aussi l'opérateur de la température, qui peut être assez élevée, régnant sur la paroi extérieure du four.
- **Température et temps de maintien** : La capacité à atteindre et à maintenir les températures requises de manière stable et précise est cruciale pour le succès du processus de frittage. Le temps de séjour à température est également important pour garantir une densification appropriée du matériau. Ces exigences sont garanties par un choix judicieux des matériaux utilisés tenant compte de la résistance à la chaleur, de la conductivité thermique, de la résistance à la corrosion...
- **Contrôle du cycle thermique** : Notre four est équipé d'un système de régulation qui permet de réguler la température, la vitesse de chauffage (rampe du cycle), la durée du maintien à température (palier du cycle) et la vitesse et la température de refroidissement. Cette régulation devrait nous garantir une bonne précision et une reproductibilité du processus de frittage.

Le four a été testé avec succès, il permet d'atteindre une température de 1000°C et garantit une très bonne étanchéité durant au moins 48 heures. Le système de refroidissement abaisse la température sur la paroi extérieure de la cuve à 80°C.

Le prototype de four que nous avons réalisé permet de garantir les conditions nécessaires pour le frittage des matériaux métalliques et polymères (température, vitesse de chauffage et durée de maintien), malgré cela, comme tout prototype, cependant des modifications peuvent être apportées pour améliorer le dispositif.



**Mises  
en plan**



28	1	Rondelle	Acier
27	1	Contre poids	Acier
26	1	Ecrou H.M10X1.25	Acier
25	1	Axe de contre poids	Acier
24	4	Ecrou H.M8X1.25	Acier
23	2	Ecrou H.M6X1	Acier
22	1	Ecrou H.M20X2.5	Acier
21	1	Vis H .M20 X2.5X180	Acier
20	4	Vis H. M8X1.25X60	Acier
19	6	Vis CHc.M6x1x40	Acier
18	1	Traverse longitudinale	Acier
17	1	Manette	Acier
16	1	Plateau du système de réglage de la cuve	Acier
15	4	Pieds de table	Acier
14	4	Pattes de fixation de la cuve	Acier
13	1	Cadre	Acier
12	1	Vis de manoeuvre	Acier
11	1	Corps	Acier
10	1	Fourreau	Acier
9	1	volant	Acier
8	1	Bras de levage du couvercle	Acier
7	1	Guide de la buse de mise sous vide	Acier
6	1	Guide de câble électrique	Acier
5	1	Guide de thermocouple	Acier
4	1	Support du système de réglage de la cuve	Acier
3	3	Système de refroidissement	Cuivre
2	1	Couvercle de la cuve	Acier
1	1	Cuve	Acier
<b>REP</b>	<b>Nbr</b>	<b>DESIGNATION</b>	<b>Matiere</b>

ECHELLE 1:10

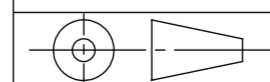


Planche N°

## FOUR DE FRITTAGE

A2

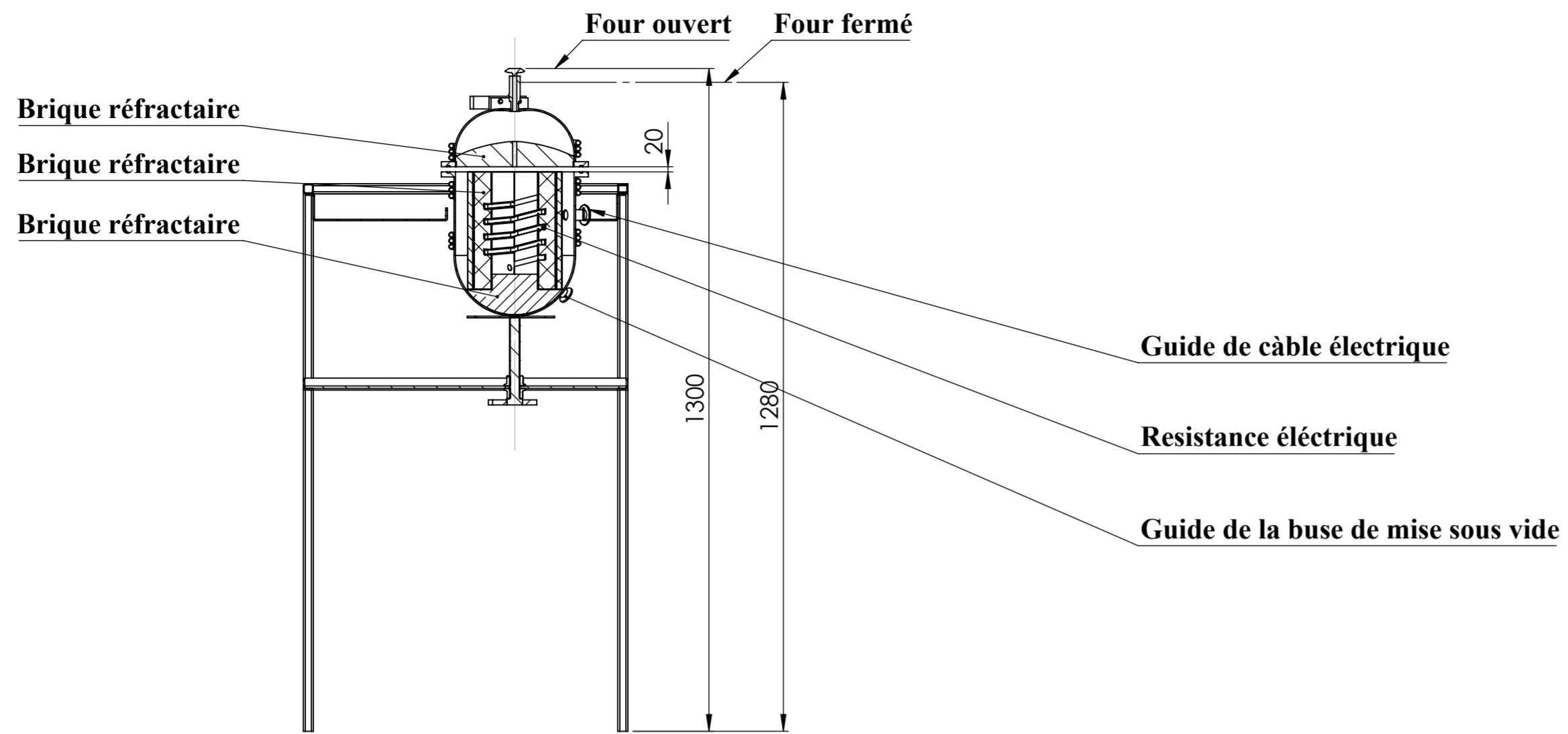
M2

UMMTO-FGC-FMP

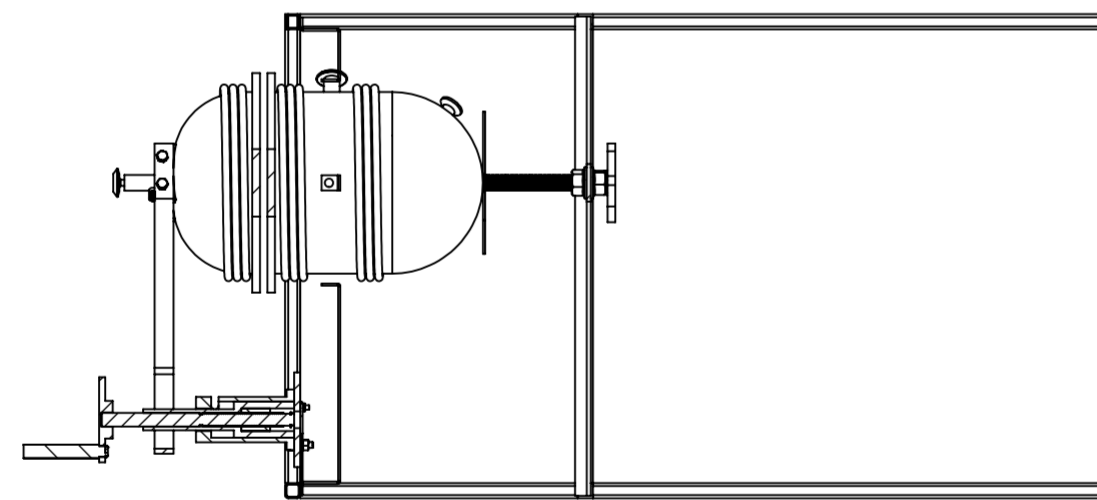
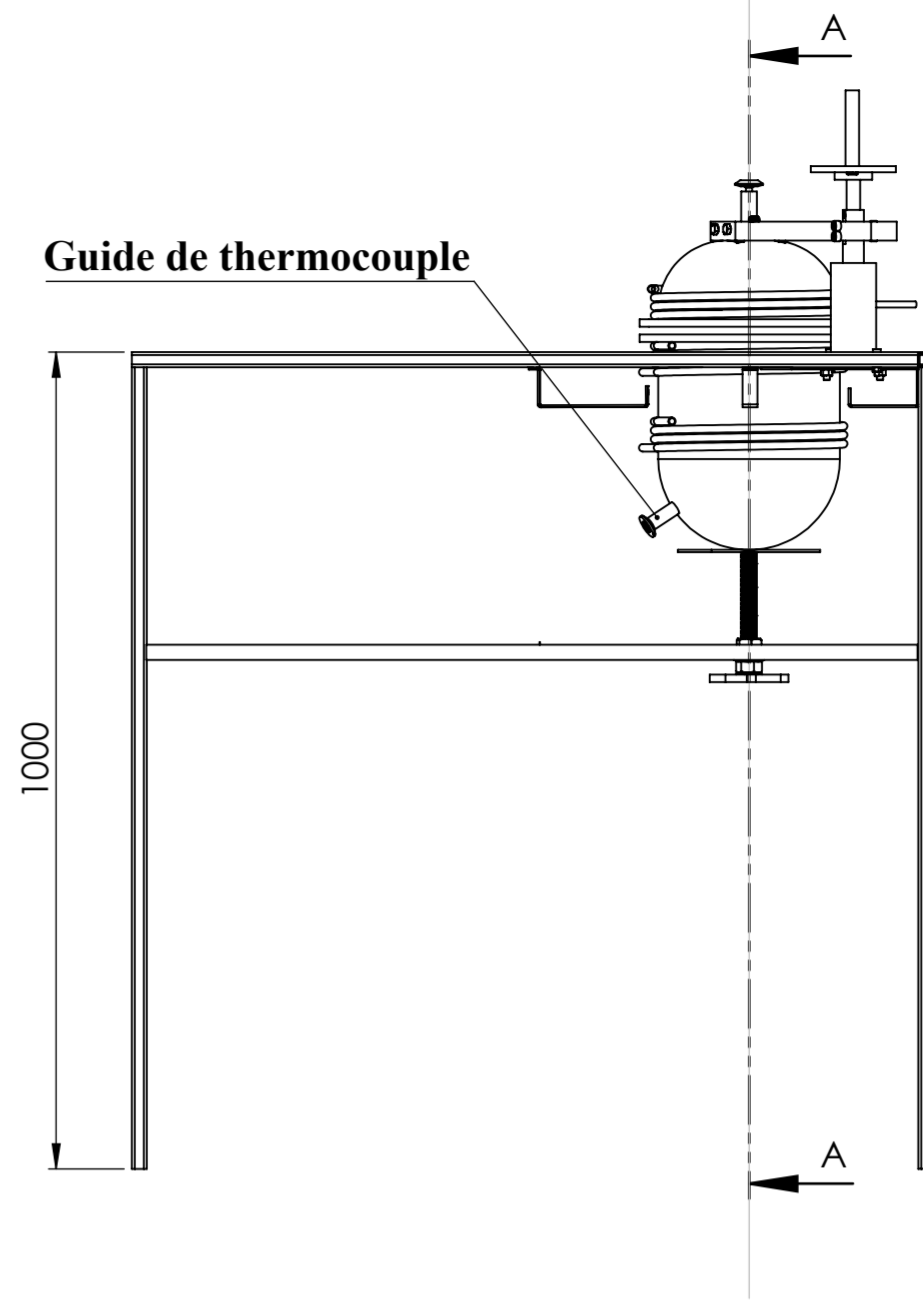
PFE

ABDI Belkacem

Promotion 2023

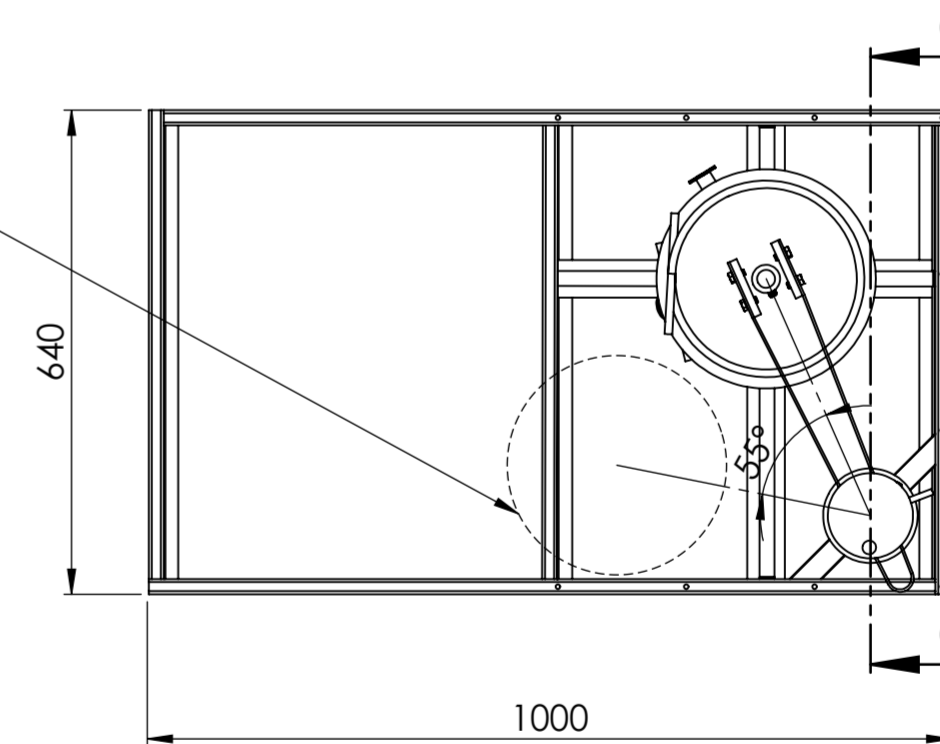


COUPE A-A



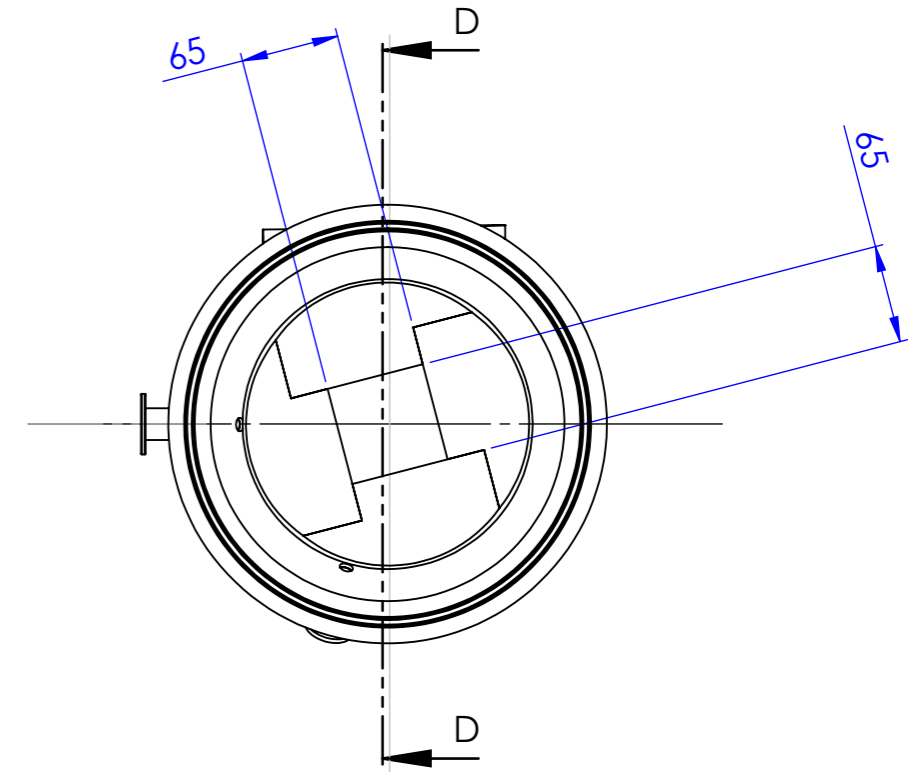
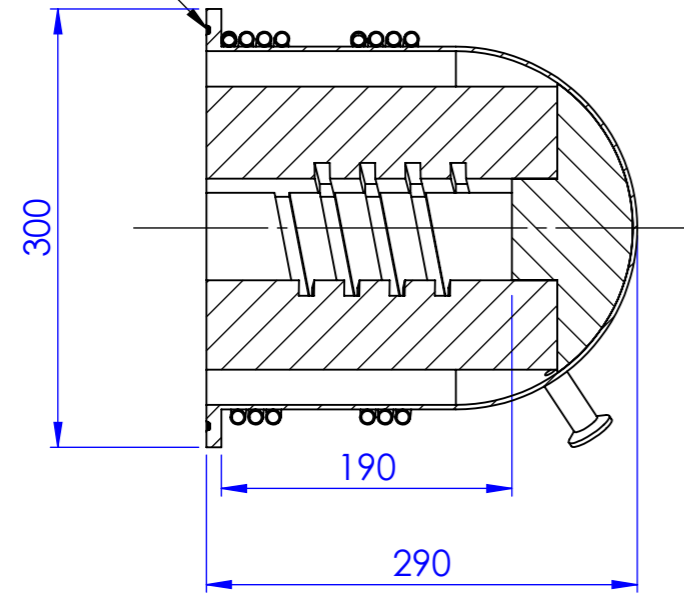
COUPE C-C

Couvercleau position four ouvert

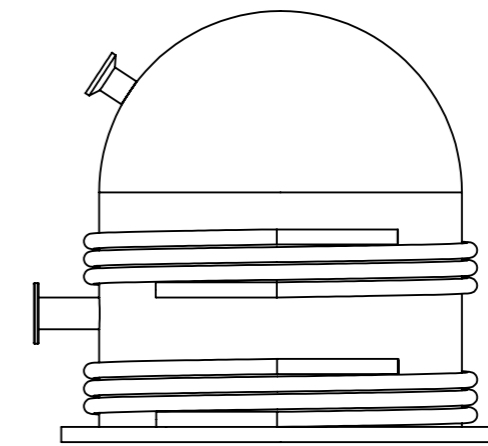
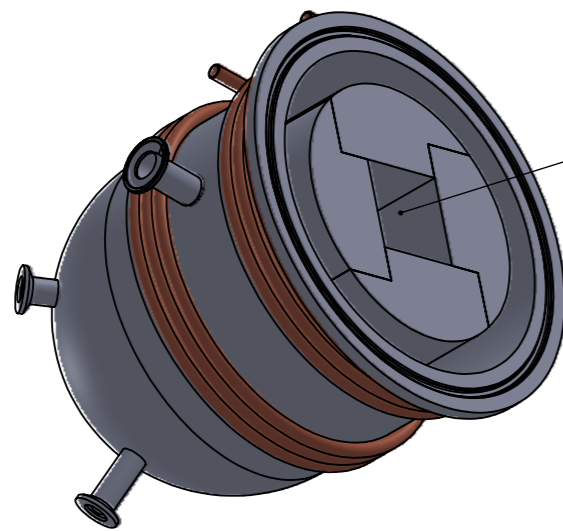


ECHELLE 1:10		<b>FOUR DE FRITTAGE</b>	
Planche N°		UMMTO-FGC-FMP	PFE
A2	M2	ABDI Belkacem	Promotion 2023

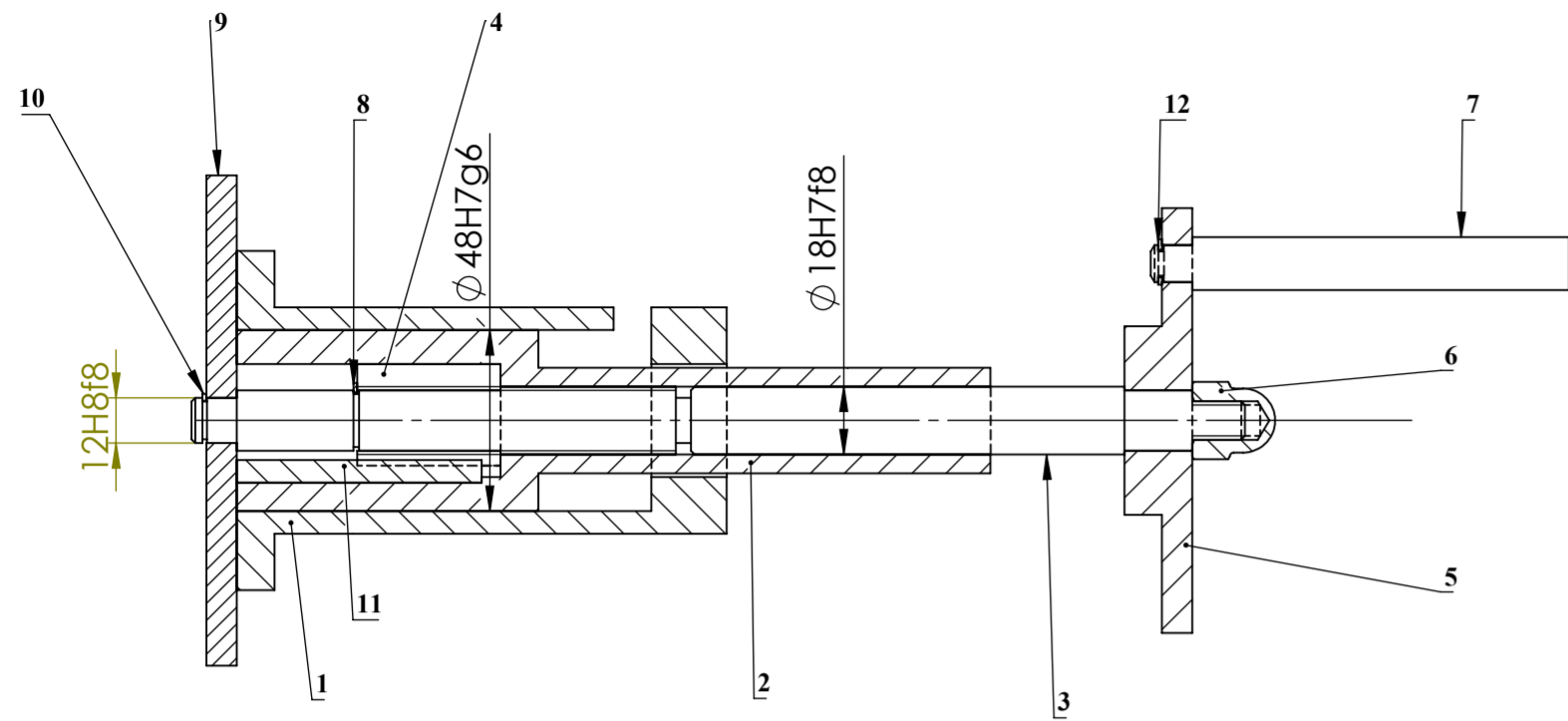
**Joint torique**



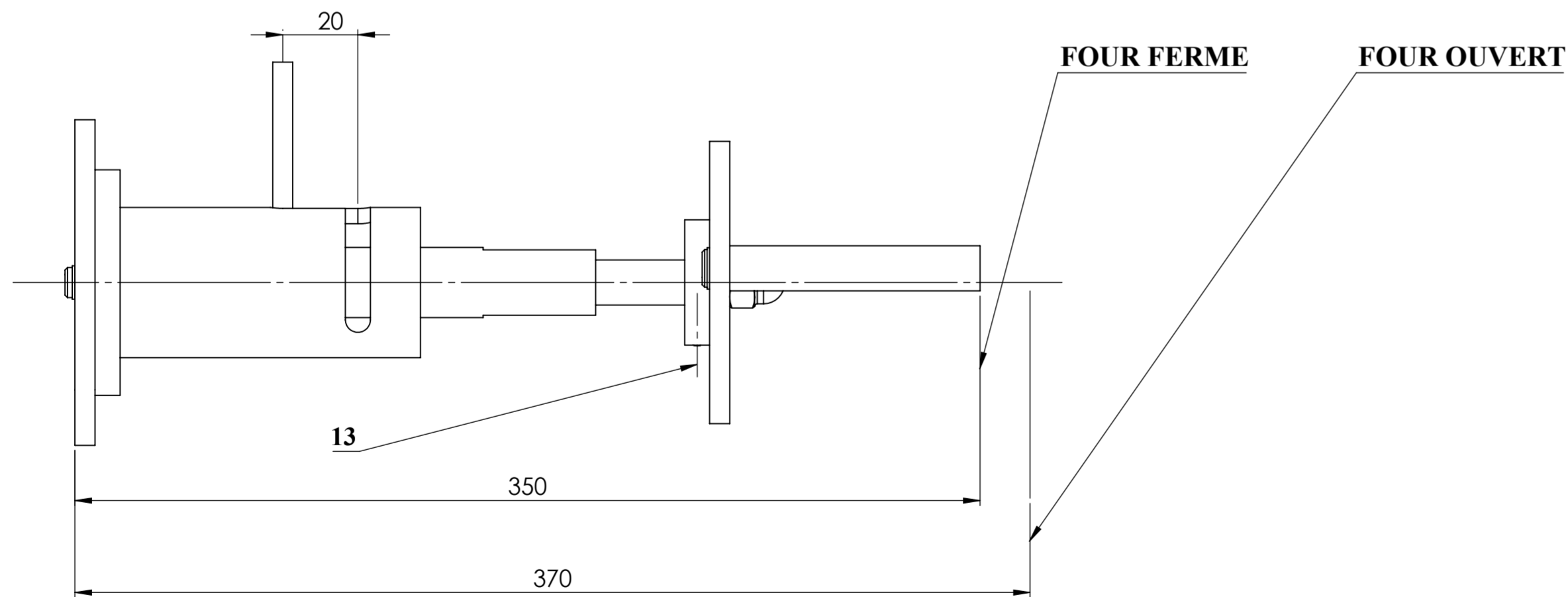
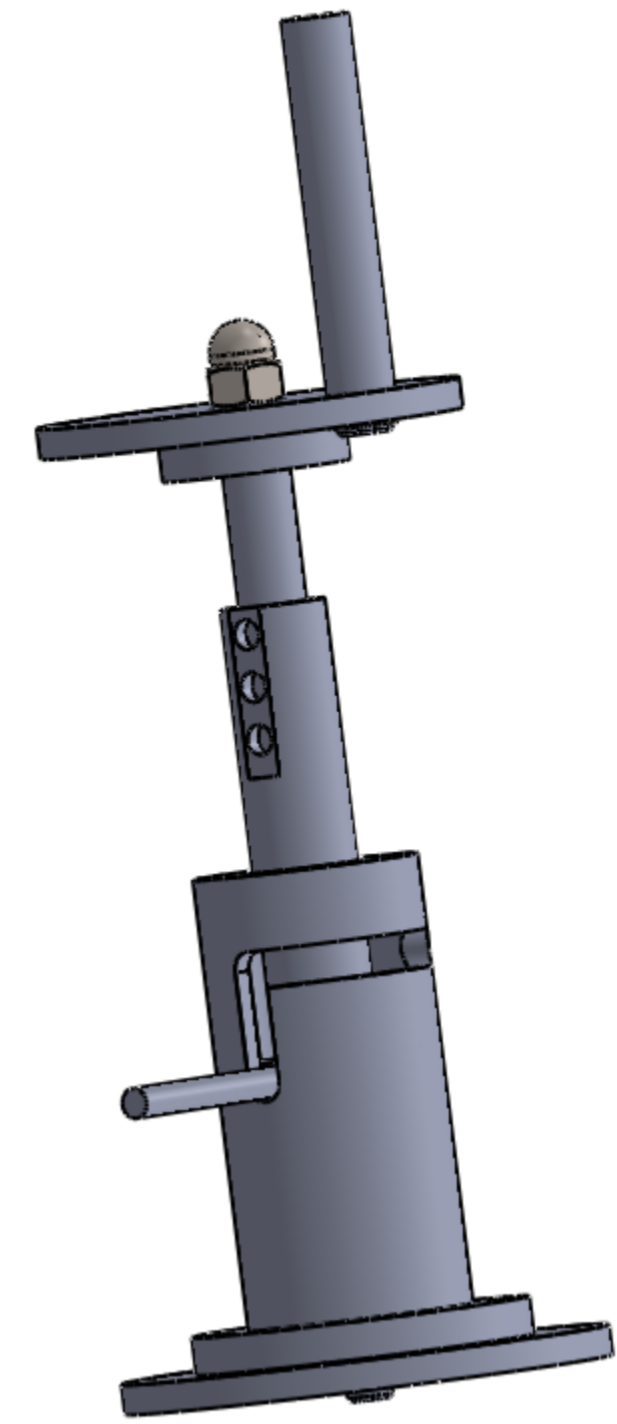
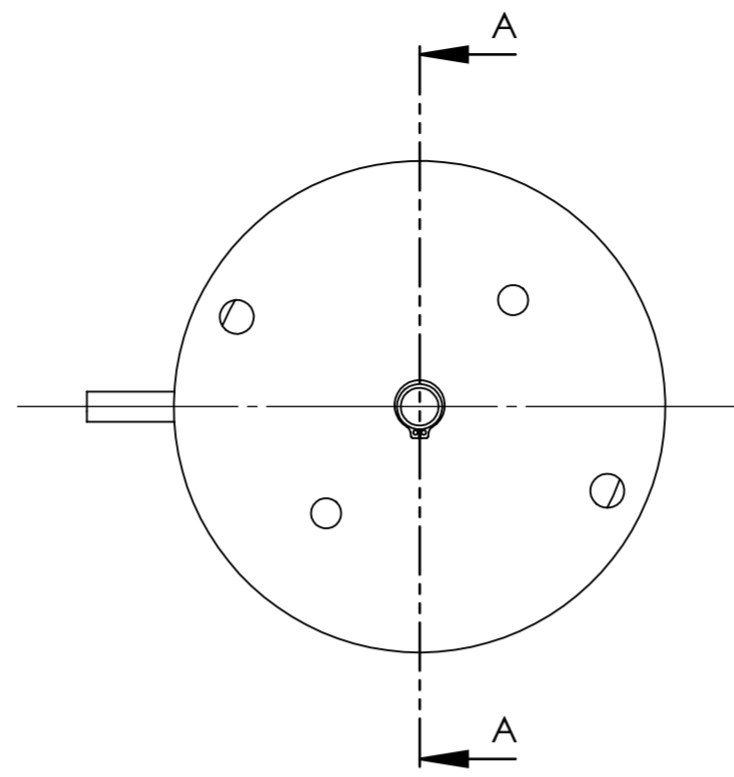
**Chambre de chauffage(frittage)**



ECHELLE 1:2	<b>cuve</b>		
Planche N°	UMMTO-FGC-FMP		PFE
<b>A3</b>	<b>M2</b>	ABDI Belkacem	Promotion 2023

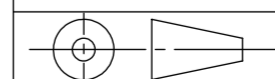


COUPE A-A



REP	Nbr	DESIGNATION	Matiere
1	1	Support du système d'ouverture	Acier
2	1	Fourreau	Acier
3	1	Vis de manoeuvre	Acier
4	1	Bague de guidage	Acier
5	1	Volant	Acier
6	1	Ecrou borgne	Acier
7	1	Manette	Acier
8	1	Circlips	Acier
9	1	Plaque support	Acier
10	1	Circlips	Acier
11	1	Clavette	Acier
12	1	Circlips	Acier
13	1	Vis de pression	Acier

ECHELLE 1:2



Le système d'ouverture du four

Planche N°

UMMTO-FGC-FMP

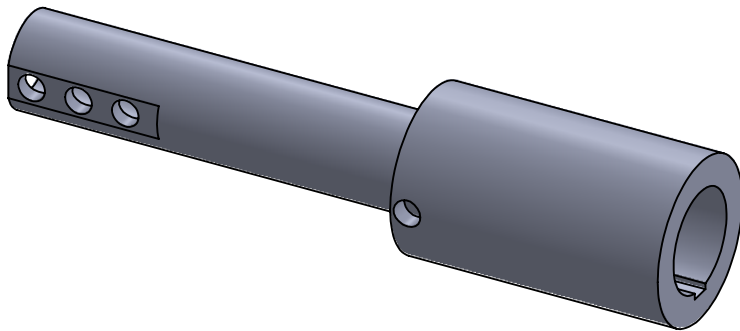
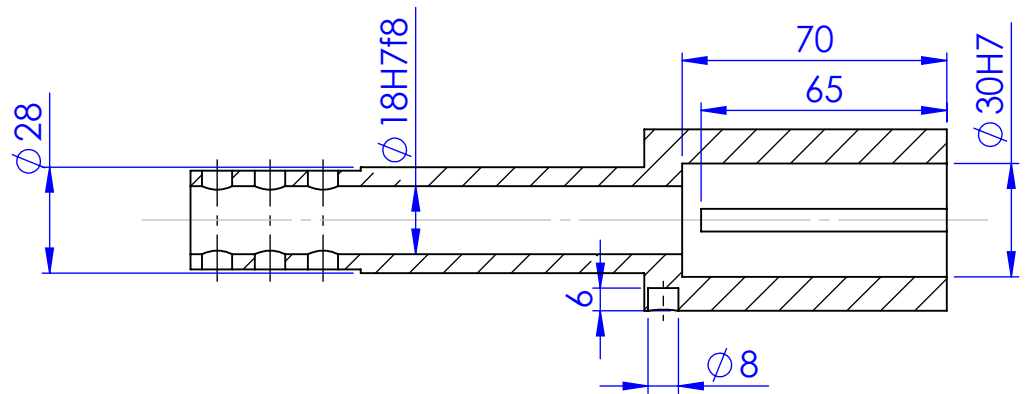
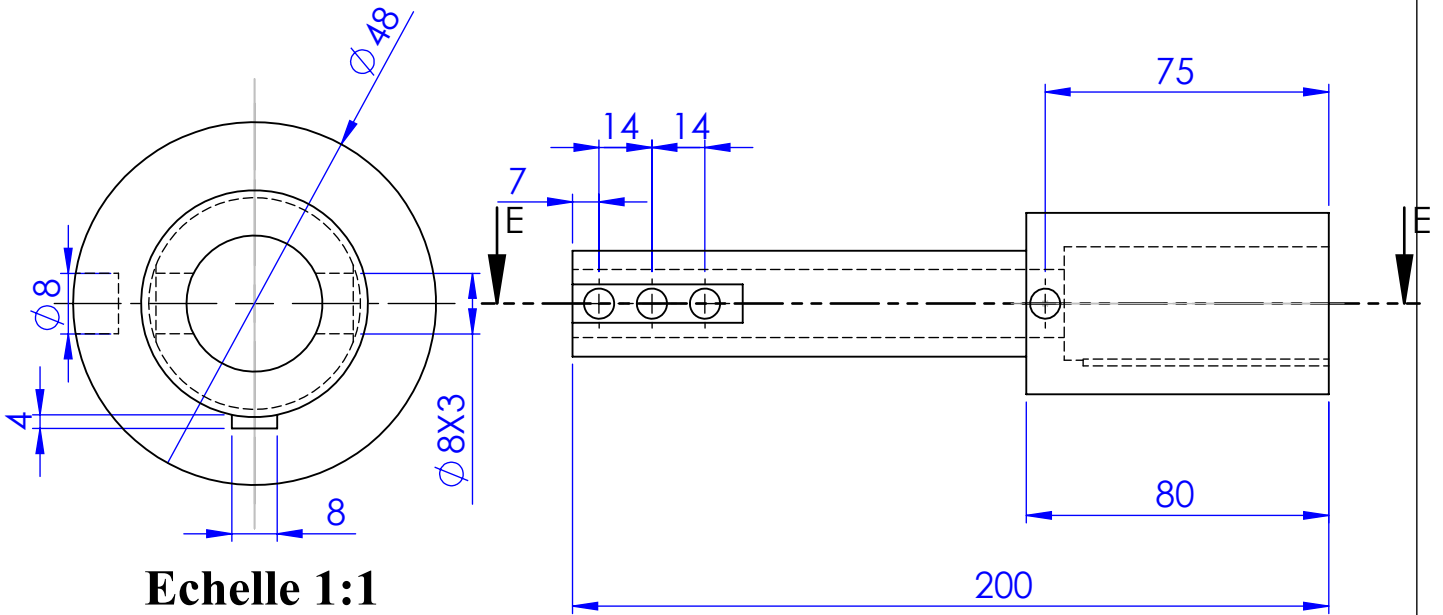
PFE

A2

M2

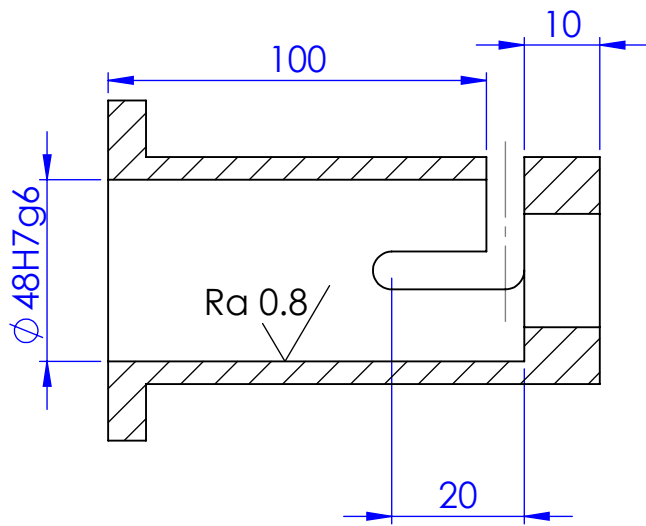
ABDI Belkacem

Promotion 2023

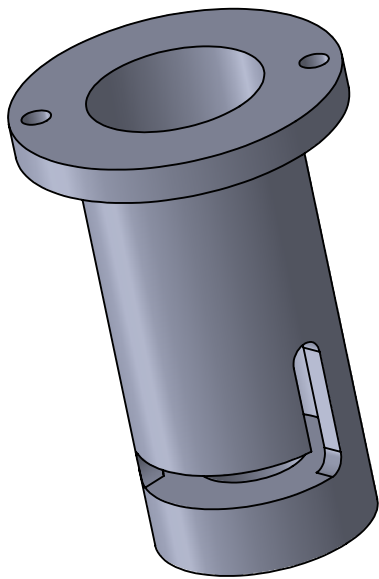
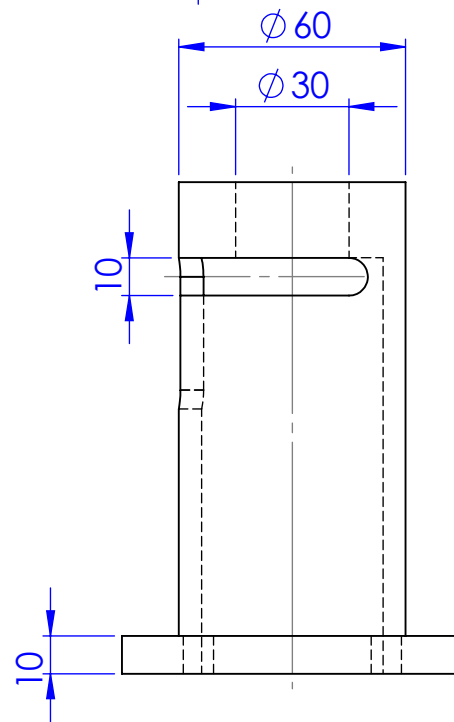
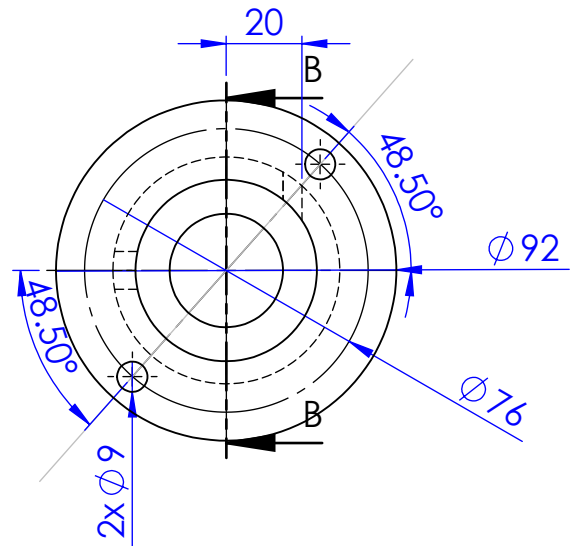


**Remarque:**  
tolérances générales J-JS13 sauf indications  
etats de surface:  $Ra1.6$  /  $\surd$  sauf indication

<b>ECHELLE 1:2</b>	<h1>Fourreau</h1>		
<b>Planche N°</b>	<b>UMMTO-FGC-FMP</b>		<b>PFE</b>
<b>A4</b>	<b>M2</b>	<b>ABDI Belkacem</b>	<b>Promotion 2023</b>



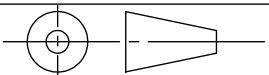
**COUPE B-B**



**Remarque:**  
tolérances générales J-JS13 sauf indications

etats de surface: Ra1.6/ sauf indication

**ECHELLE 1:2**



# Support du système d'ouvreteur

**Planche N°**

**UMMTO-FGC-FMP**

**PFE**

**A4**

**M2**

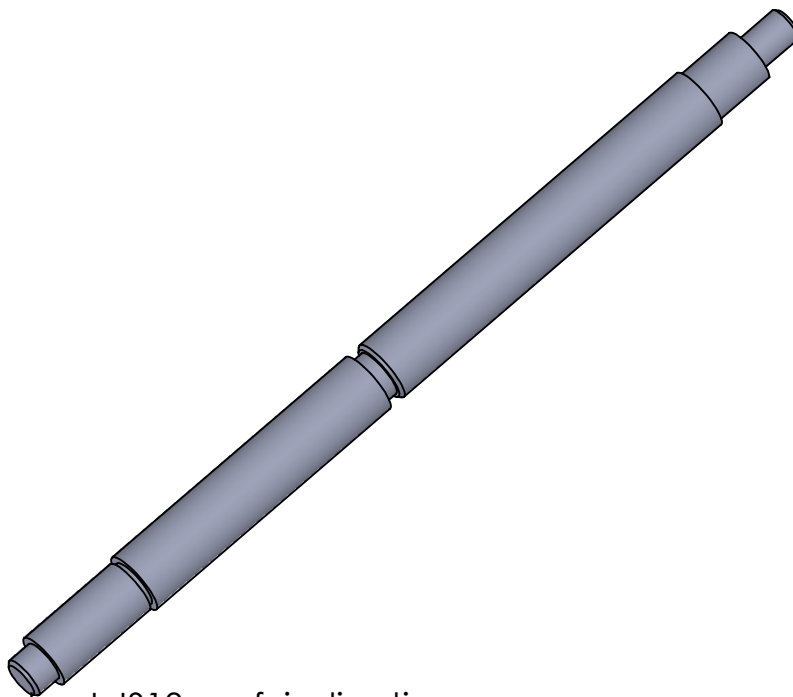
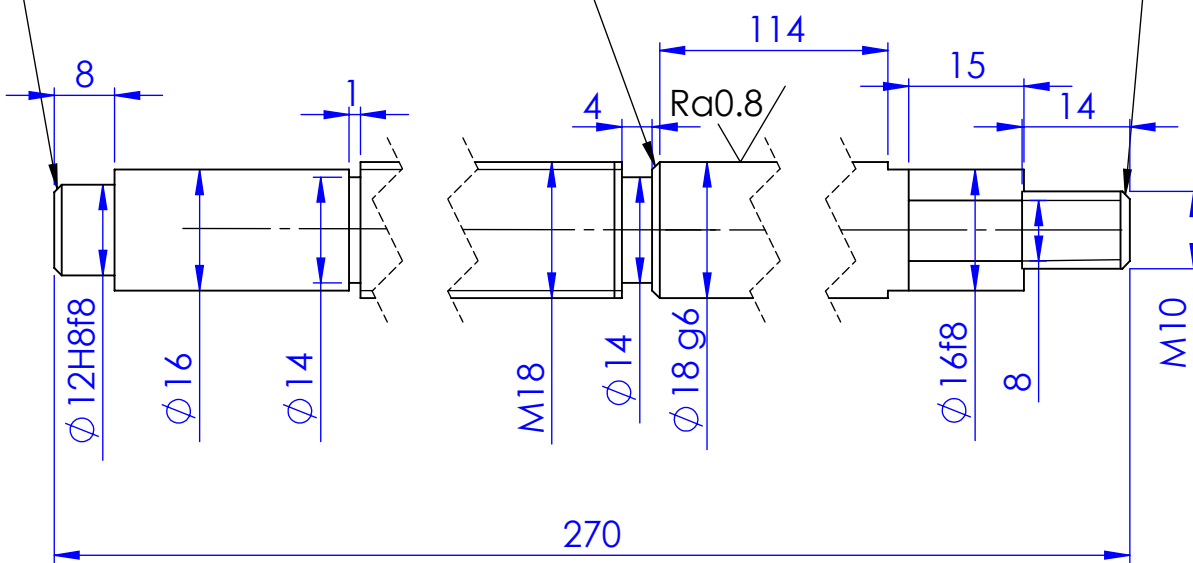
**ABDI Belkacem**

**Promotion 2023**

chanfrein 1x45

chanfrein 1x45

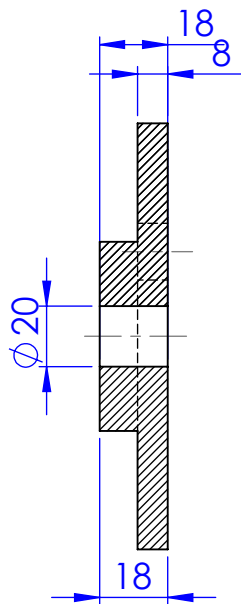
chanfrein 1x45



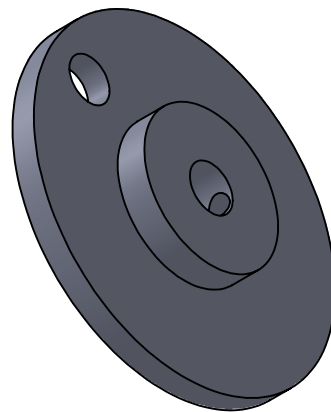
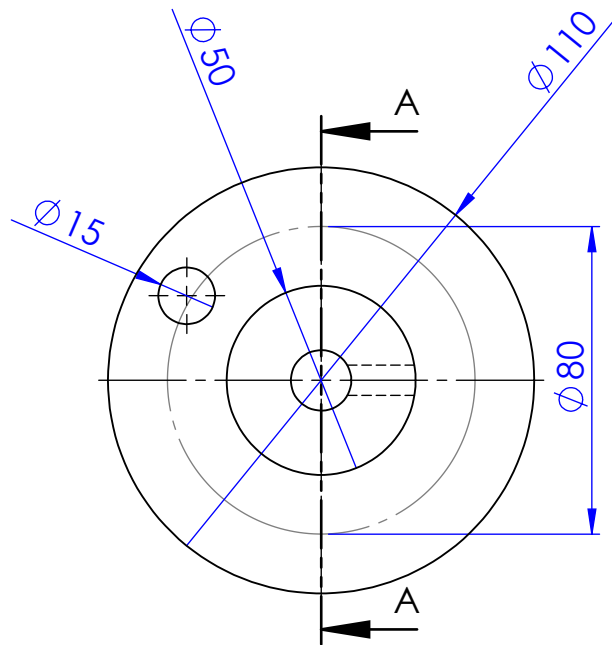
**Remarque:**  
tolérances générales J-JS13 sauf indications

etats de surface:  $Ra1.6$  sauf indication

<b>ECHELLE 1:1</b>	<b>Vis de manoeuvre</b>		
			
<b>Planche N°</b>	<b>UMMTO-FGC-FMP</b>		<b>PFE</b>
<b>A4</b>	<b>M2</b>	<b>ABDI Belkacem</b>	<b>Promotion 2023</b>

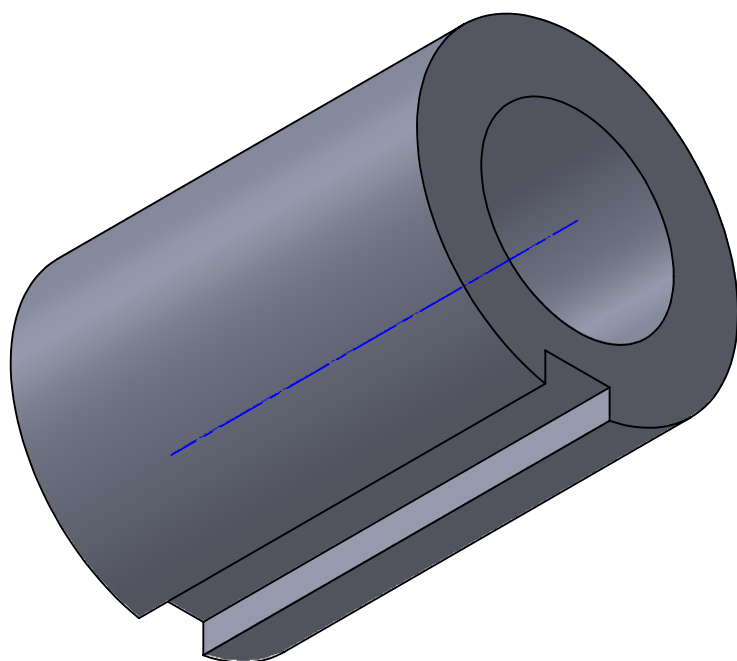
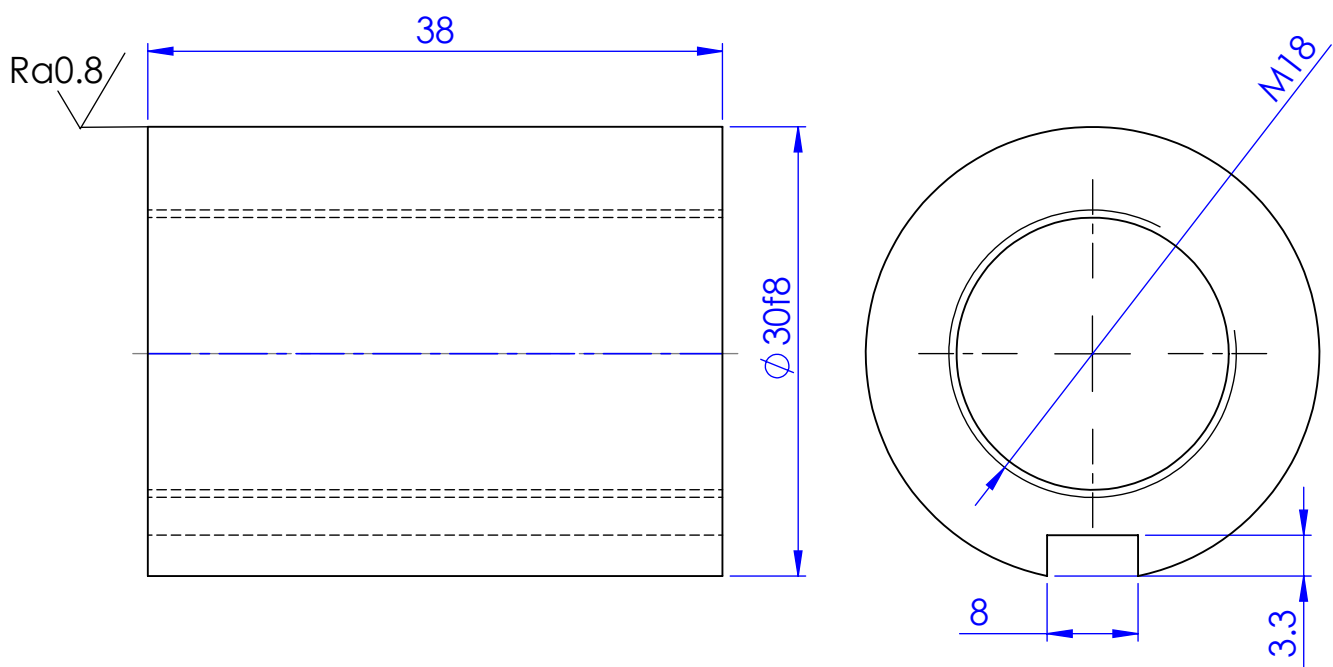


**COUPE A-A**

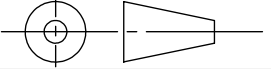


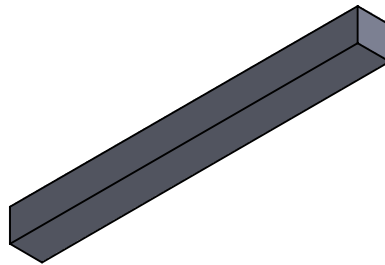
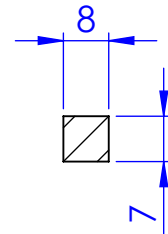
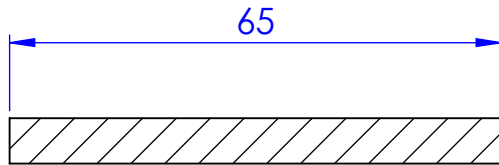
**Remarque:**  
tolérances générales J-JS13 sauf indications

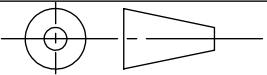
ECHELLE 1:2		<h1>Volant</h1>	
Planche N°		UMMTO-FGC-FMP	
A4		PFE	
M2	ABDI Belkacem		Promotion 2023

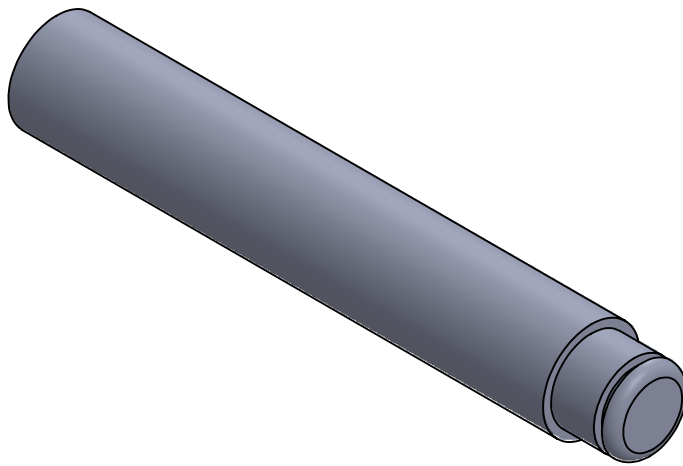
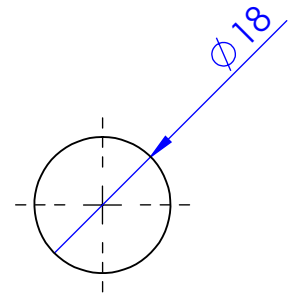
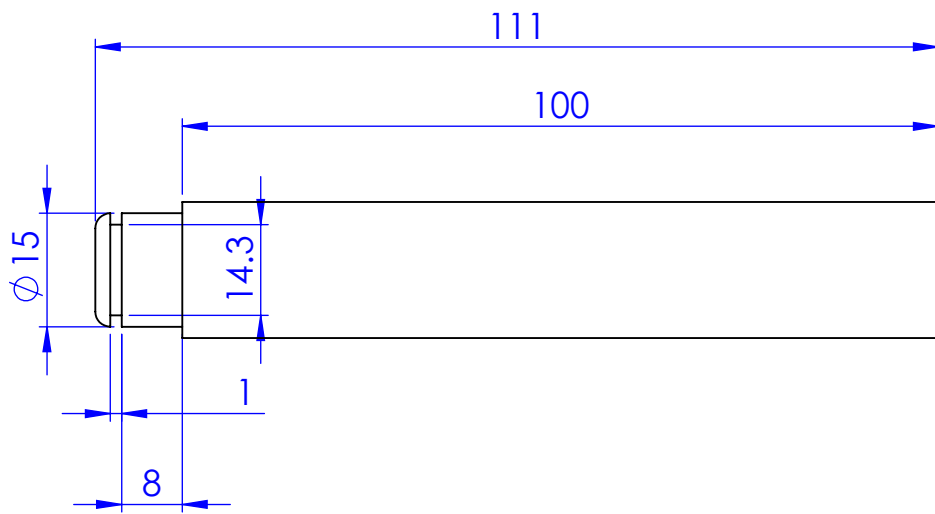


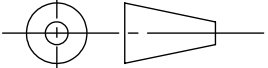
**Remarque:**  
tolérances générales J-JS13 sauf indication

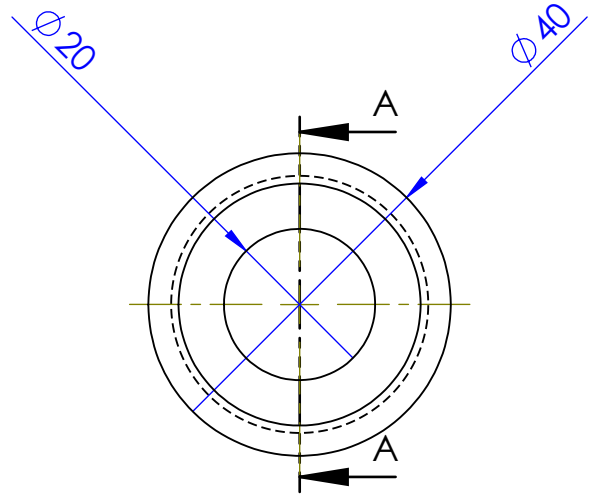
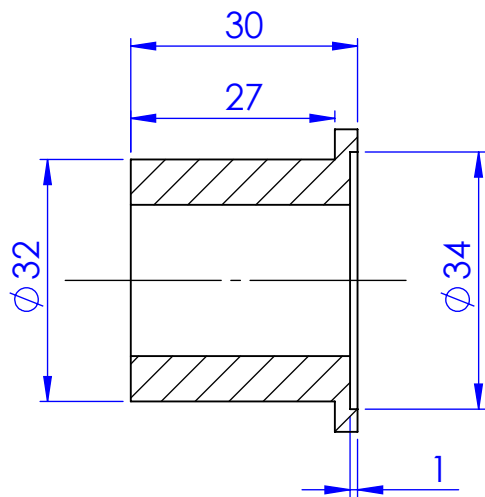
<p><b>ECHELLE 2:1</b></p>	<h1>Bague de guidage</h1>		
	<p><b>Planche N°</b></p>		<p><b>PFE</b></p>
<p><b>A4</b></p>	<p><b>M2</b></p>	<p><b>UMMTO-FGC-FMP</b></p> <p><b>ABDI Belkacem</b></p>	<p><b>Promotion 2023</b></p>



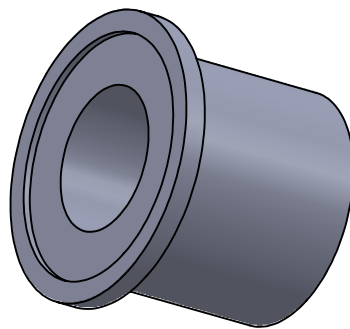
<b>ECHELLE 1:1</b>	<b>clavette</b>		
			
<b>Planche N°</b>	<b>UMMTO-FGC-FMP</b>		<b>PFE</b>
<b>A4</b>	<b>M2</b>	<b>ABDI Belkacem</b>	<b>Promotion 2023</b>



<p><b>ECHELLE 1:1</b></p>	<h1>Manette moletée</h1>		
			
<p>Planche N°</p>	<p>UMMTO-FGC-FMP</p>		<p>PFE</p>
<p><b>A4</b></p>	<p><b>M2</b></p>	<p>ABDI Belkacem</p>	<p>Promotion 2023</p>



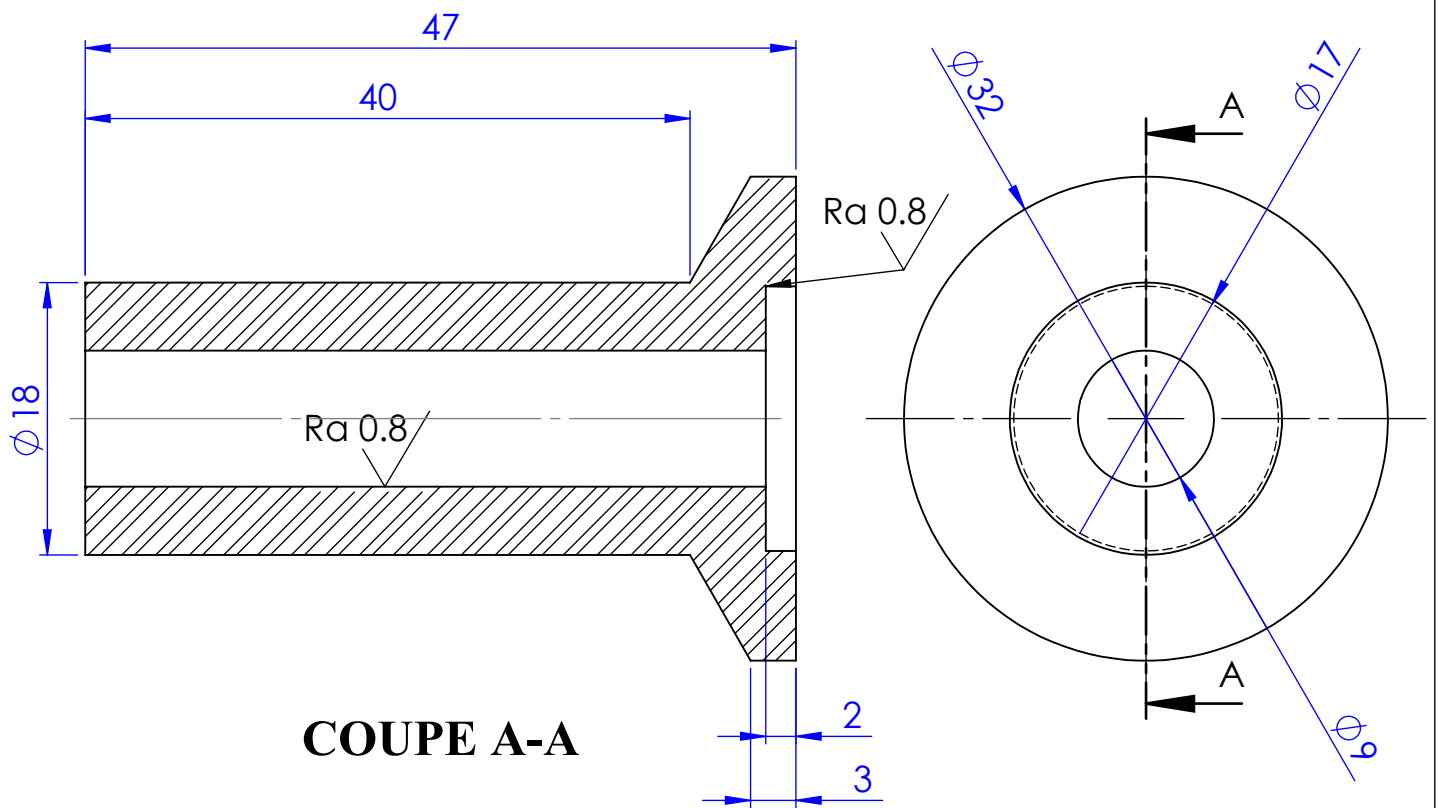
COUPE A-A



**Remarque:**  
tolérances générales J-JS13 sauf indications

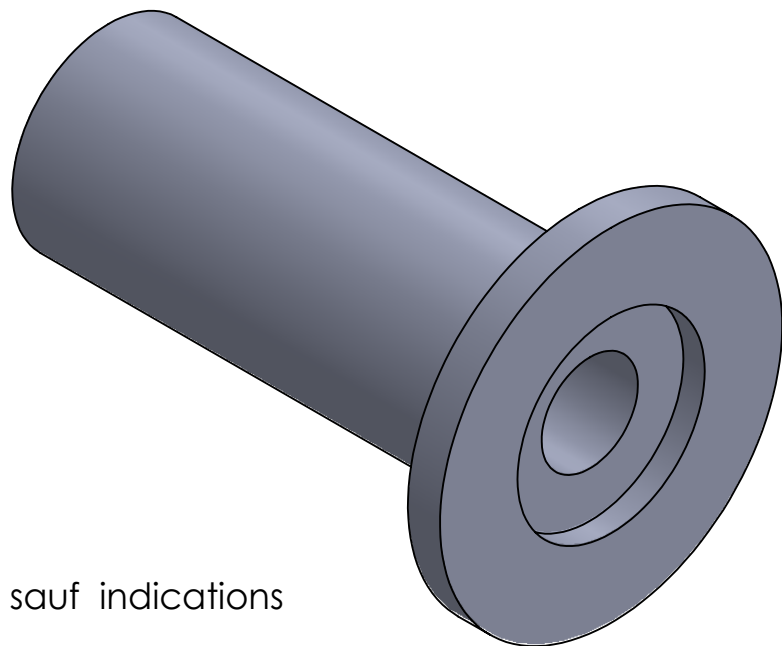
états de surface:  $Ra1.6$  /  $\surd$  sauf indication

ECHELLE 1:1		<h1>Guide du câble électrique</h1>	
Planche N°		UMMTO-FGC-FMP	
A4		PFE	
M2	ABDI Belkacem		Promotion 2023

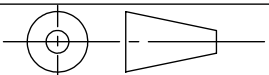


**Remarque:**  
tolérances générales J-JS13 sauf indications

états de surface:  $\sqrt{Ra 1.6}$  sauf indication



**ECHELLE 2:1**



# Guide de thermocouple

**Planche N°**

**UMMTO-FGC-FMP**

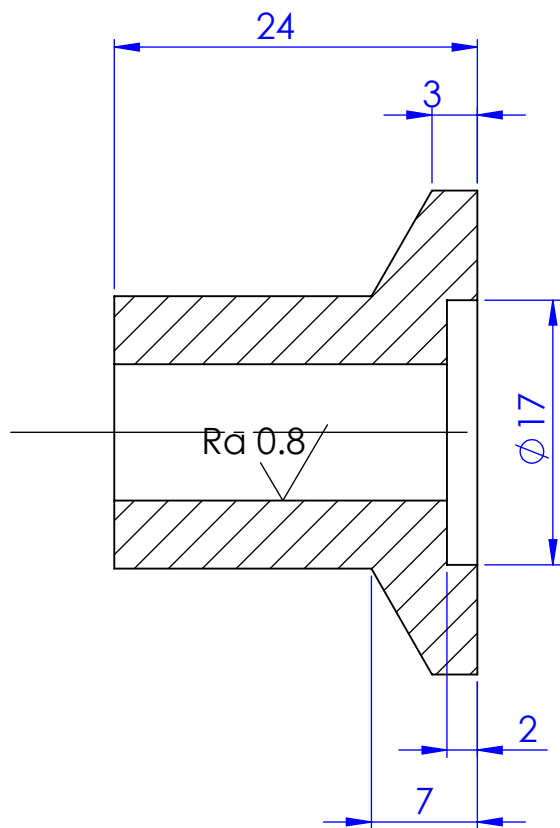
**PFE**

**A4**

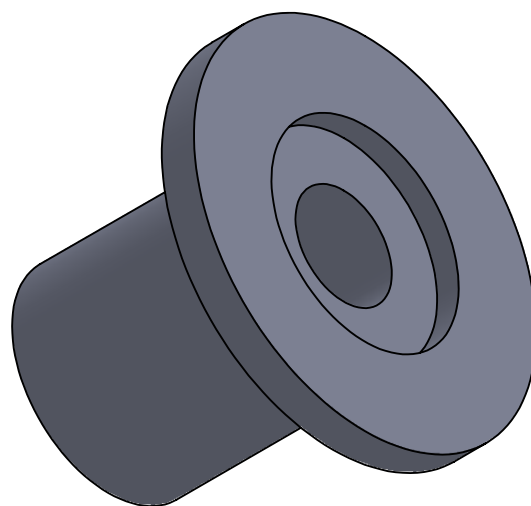
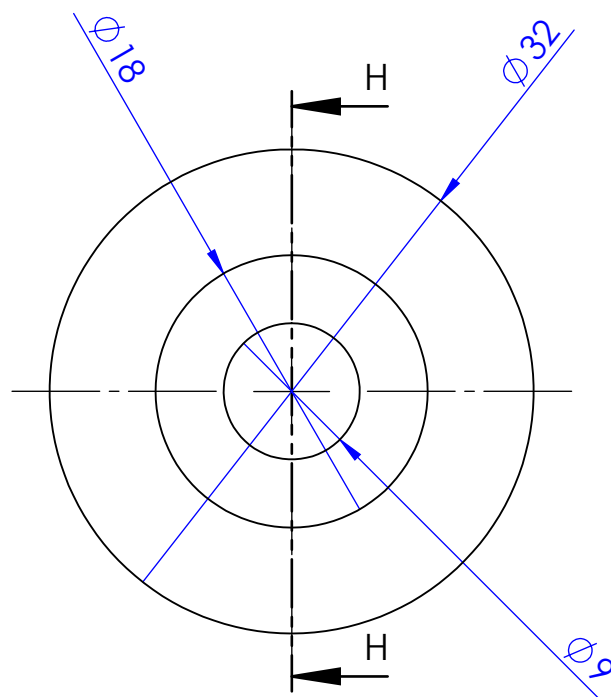
**M2**

**ABDI Belkacem**

**Promotion 2023**



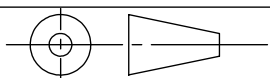
COUPE H-H



**Remarque:**  
tolérances générales J-JS13 sauf indications

états de surface:  $\sqrt{Ra1.6}$  sauf indication

ECHELLE 2:1



## Guide de la buse de mise sous vide

Planche N°

UMMTO-FGC-FMP

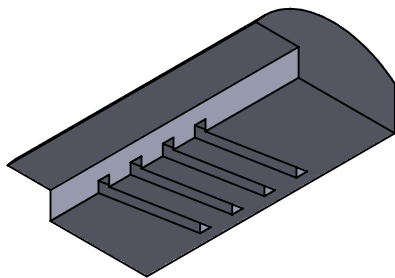
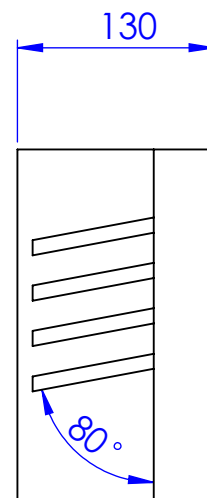
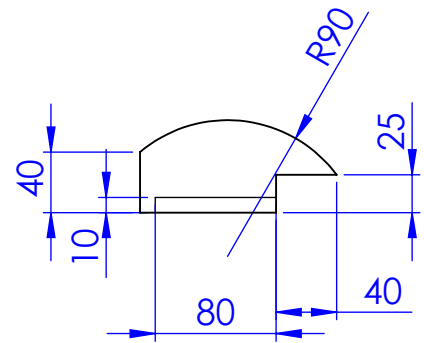
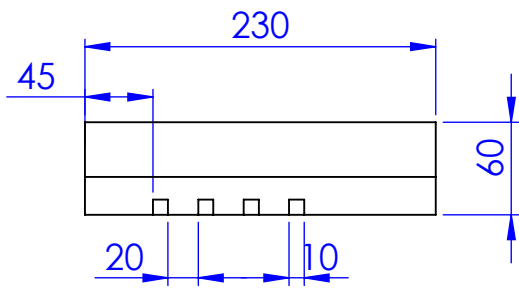
PFE

A4

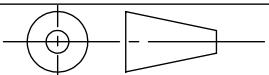
M2

ABDI Belkacem

Promotion 2023



ECHELLE 1:5



# Brique réfractaire

Planche N°

UMMTO-FGC-FMP

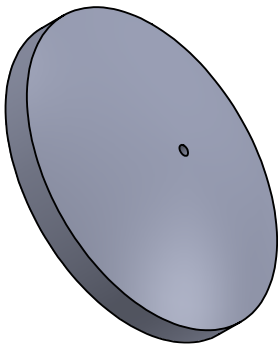
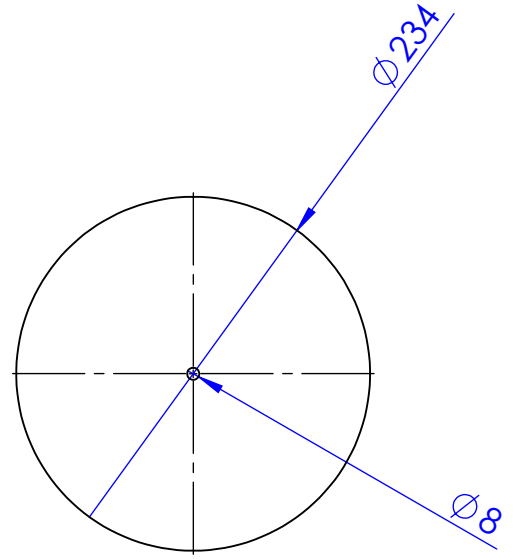
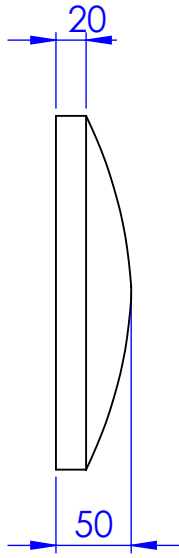
PFE

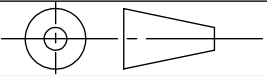
A4

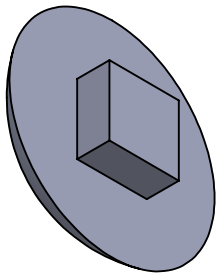
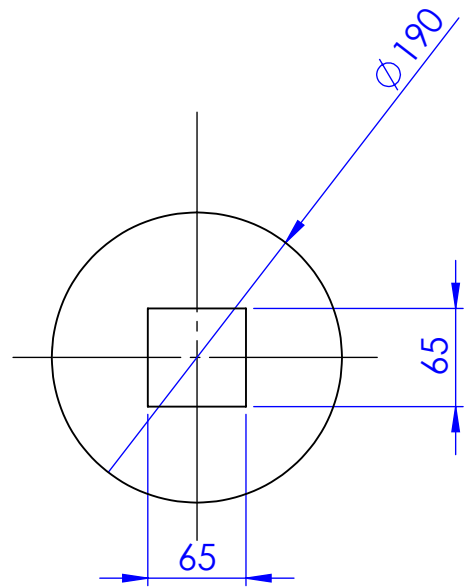
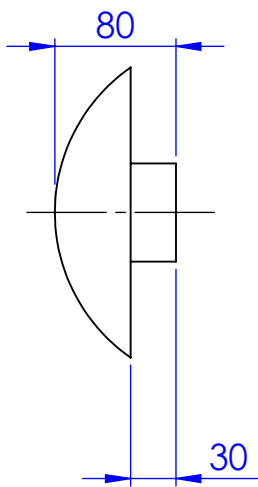
M2

ABDI Belkacem

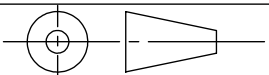
Promotion 2023



<b>ECHELLE 1:5</b>	<b>Brique réfractaire</b>		
			
<b>Planche N°</b>	<b>UMMTO-FGC-FMP</b>		<b>PFE</b>
<b>A4</b>	<b>M2</b>	<b>ABDI Belkacem</b>	<b>Promotion 2023</b>



**ECHELLE 1:5**



# Brique réfractaire

**Planche N°**

**UMMTO-FGC-FMP**

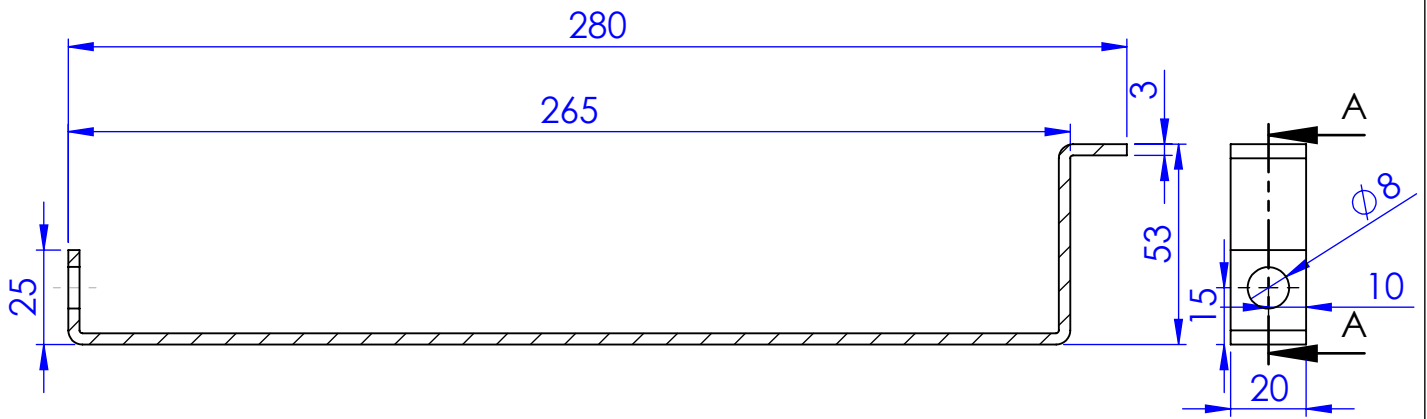
**PFE**

**A4**

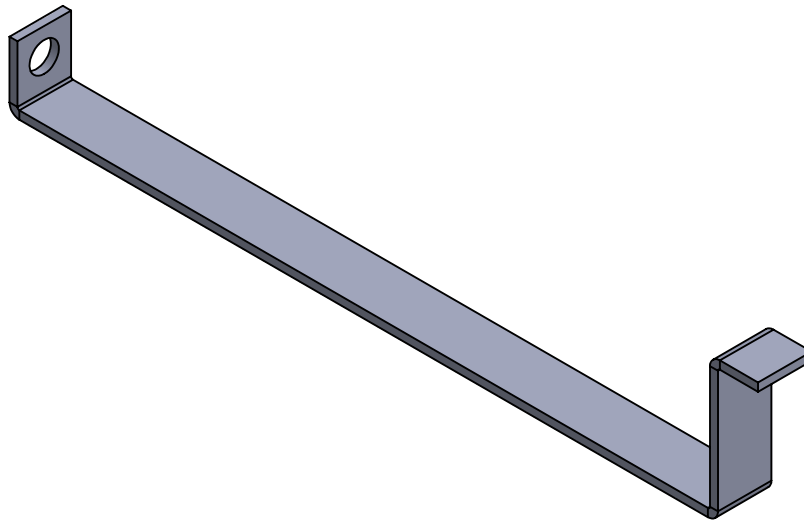
**M2**

**ABDI Belkacem**

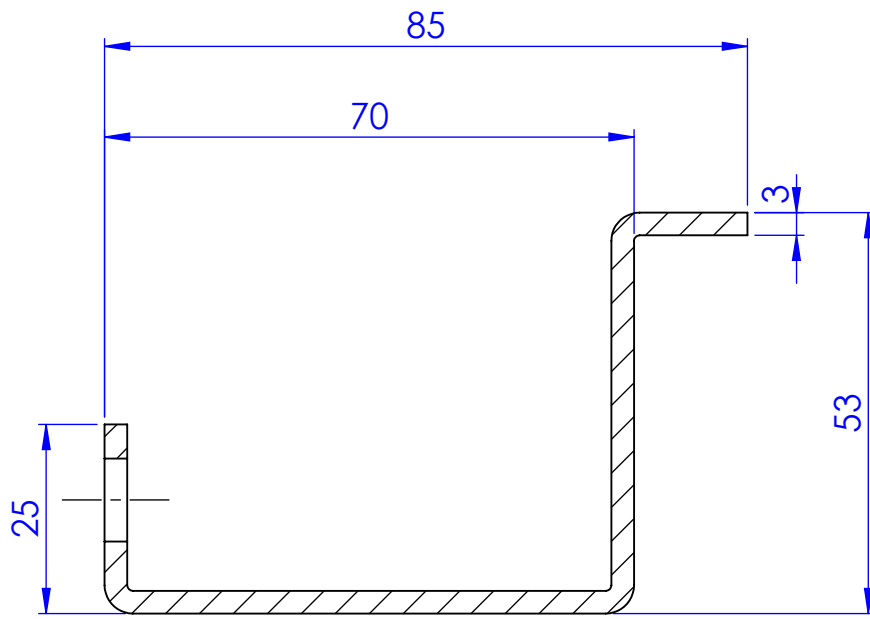
**Promotion 2023**



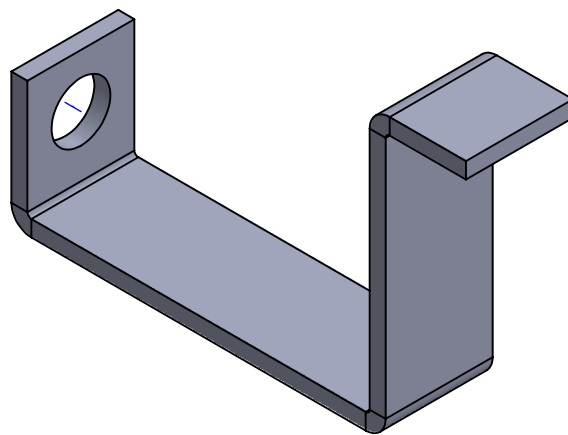
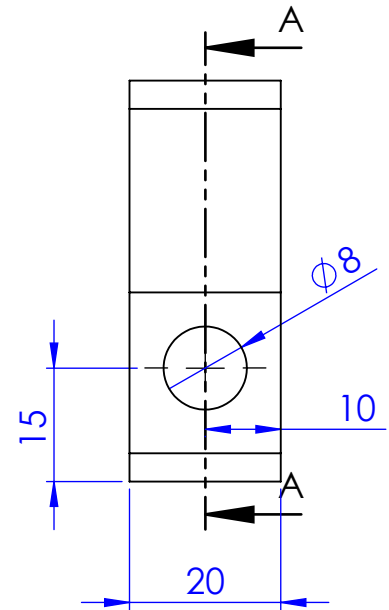
**COUPE A-A**



<p><b>ECHELLE 1:2</b></p>	<h1>Patte de fixation</h1>		
<p><b>Planche N°</b></p>	<p><b>UMMTO-FGC-FMP</b></p>		<p><b>PFE</b></p>
<p><b>A4</b></p>	<p><b>M2</b></p>	<p><b>ABDI Belkacem</b></p>	<p><b>Promotion 2023</b></p>



COUPE A-A



# Patte de fixation

ECHELLE 1:1

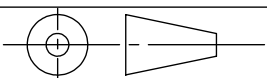


Planche N°

UMMTO-FGC-FMP

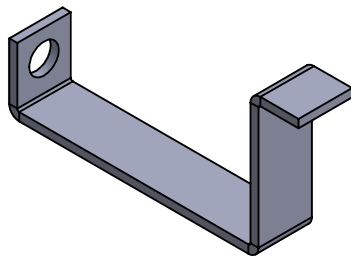
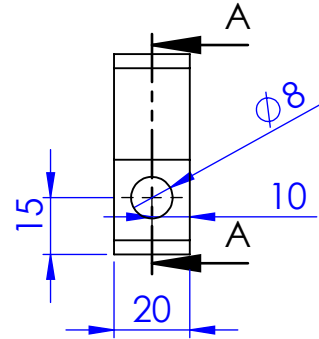
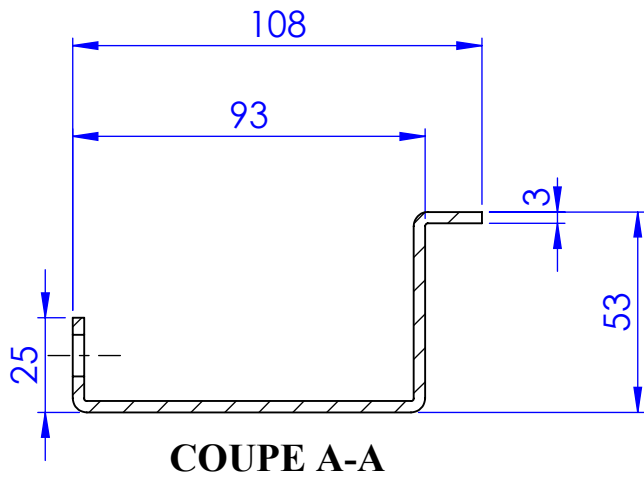
PFE

A4

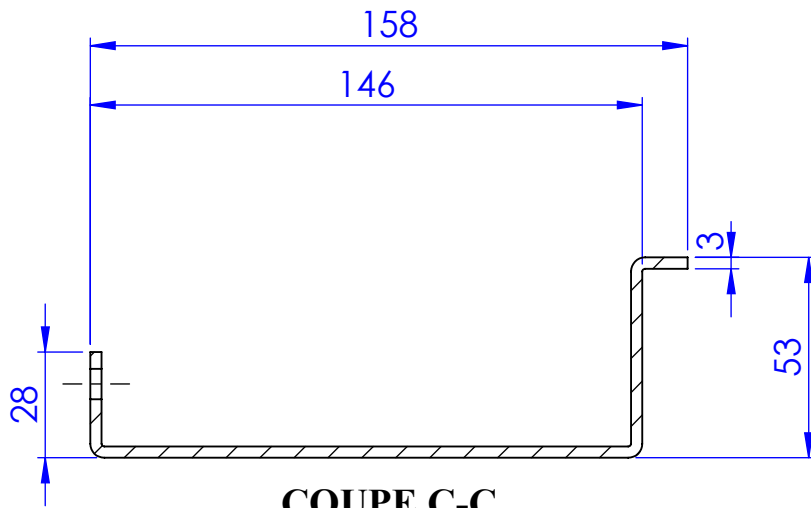
M2

ABDI Belkacem

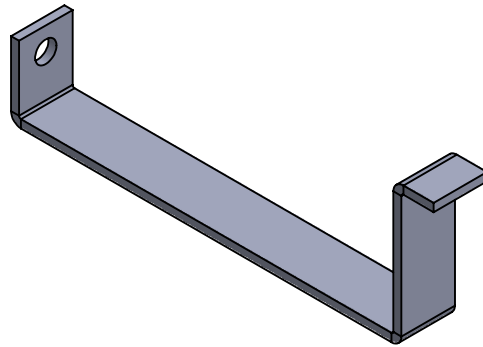
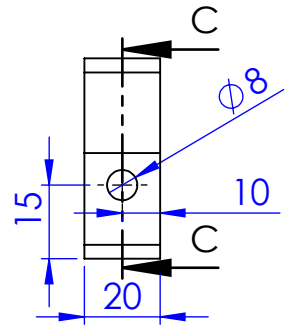
Promotion 2023



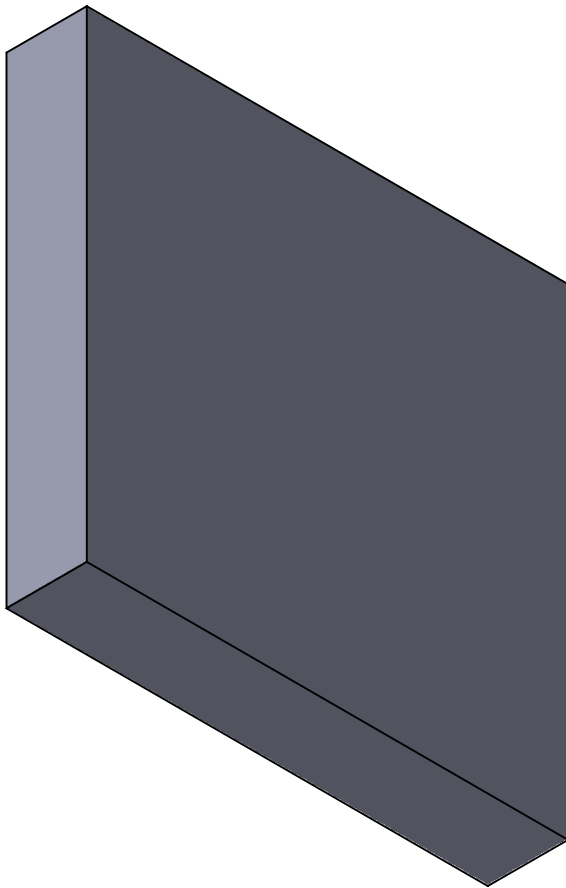
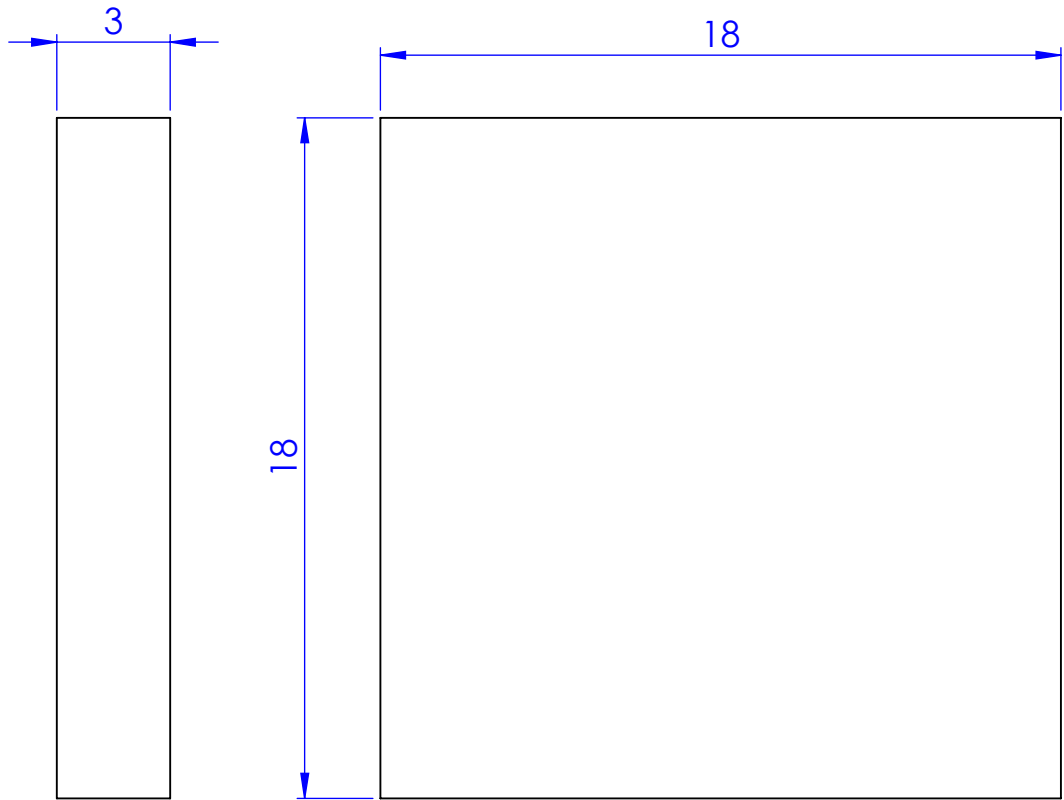
<p><b>ECHELLE 1:2</b></p>	<h1>Patte de fixation</h1>		
<p><b>Planche N°</b></p>	<p><b>UMMTO-FGC-FMP</b></p>		<p><b>PFE</b></p>
<p><b>A4</b></p>	<p><b>M2</b></p>	<p><b>ABDI Belkacem</b></p>	<p><b>Promotion 2023</b></p>

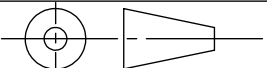


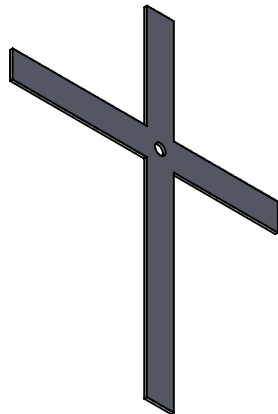
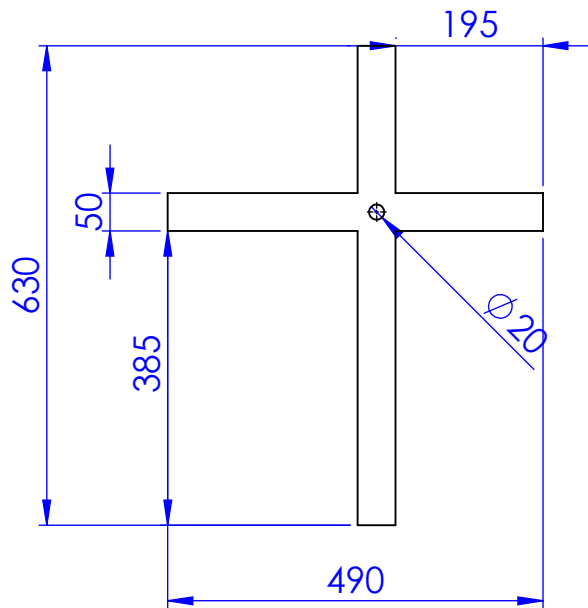
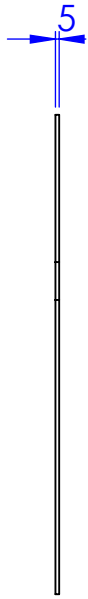
**COUPE C-C**



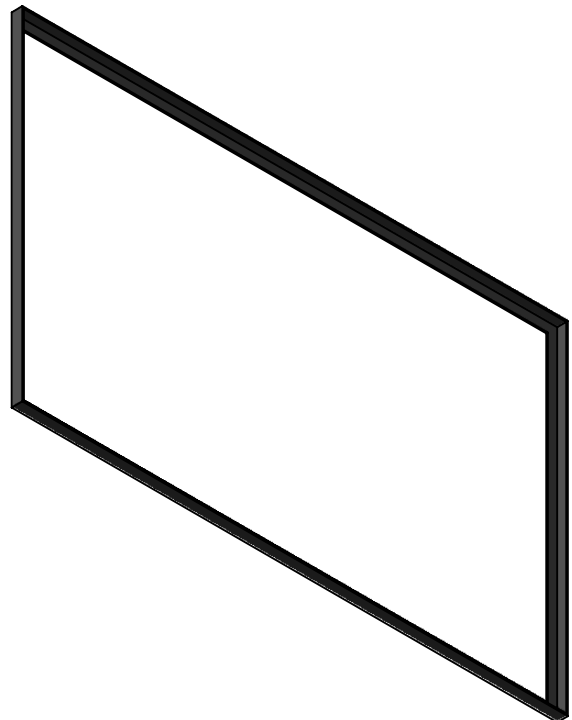
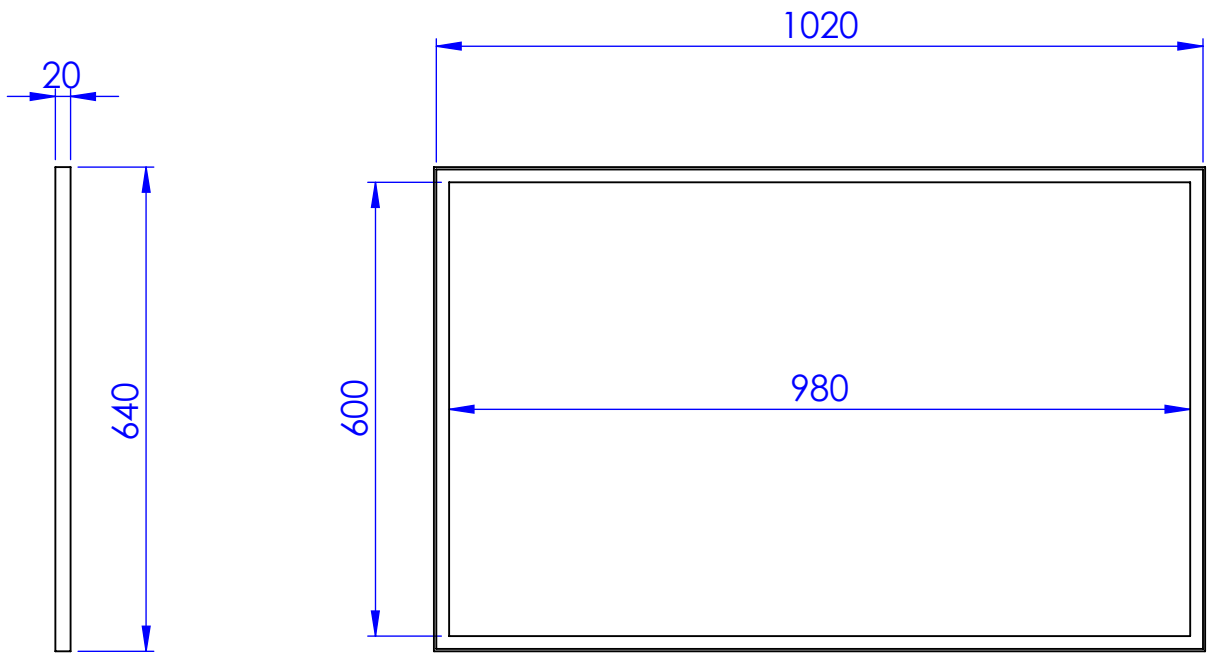
ECHELLE 1:2		<h1>Patte de fixation</h1>	
Planche N°		UMMTO-FGC-FMP	PFE
A4	M2	ABDI Belkacem	Promotion 2023



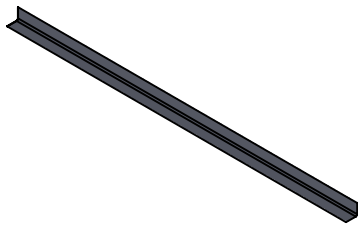
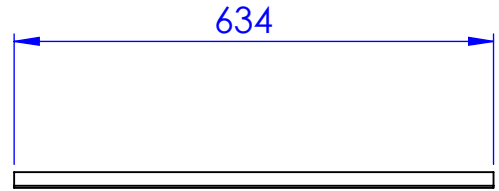
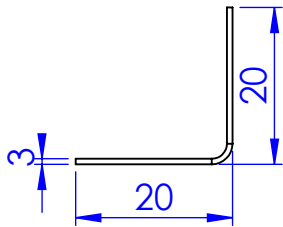
<p><b>ECHELLE 5:1</b></p>	<p><b>paroi du système de réglage de la cuve</b></p>		
			
<p><b>Planche N°</b></p>	<p><b>UMMTO-FGC-FMP</b></p>		<p><b>PFE</b></p>
<p><b>A4</b></p>	<p><b>M2</b></p>	<p><b>ABDI Belkacem</b></p>	<p><b>Promotion 2023</b></p>

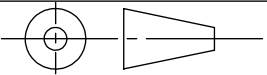


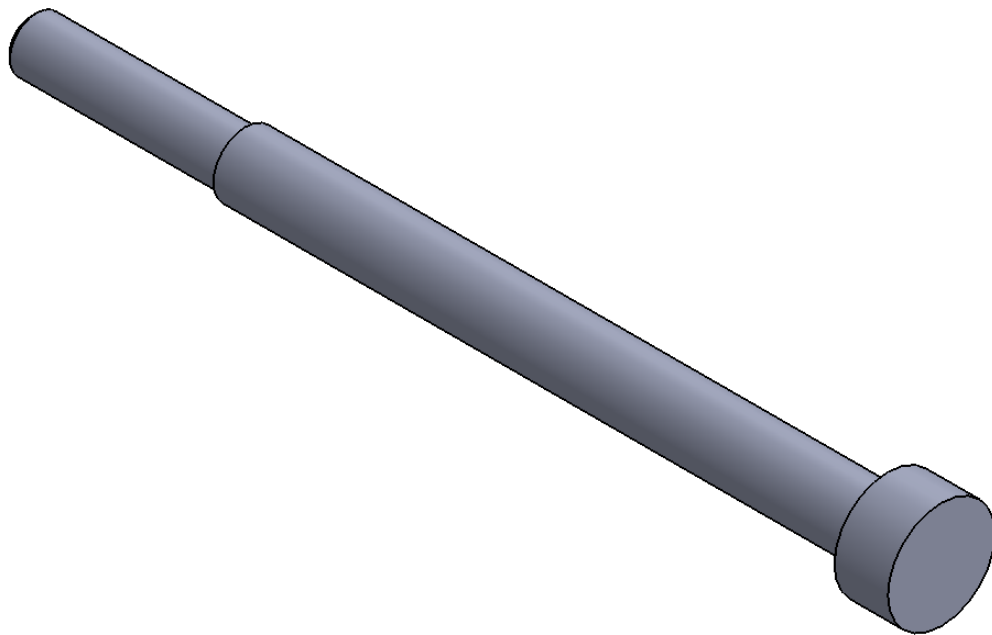
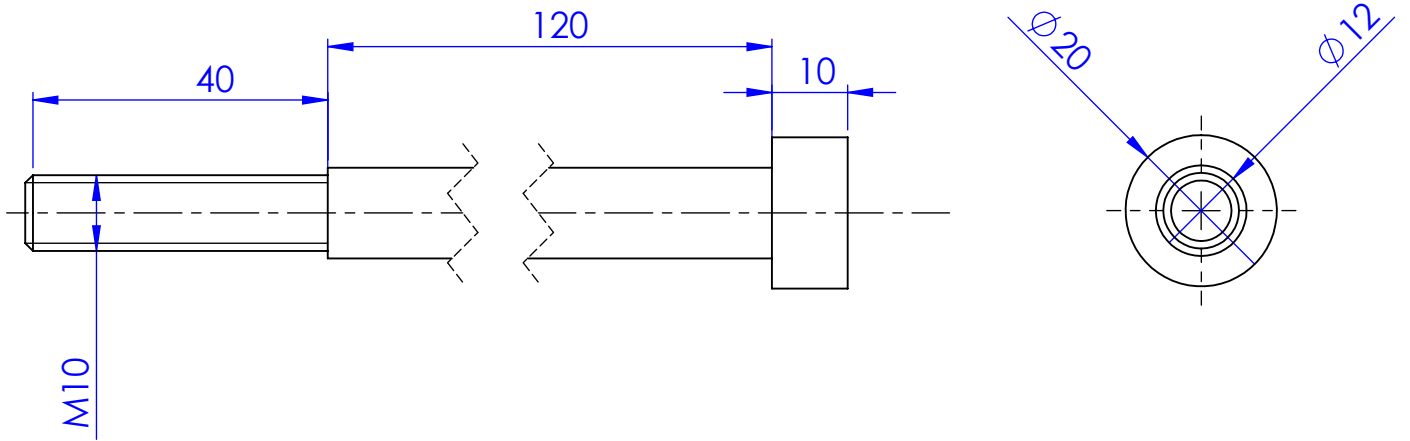
<b>ECHELLE 1:10</b>	<b>Support du système de réglage de la cuve</b>		
<b>Planche N°</b>	<b>UMMTO-FGC-FMP</b>		<b>PFE</b>
<b>A4</b>	<b>M2</b>	<b>ABDI Belkacem</b>	<b>Promotion 2023</b>



<b>ECHELLE 1:10</b>		<h1>Cadre</h1>	
<b>Planche N°</b>		<b>UMMTO-FGC-FMP</b>	<b>PFE</b>
<b>A4</b>	<b>M2</b>	<b>ABDI Belkacem</b>	<b>Promotion 2023</b>



<b>ECHELLE 1:10</b>	<b>Traverse transversale</b>		
			
<b>Planche N°</b>	<b>UMMTO-FGC-FMP</b>		<b>PFE</b>
<b>A4</b>	<b>M2</b>	<b>ABDI Belkacem</b>	<b>Promotion 2023</b>

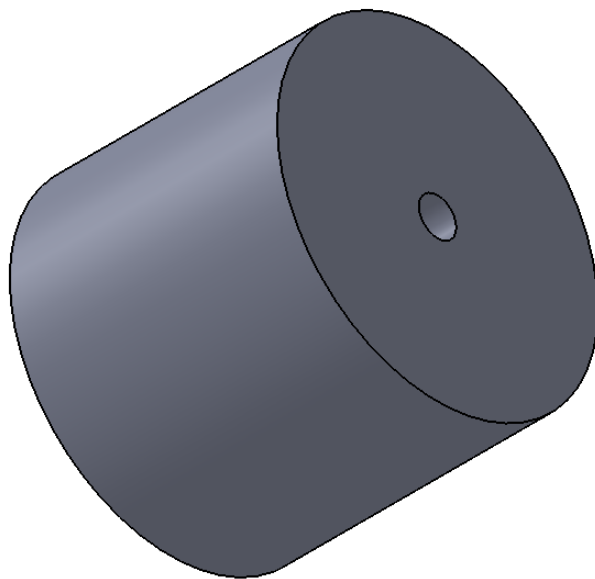
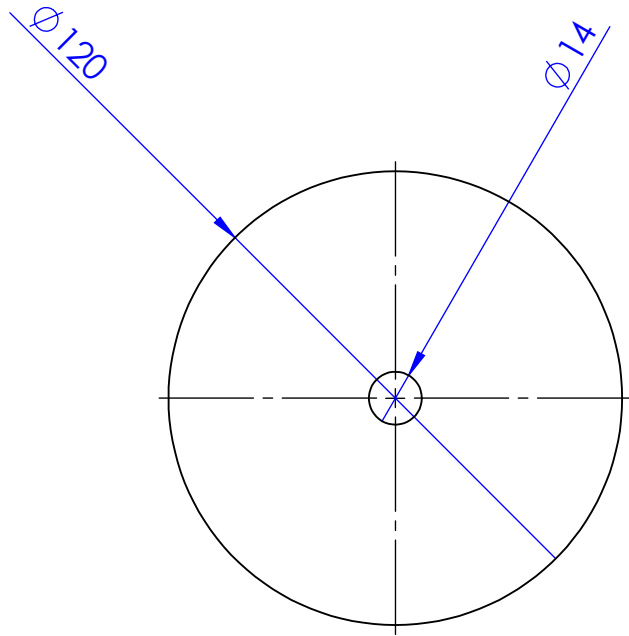
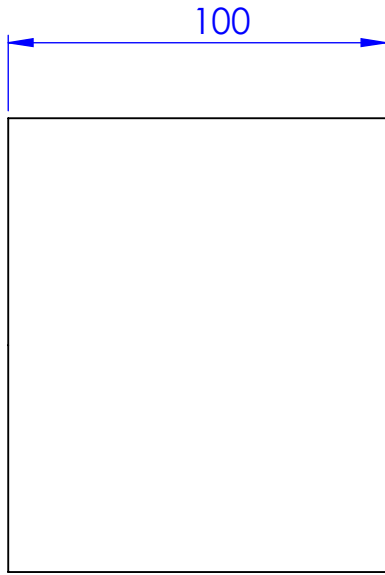


Tolérances générales j js 11

Ra 1.6

Etat de surface

<p>ECHELLE 1:1</p>	<h1>AXE DE CONTRE POIDS</h1>		
	<p>UMMTO-FGC-FMP</p>		<p>PFE</p>
<p>Planche N°</p> <p><b>A4</b></p>	<p><b>M2</b></p>	<p>ABDI Belkacem</p>	<p>Promotion 2023</p>



**Tolérances générales j js 11**

**Etat de surface**  $Ra 1.6$

<b>ECHELLE 1:2</b>	<b>Contre poids</b>		
			
<b>Planche N°</b>	<b>UMMTO-FGC-FMP</b>		<b>PFE</b>
<b>A4</b>	<b>M2</b>	<b>ABDI Belkacem</b>	<b>Promotion 2023</b>