

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Métallurgie

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des Matériaux

Conception et réalisation d'un Atomiseur à Gaz pour la production
des poudres métalliques non-ferreuses

HANED Walid

Sous la direction de **Dr. KASSER Abdelmadjid** ENP

Présenté et soutenu publiquement le (23/09/2024)

Composition du jury :

Président : Dr. ABADLI Kamel ENP
Promotrice : Dr. KASSER Abdelmadjid ENP
Examinatrice : Dr. MERMOUL Soumia ENP

ENP 2024

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Métallurgie

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des Matériaux

Conception et réalisation d'un Atomiseur à Gaz pour la production
des poudres métalliques non-ferreuses

HANED Walid

Sous la direction de **Dr. KASSER Abdelmadjid** ENP

Présenté et soutenu publiquement le (23/09/2024)

Composition du jury :

Président : Dr. ABADLI Kamel ENP
Promotrice : Dr. KASSER Abdelmadjid ENP
Examinatrice : Dr. MERMOUL Soumia ENP

ENP 2024

المخلص

تتيح تقنية تعدين المساحيق إنتاج مواد من المعادن على شكل مساحيق دقيقة، مما يوفر خصائص فريدة وتكاليف إنتاج محسنة. يركز هذا العمل على تصميم وتشغيل جهاز ترديد بالغاز لإنتاج مساحيق الألمنيوم. يشرح المشروع بالتفصيل تصميم جهاز التردد، بما في ذلك غرفة التردد، قمع الصب، وفوهة الرش، بالإضافة إلى أنظمة التحكم والصيانة. بعد إتمام إعداد الجهاز، تم إجراء تجارب عبر تغيير درجة حرارة المعدن وضغط غاز التردد (الأرجون أو الهواء). أظهرت النتائج وجود صعوبات تتعلق بتفكك المعدن المصهور، مما أدى إلى إدخال تعديلات في تصميم الفوهة. يؤكد هذا المشروع على أهمية التحكم في معايير التردد لإنتاج مساحيق عالية الجودة.

الكلمات المفتاحية: التردد، مساحيق معدنية، الألمنيوم، درجة الحرارة، ضغط الغاز، التوصيف الهيكلي.

Abstract

Powder metallurgy enables the production of materials from metals in the form of fine powders, offering unique properties and optimized production costs. This thesis focuses on the design and commissioning of a gas atomizer for the production of aluminum powders. The project details the atomizer's design, including the atomization chamber, the pouring funnel, and the spray nozzle, as well as the control and maintenance systems. After setting up the equipment, tests were conducted by varying the metal's temperature and the atomization gas pressure (argon or air). The results revealed challenges related to the disintegration of the molten metal, leading to adjustments in the nozzle design. This project highlights the importance of controlling atomization parameters to produce high-quality powders.

Keywords : Atomization - Metallic powders - Aluminum - Temperature - Gas pressure.

Résumé

La métallurgie des poudres permet la production de matériaux à partir de métaux sous forme de poudres fines, offrant des propriétés uniques et des coûts de production optimisés. Ce mémoire porte sur la conception et la mise en service d'un atomiseur à gaz pour l'élaboration de poudres d'aluminium. Le projet décrit en détail la conception de l'atomiseur, incluant la chambre d'atomisation, l'entonnoir de coulée, et la buse de pulvérisation, ainsi que les systèmes de contrôle et de maintenance. Après la mise au point de l'équipement, des essais ont été réalisés en variant la température du métal et la pression du gaz d'atomisation (argon ou air). Les résultats ont montré des difficultés liées à la désintégration du métal fondu, ce qui a conduit à des ajustements dans la conception de la buse. Ce projet souligne l'importance du contrôle des paramètres d'atomisation pour la production de poudres de qualité.

Mots clés : Atomisation, Poudres métalliques, Aluminium, Température, Pression de gaz, Caractérisation structurale.

Remerciements

Avant tout, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant pour m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je souhaite remercier de tout cœur mes parents, en particulier ma mère et mon père, pour leur soutien inconditionnel, leur amour, et leurs sacrifices. Leur présence à mes côtés a été une source inépuisable de motivation et de réconfort tout au long de ce parcours.

Mes vifs remerciements s'adressent également à mon encadrant de l'école, Monsieur KASSER, pour le suivi attentif de notre travail, ses remarques pertinentes, ses suggestions constructives, et sa patience inébranlable. Ses conseils avisés ont été d'une grande aide et nous ont véritablement guidés tout au long de ce projet.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à l'ensemble du personnel du CDTA, et plus particulièrement à la division de prototypage, pour leur aide, le temps qu'ils nous ont accordé, et leur soutien technique tout au long de ce projet.

Je souhaite également exprimer ma plus profonde gratitude aux membres du jury, en particulier Monsieur ABADLI Kamel et Madame MERMOUL Soumia, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de lire et d'examiner mon travail. Leur expertise et leurs remarques seront d'une grande aide pour l'avenir de mes recherches.

Je remercie également tous mes enseignants, pour leur précieuse guidance et leurs enseignements qui ont façonné mon chemin académique. Un merci tout particulier à ceux qui, par leurs exigences et leurs conseils parfois rigoureux, ont su me pousser à donner le meilleur de moi-même.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont soutenu de près ou de loin, par leurs encouragements, conseils, et assistance. Votre soutien a été essentiel pour la réussite de ce travail.

HANED Walid.

Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Introduction générale

1	Méthodes d'élaboration des poudres métalliques	11
1.1	Aperçu historique	11
1.2	Les principales méthodes d'élaboration des poudres métalliques	12
1.2.1	Procédés mécaniques	12
1.2.1.1	Broyage	12
1.2.1.1.1	Poudre Macro-Mesh	12
1.2.1.1.2	Procédé Coldstream	12
1.2.1.2	Pulvérisation mécanique	13
1.2.1.2.1	Procédé D.P. G	13
1.2.1.2.2	Atomisation	13
1.2.1.2.3	Pulvérisation sous vide	14
1.2.1.2.4	Atomisation centrifuge (électrode tournante)	14
1.2.2	Procédés Physico-chimiques	15
1.2.2.1	Réduction d'oxydes	15
1.2.2.2	Electrolyse	15
1.2.2.3	Dissociation des métaux carbonyles	16
1.3	Le procédé d'atomisation	16
1.3.1	introduction	16
1.3.2	Atomisation à l'eau et à gas	16
1.3.3	Application de l'atomisation	17

1.3.3.1	Application de la poudre atomisée	18
1.3.3.2	La poudre métallique	18
1.3.3.3	Atomisation des matériaux non métalliques	18
1.3.3.4	Projection thermique des métaux liquides	18
1.3.4	Avantages et inconvénients de l'atomisation	20
1.3.4.1	Avantages	20
1.3.4.1.1	Homogénéité structurale due à la solidification rapide	20
1.3.4.1.2	Obtention des formes finies	20
1.3.4.1.3	Autres avantages	20
1.3.4.2	Inconvénients	21
1.4	Méthodes avancées d'élaboration des poudres	21
1.4.1	Atomisation par plasma	21
1.4.2	Atomisation par électrode tournante à plasma	22
1.4.3	Atomisation centrifuge par plasma	23
2	Théorie du procédé d'atomisation	24
2.1	Introduction	24
2.2	Formes des buses	24
2.2.1	Les buses fermés	25
2.2.2	Les buses ouvertes	25
2.3	Mécanismes de l'atomisation	27
2.4	Paramètres d'atomisation	27
2.4.1	Influence de la température de surchauffe	27
2.4.2	Influence de la vitesse du gaz (pression) et débit du métal liquide	28
2.5	Taille des particules	28
2.6	Formes des particules	29
2.7	Microstructure des poudres	31
2.7.1	Influence de taille de la particule sur sa microstructure	32
2.7.2	Théorie de la germination appliquée à l'atomisation	33
2.8	Influence des éléments d'addition	36
2.9	Influence des collisions sur la forme des particules	36

3	Conception de l'atomiseur	37
3.1	Description Générale de l'Atomiseur	37
3.2	Conception de l'Entonnoir de Coulée	39
3.2.1	Calcul de la vitesse d'écoulement du métal liquide	41
3.3	conception de la buse	43
3.3.1	La partie Intérieure de la Buse	45
3.3.2	La partie extérieure de la buse	45
3.3.3	Calcul de la vitesse des gouttelettes	46
3.4	Conception de la chambre d'atomisation	48
3.4.1	l'Assemblage de l'Entonnoir sur la Chambre d'Atomisation	48
3.5	Conception du cyclone	49
4	Mise en service de l'atomiseur et élaboration de la poudre	51
4.1	Introduction	51
4.2	Elaboration de la poudre	51
4.2.1	Matériaux utilisés	51
4.2.2	Déroulement des essais	52
4.2.3	Considérations Opérationnelles et Pratiques de Sécurité	52
4.3	Résultats obtenus	54
4.3.1	Résultats des premiers essais d'atomisation	54
4.3.2	Résultats après modification de la buse	55
4.3.3	Analyse des résultats	56
	Conclusion générale	57
	Bibliographie	58
	Annexe I : Sous-ensembles de l'Atomiseur	59

Liste des tableaux

3.1	Propriétés de l'acier doux utilisé pour l'entonnoir de coulée. [1]	39
3.2	Propriétés de la laine de céramique utilisée pour l'isolation. [2]	40
3.3	Dimensions principales de l'entonnoir de coulée.	40
3.4	Goujons filetés et débits associés.(VALEURE EXPERIMENTALE)	41
3.5	Fonctionnalité des Fenêtres d'Accès	48
4.1	Caractéristiques physiques de l'aluminium à 500°C [3]	51

Table des figures

1.1	Exemple de broyeurs	12
1.2	Schéma d'un pulvérisateur mécanique (Procédé D.P. G).	13
1.3	Vue schématique d'un atomiseur.	13
1.4	Pulvérisateur sous vide.	14
1.5	Pulvérisateur à électrode tournante.	14
1.6	Le procédé "Osprey".	19
1.7	Revêtement par projection thermique.	19
1.8	Représentation schématique du procédé d'atomisation par plasma pour la production de poudres de Ti [4]	22
1.9	Schéma de configuration de l'atomisation du procédé d'électrode rotative à plasma [5]	23
1.10	Schéma de la conception de l'atomisation centrifuge à plasma [6].	23
2.1	Exemples de buses. (a) Buse fermée (b) Buse ouverte [7].	26
2.2	Dispositif d'atomisation à jet horizontal.	26
2.3	Les différents modes d'atomisation.	27
2.4	Dendrites secondaires	31
2.5	Variation de la vitesse de germination en fonction de la température.	34
3.1	Vue d'ensemble de l'atomiseur.	38
3.2	image réelle générale d'ensemble de l'atomiseur.	39
3.3	Coupe transversale de l'entonnoir.	40
3.4	Goujon persé de part en part avec différents diamètres.	41
3.5	Jet libre d'un métal liquide.	42
3.6	Deux parties de la buse.	44
3.7	Angle de buse à 30°.	44

3.8	Emplacement du goujon dans la partie intérieure de la buse.	45
3.9	Coupe transversale de la partie extérieure de la buse.	46
3.10	représentation graphique en vue de haut.	46
3.11	Pulvérisation du métal liquide par le gaz atomiseur.. . . .	47
3.12	Schéma d'un cyclone standard	49
4.1	Lunettes de sécurité pour la protection contre les éclaboussures et les rayonne- ments UV.	53
4.2	Gants résistants à la chaleur pour la manipulation sécurisée du métal fondu. . .	53
4.3	Résultat obtenu avant la modéficacion	54
4.4	Résultat obtenu après la modéficacion de la buse	55

Introduction générale

La métallurgie des poudres constitue un domaine essentiel dans la production de matériaux avancés, permettant d'élaborer des métaux et alliages sous forme de poudres fines. Ces poudres sont utilisées dans diverses applications industrielles en raison de leurs propriétés uniques, telles qu'une grande homogénéité, une réactivité accrue, et une capacité à être compactées et frittées pour former des pièces aux géométries complexes. Traditionnellement, la production de poudres métalliques s'appuie sur des techniques mécaniques, chimiques, et électrolytiques. Cependant, l'atomisation, en particulier l'atomisation par gaz, a émergé comme une méthode prépondérante en raison de sa capacité à produire des particules sphériques de haute qualité avec des distributions granulométriques contrôlées.

Ce mémoire se concentre sur la conception et la mise en service d'un atomiseur à gaz dédié à la production de poudres d'aluminium. L'objectif principal est de développer une installation capable de produire des poudres à partir d'aluminium recyclé, sans approfondir l'étude de l'influence des paramètres d'atomisation sur la taille, la forme, ou la microstructure des particules obtenues. Les étapes du projet incluent la sélection des matériaux, la conception de la buse d'atomisation, et la mise au point des conditions d'atomisation pour assurer une production efficace.

Le travail présente en détail les étapes de conception de l'atomiseur, y compris le choix des matériaux, la modélisation des flux de gaz, et les ajustements nécessaires pour optimiser le processus. Lors des premiers essais, des difficultés ont été rencontrées, notamment la désintégration inefficace du métal fondu. Ces défis ont conduit à des modifications dans la conception de la buse, démontrant une approche itérative et basée sur des analyses théoriques et expérimentales.

Ce document est structuré de manière à guider le lecteur à travers les différentes phases de ce projet. Le premier chapitre offre un aperçu des techniques actuelles d'élaboration des poudres métalliques et de la théorie de l'atomisation. Le deuxième chapitre détaille la conception et la réalisation de l'atomiseur, tandis que le troisième chapitre se concentre sur la mise en service de l'installation et l'élaboration des premières poudres d'aluminium. Enfin, le dernier chapitre présente les résultats obtenus, les conclusions, et les perspectives d'amélioration future.

Ce mémoire est structuré en 4 chapitres de la manière suivante :

Chapitre 1 : un aperçu sur les diverses techniques d'élaboration des poudres métalliques.

Chapitre 2 : Ce chapitre traite la théorie d'atomisation ; en particulier, le mécanisme d'atomisation sans approfondir les relations entre les paramètres influents sur les caractéristiques de la poudre produite.

Chapitre 3 : Dans ce chapitre on parlera plus en détails du travail effectué dans la conception et la réalisation de l'atomiseur.

Chapitre 4 : Ce dernier chapitre décrit la mise en exploitation de l'atomiseur, l'élaboration de la poudre d'aluminium et les ajustements effectués

Enfin, nous terminerons ce mémoire par les principales conclusions et quelques perspectives.

Chapitre 1

Méthodes d'élaboration des poudres métalliques

1.1 Aperçu historique

L'histoire de l'atomisation des matériaux fondus et de ceux à l'état liquide est relativement récente. Avant le vingtième siècle, comme pour beaucoup d'autres domaines de la métallurgie, les recherches étaient très limitées. La principale difficulté résidait dans le développement des techniques pour manipuler les métaux fondus.

Les premières poudres issues de l'atomisation étaient principalement de l'étain et du plomb, utilisées sous forme de pâte pour les soudures. À cette époque, l'atomisation se faisait à l'air ou à la vapeur d'eau, dans des installations souvent rudimentaires, dont certaines n'ont connu que peu de modifications jusqu'à aujourd'hui.

Entre les deux guerres mondiales, des poudres d'aluminium et de zinc ont été produites grâce à des techniques similaires. L'aluminium était principalement employé dans la fabrication d'explosifs, tandis que le zinc était utilisé dans la purification des boissons. Avant la Seconde Guerre mondiale, l'usage de la métallurgie des poudres pour fabriquer des composants mécaniques était surtout limité aux paliers de précision et aux coussinets autolubrifiants.

Les observations sur la technique de granulation par l'eau ont conduit à l'atomisation à très haute pression d'eau, appliquée d'abord au cuivre et à ses alliages dans les années 1930-1940, puis à l'acier dans les années 1950. En Allemagne, durant la guerre, face à une pénurie de fer, deux procédés ont été développés pour fabriquer des chaînes d'entraînement à partir de poudre de fer atomisée.[8]

Dans les années 1960, des efforts considérables ont été déployés pour développer l'atomisation par gaz inerte. Cette méthode a permis de pulvériser une grande variété de métaux, destinés principalement à des programmes de recherche sur les matériaux dans le secteur aérospatial.

Depuis cette période, le domaine a attiré de nombreux experts en conception d'installations. Les technologies se sont démocratisées, et le développement de ce domaine est loin d'être terminé.

1.2 Les principales méthodes d'élaboration des poudres métalliques

Les procédés de fabrication des poudres métalliques doivent permettre la production en grande quantité de poudres de métaux et d'alliages à des coûts raisonnables, tout en répondant à des spécifications physiques et chimiques précises. Cela garantit la qualité des produits finaux après frittage. On peut classer ces procédés en deux grandes catégories : les procédés mécaniques et les procédés physico-chimiques.

1.2.1 Procédés mécaniques

1.2.1.1 Broyage

Ce procédé est particulièrement adapté aux métaux fragiles comme le manganèse ou le chrome, qui peuvent être réduits en poudre en utilisant des broyeurs à billes ou à marteaux. Il peut aussi être employé pour transformer des métaux ductiles en poudre, après les avoir rendus fragiles et cassants. Cela peut se faire en les chargeant en hydrogène ou en utilisant des préalliages fragiles tels que le Fe-Si, le Fe-Cr ou le FeAl. Plusieurs types de broyeurs peuvent être utilisés pour ces opérations : pour le broyage grossier, on peut utiliser des broyeurs à mâchoires, à marteaux ou à cylindres. Pour le broyage fin, il est souvent nécessaire de passer par un concassage préliminaire, car le broyage fin seul ne produit que rarement une poudre immédiatement utilisable.[9]

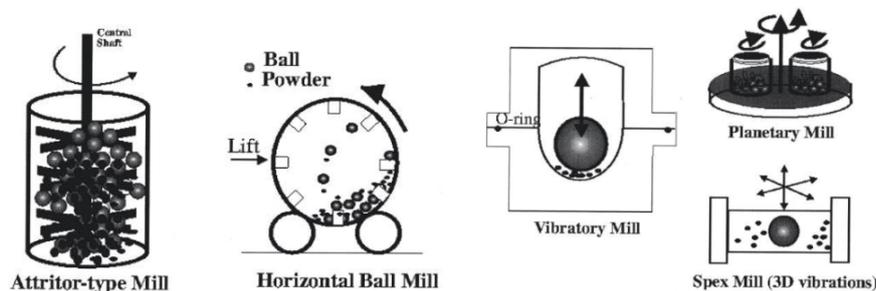


FIGURE 1.1 – Exemple de broyeurs

Il existe deux principaux procédés de broyage pour la production de poudres métalliques :

1.2.1.1.1 Poudre Macro-Mesh Ce type de poudre est produit en broyant des copeaux d'usinage d'acier ou de fonte malléable. Les broyeurs à marteaux sont utilisés pour obtenir des poudres d'acier relativement grossières, avec des particules de taille comprise entre 0,2 et 0,7 mm. Ces poudres peuvent être utilisées pour fabriquer des pièces de grande taille.

1.2.1.1.2 Procédé Coldstream Le procédé Coldstream repose sur le principe du broyage à jet. Les particules de poudre ou les fragments à broyer sont accélérés à une vitesse supersonique par un courant de gaz, comme de l'air ou de l'azote, dans une chambre de broyage. Ils sont ensuite projetés contre une enclume fixe en métal dur. La détente adiabatique du gaz dans la chambre provoque une baisse significative de sa température, ce qui fragilise les matériaux à broyer. Ce procédé produit des poudres avec des grains d'environ 10 micromètres et une forme irrégulière. [10]

1.2.1.2 Pulvérisation mécanique

1.2.1.2.1 Procédé D.P. G Le métal liquide est mécaniquement pulvérisé en passant par un orifice étroit. Dans le procédé allemand D.P.G., le métal liquide est d'abord désintégré en traversant une nappe d'eau formant un double cône de révolution. Les gouttes produites sont ensuite pulvérisées par des impacts successifs contre des couteaux montés sur un disque qui tourne à environ 3000 tours par minute (voir fig. 1.2) [11]

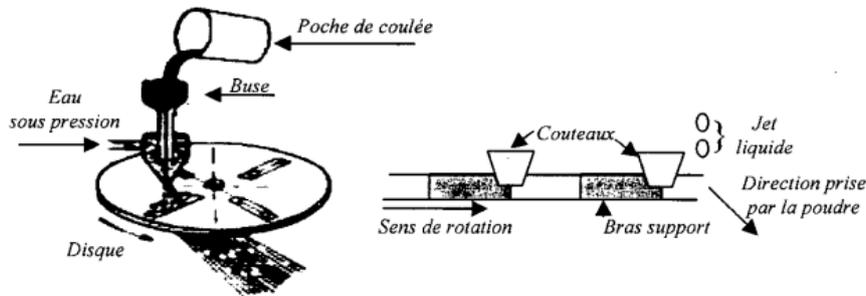


FIGURE 1.2 – Schéma d'un pulvérisateur mécanique (Procédé D.P. G).

1.2.1.2.2 Atomisation L'atomisation des métaux fondus est largement utilisée pour des métaux comme l'aluminium et le cuivre, et elle peut être appliquée à la plupart des métaux et alliages ayant un point de fusion inférieur à 1600°C. Le métal s'écoule sous forme d'un jet liquide de plusieurs millimètres de diamètre, sur lequel un fluide atomiseur (liquide ou gazeux) est projeté à travers une buse annulaire à haute pression. Ce processus pulvérise le métal dans une chambre d'atomisation. La forme et la taille des particules dépendent du type de métal atomisé, des paramètres d'atomisation et du fluide atomiseur utilisé (voir fig. I.3).

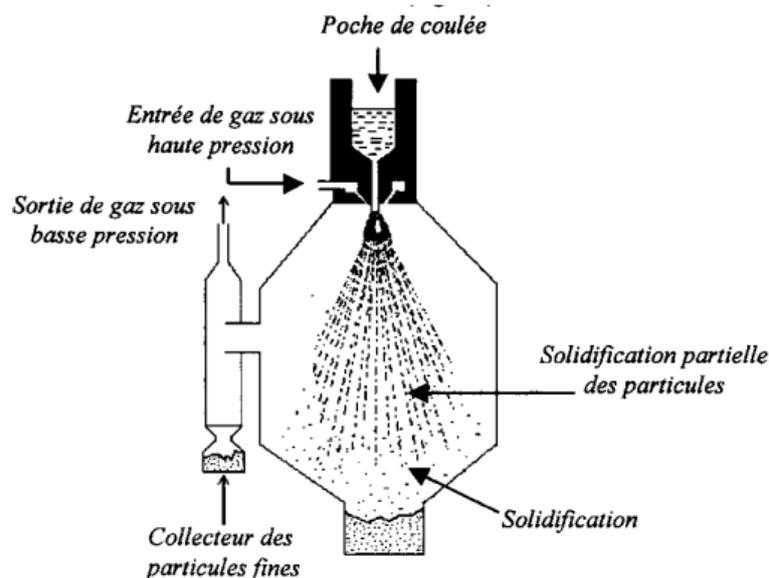


FIGURE 1.3 – Vue schématique d'un atomiseur.

1.2.1.2.3 Pulvérisation sous vide Le procédé commence par la fusion du métal dans un creuset à l'aide d'un four à induction. Le métal liquide est ensuite soumis à une surpression d'hydrogène, qui se dissout en grande quantité dans le métal liquide. Ensuite, le creuset est remonté jusqu'à ce qu'un tube de transfert, connecté à une chambre supérieure, plonge dans le métal liquide. La chambre supérieure, maintenue sous vide, est finalement mise en communication avec le tube à l'aide d'une vanne. Ainsi, le métal liquide s'écoule violemment dans la chambre supérieure sous forme de fines gouttelettes pulvérisées par l'hydrogène libéré du métal (voir fig. 1.4).

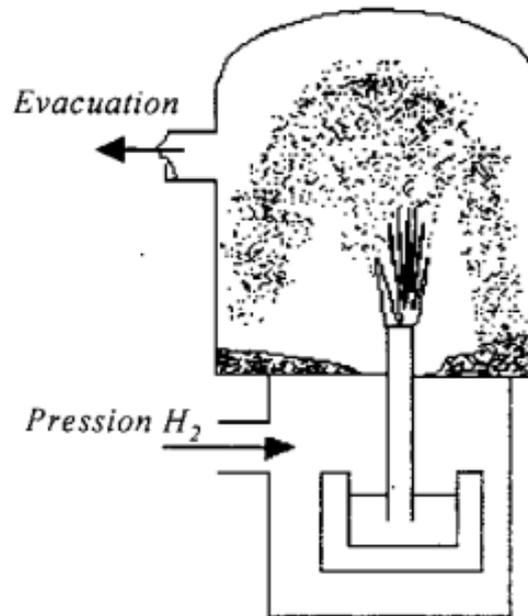


FIGURE 1.4 – Pulvérisateur sous vide.

1.2.1.2.4 Atomisation centrifuge (électrode tournante) Le matériau à transformer en poudre est façonné sous forme d'une électrode, tournée à une vitesse d'environ 200 tours par seconde [7]. Cette électrode est localement fondue par un arc électrique (procédé R.E.P, voir figure 1.5), par un arc plasma (procédé P.R.E.P), ou par bombardement électronique.

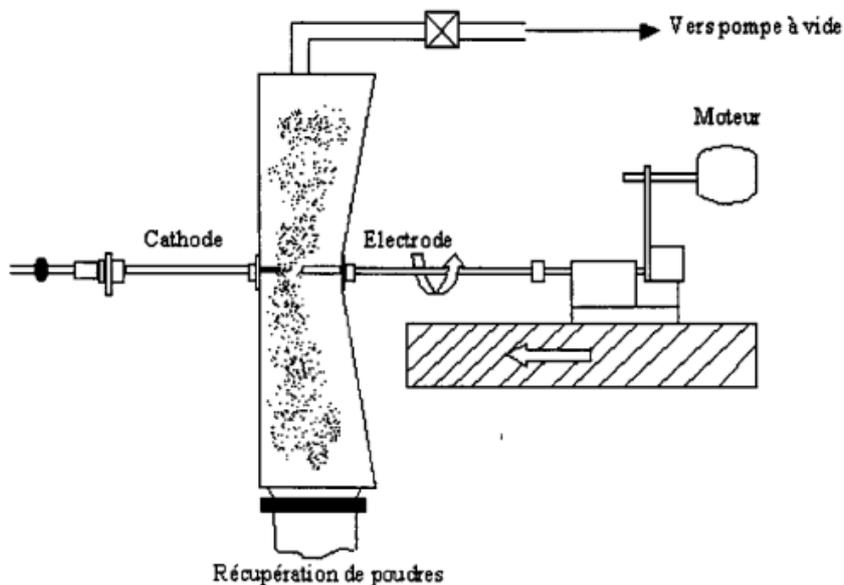


FIGURE 1.5 – Pulvérisateur à électrode tournante.

Lors de l'utilisation du procédé R.E.P, la poudre peut être contaminée par du tungstène provenant de la cathode. Le matériau liquide forme une couche qui s'étend au-delà du bord de l'électrode tournante. Des protubérances et des ligaments se forment en raison du cisaillement et de la tension superficielle. Pendant la chute libre après éjection, les ligaments se transforment en gouttelettes qui peuvent éventuellement prendre une forme sphérique. Les particules de poudre sont généralement de forme sphérique, avec une taille moyenne d'environ 250 micromètres [12]. La taille des particules est déterminée par la relation suivante :

$$d = \frac{3.464}{\omega} \left(\frac{\gamma_s}{D\rho_m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.1)$$

où :

- ω : vitesse de rotation de l'électrode (rd/s),
- γ_s : tension superficielle du métal fondu,
- ρ_m : densité du métal,
- D : diamètre de l'électrode.

1.2.2 Procédés Physico-chimiques

1.2.2.1 Réduction d'oxydes

Cette réduction s'effectue à une température inférieure au point de fusion du métal. Pour réduire les oxydes de tungstène (W), molybdène (Mo) et cobalt (Co), on utilise de l'hydrogène, tandis que pour le nickel (Ni), le cuivre (Cu), le fer (Fe) et le plomb (Pb), on utilise de l'ammoniac craqué ou de l'oxyde de carbone. Les oxydes sont préalablement purifiés.

Les propriétés des poudres obtenues dépendent de plusieurs facteurs : plus le broyage des oxydes est poussé, plus les poudres sont fines ; la réduction à des températures plus basses et une faible teneur en humidité du gaz réducteur favorisent également l'obtention de poudres fines.

Le procédé Hôganäs, développé en Suède et produisant la plus grande quantité de poudre de fer, consiste à réduire un minerai très pur à l'aide de charbon dans un creuset chauffé à environ 1200°C en présence de chaux. On obtient ainsi de l'éponge de fer, qui après broyage, purification par tri magnétique et recuit réducteur, donne des poudres dont la taille varie de 10 à 150 micromètres [9]

1.2.2.2 Electrolyse

L'électrolyse de solutions aqueuses de sels, utilisant une anode soluble ou insoluble, est employée pour la production de poudres de fer, de cuivre, de plomb, d'étain, de chrome et de manganèse. Pour obtenir un dépôt électrolytique adhérent et continu, il est nécessaire d'utiliser de fortes densités de courant, une concentration élevée en acide et une faible concentration en ions métalliques. Un rapide brassage du bain, une température modérée de l'électrolyte et l'ajout de colloïdes contribuent également à ce processus. Cela permet d'obtenir directement un dépôt spongieux ou pulvérulent qui, après lavage et séchage, peut être facilement broyé en poudre fine.

Les poudres obtenues par électrolyse présentent souvent une structure dendritique caractéristique sous forme de grains. Leur densité apparente est généralement faible et leur capacité

d'écoulement assez limitée. Elles ont tendance à s'agglomérer facilement en raison de l'imbrication de leurs rameaux dendritiques.

Généralement, ces poudres sont soumises à un processus de broyage, suivies d'un recuit à moyenne température et d'un tamisage pour obtenir la granulométrie souhaitée. Ce traitement permet également d'augmenter leur densité et leur plasticité, les rendant ainsi plus compressibles.

1.2.2.3 Dissociation des métaux carbonyles

Ce procédé est utilisé pour purifier le fer et le nickel à un degré élevé. Les carbonyles liquides à bas point d'ébullition (43 °C pour $\text{Ni}(\text{CO})_4$ et 107 °C pour $\text{Fe}(\text{CO})_5$) se forment en faisant réagir de l'oxyde de carbone sous une pression de 200 bars et à des températures comprises entre 200 et 250 °C en présence du métal.

La décomposition du carbonyle à pression atmosphérique, entre 200 et 300 °C, produit une poudre sphéroïdale dont la taille des particules varie de 1 à 50 micromètres [11].

1.3 Le procédé d'atomisation

1.3.1 introduction

La technologie de l'atomisation a connu un développement progressif et une sophistication croissante depuis le début de la production à grande échelle de poudre de fer pendant la Seconde Guerre mondiale. La quête de haute qualité pour des poudres telles que celles d'aluminium, de fer, de bronze, d'aciers inoxydables, d'aciers à outils et de superalliages, combinée à de nouvelles techniques de consolidation, a permis l'émergence de matériaux présentant parfois des propriétés supérieures à ceux élaborés par des méthodes traditionnelles.

L'atomisation peut être définie comme la pulvérisation d'un liquide sous forme de fines gouttelettes, généralement de taille inférieure à 150 micromètres. Ainsi, tout métal existant à l'état liquide peut être atomisé. La pulvérisation du métal liquide est réalisée à l'aide d'un jet d'eau ou de gaz sous très haute pression. L'utilisation de la force centrifuge pour pulvériser un jet liquide est appelée atomisation centrifuge, tandis que l'utilisation de l'énergie ultrasonique pour cette pulvérisation est connue sous le nom d'atomisation ultrasonique.

Les propriétés les plus importantes des poudres obtenues par atomisation incluent la taille moyenne des particules, la distribution de taille, la forme des particules, la composition chimique (surtout à la surface) et la microstructure. Ces caractéristiques fondamentales déterminent les propriétés technologiques telles que la densité apparente, la fluidité, la compressibilité, la forgeabilité, ainsi que les applications des poudres et des matériaux produits.

1.3.2 Atomisation à l'eau et à gaz

Le choix de la méthode de production des poudres dépend des propriétés recherchées pour la poudre finale. Les poudres atomisées à l'eau produisent généralement des particules de forme irrégulière avec une surface oxydée. En revanche, les poudres atomisées par gaz ont typiquement

des formes sphériques ou arrondies, et si l'atomisation est effectuée avec un gaz inerte, la poudre présente peu d'oxydation.

Dans le processus, le métal liquide est versé soit directement, soit à travers des conduites dans un réservoir ou une poche. Une buse positionnée à la base du "tundish" contrôle la forme et la taille du jet de métal, le dirigeant vers une buse d'atomisation où le jet est fragmenté en fines gouttelettes. Ces gouttelettes se refroidissent et se solidifient dès qu'elles atteignent le fond de la chambre de collecte. Pour prévenir l'oxydation de la poudre, un gaz inerte est injecté dans la chambre.

Dans l'atomisation par gaz, la poudre peut être récupérée sous forme de particules sèches ou refroidies à l'eau au fond de la chambre. Pour les particules sèches, la chambre d'atomisation doit être suffisamment longue [2], généralement supérieure à 6 mètres, pour permettre la solidification avant d'atteindre le fond de la chambre de collecte. Pour atomiser de grandes quantités de poudre ou maintenir des opérations continues, un refroidissement externe du fond de la chambre d'atomisation peut être réalisé à l'aide d'une nappe d'eau afin d'éviter l'agglomération des particules.

1.3.3 Application de l'atomisation

L'atomisation désigne le processus de pulvérisation d'un liquide en fines gouttelettes, réalisé de plusieurs manières telles que la pulvérisation à haute pression à travers une buse, la coulée de métal sur un disque en rotation, ou encore par des méthodes électrostatiques ou à ultrasons.

En pratique et dans la recherche, l'atomisation concerne généralement les matériaux qui sont naturellement liquides à des températures proches de la température ambiante (comme dans la combustion, les pulvérisateurs d'aérosols, la projection de peinture, ou encore les systèmes de lutte contre les incendies). Les métaux fondus destinés à l'atomisation doivent être chauffés à des températures élevées pour atteindre une faible viscosité, bien que souvent ils présentent une tension superficielle élevée. Par exemple, la viscosité cinétique de l'acier fondu est similaire à celle de l'eau, ce qui permet d'utiliser l'eau pour modéliser certains aspects de son écoulement. D'autres matériaux non métalliques comme la céramique peuvent également être atomisés sous forme fondue, bien que leur viscosité reste élevée et dépende fortement de la température.

Les applications de l'atomisation liquide sont principalement divisées en deux domaines :

- Élaboration de poudres métalliques,
- Projection métallique.

Il existe d'autres techniques pour obtenir de la poudre métallique, telles que les procédés mécaniques et physico-chimiques, avec lesquels l'atomisation doit rivaliser. La projection métallique peut prendre plusieurs formes, mais elle implique toujours que le matériau, fondu et pulvérisé, atteigne l'état liquide au moment de l'impact avec la cible.

Certains aspects de la conception des atomiseurs sont communs aux deux applications, notamment les exigences relatives à la taille et à la forme des particules. Le domaine de l'atomisation est vaste en termes de matériaux à pulvériser et de leurs utilisations ultérieures. Dans la suite, nous examinerons les applications les plus importantes en tenant compte de diverses considérations, certaines où la poudre est le produit final, et d'autres où elle n'est pas l'objectif principal.

1.3.3.1 Application de la poudre atomisée

Les poudres produites par atomisation peuvent être fabriquées en quantités allant de quelques kilogrammes par an pour des applications comme l'amalgame dentaire, jusqu'à un million de tonnes par an pour la production de projectiles en acier ou en fer. La taille des particules varie de moins de 10 micromètres pour les poudres utilisées dans la peinture, jusqu'à environ un millimètre pour les grains utilisés dans les sableuses [7].

Les exigences concernant la forme des particules dépendent de la nature des applications. Virtuellement, toute forme de poudre est possible en concevant l'atomiseur de manière appropriée, de même que toute taille moyenne spécifique peut être obtenue. Cependant, les défis résident dans la capacité à produire efficacement (avec un rendement élevé) des formes et des tailles précises de particules. Un bon rendement ne se limite pas seulement à une utilisation minimale d'énergie, mais également à la production de poudre dans une gamme de tailles spécifiques de manière constante.

1.3.3.2 La poudre métallique

La principale utilisation de la poudre atomisée est dans la fabrication des organes mécaniques, pour lesquels plusieurs procédés ont été développés et continuent d'être améliorés. Cette poudre trouve également de nouvelles applications dans divers autres domaines, avec de nouvelles applications régulièrement proposées.

À titre d'exemples d'applications, on peut citer les combustibles solides pour les roquettes, les peintures métallisées, les filtres à poudre métallique, la synthèse de diamants, les explosifs, ainsi que les additifs alimentaires comme le fer (Fe) et les accumulateurs au plomb (Pb) [7]. Pour la plupart de ces applications, des particules de taille inférieure à 250 micromètres sont nécessaires.

1.3.3.3 Atomisation des matériaux non métalliques

En dehors du domaine des métaux, l'atomisation est largement utilisée pour d'autres matériaux, bien que cela ne soit pas toujours reconnu comme tel. Par exemple, le prilling des produits chimiques est une forme d'atomisation utilisée pour des matériaux tels que les sels.

En raison de leurs caractéristiques spécifiques, comme une viscosité élevée, les matériaux en verre sont atomisés sous forme de fibres plutôt que de poudres. Ainsi, la laine de verre, le coton minéral et les fibres de céramique sont des produits atomisés, bien qu'ils ne soient pas strictement des poudres.

Dans le cas de l'alumine, l'atomisation à air comprimé produit des sphères creuses appelées "soufflures d'alumine" ou "bulles d'alumine".

1.3.3.4 Projection thermique des métaux liquides

L'atomisation peut être utilisée sans que la formation de poudre soit l'objectif principal. Dans la projection thermique, initialement proposée par Singer [13] et largement utilisée, comme dans le procédé "Osprey", le métal fondu est pulvérisé par un jet de gaz (voir fig.I.6). Il se solidifie partiellement en vol, de sorte qu'au moment de l'impact avec la cible, une partie reste

liquide. Cela permet la formation d'un solide à partir du métal fondu, refroidi progressivement par dissipation de la chaleur, ce qui donne des formes bien définies et une microstructure très fine grâce à un refroidissement rapide, supérieur à celui obtenu par coulée en lingot.

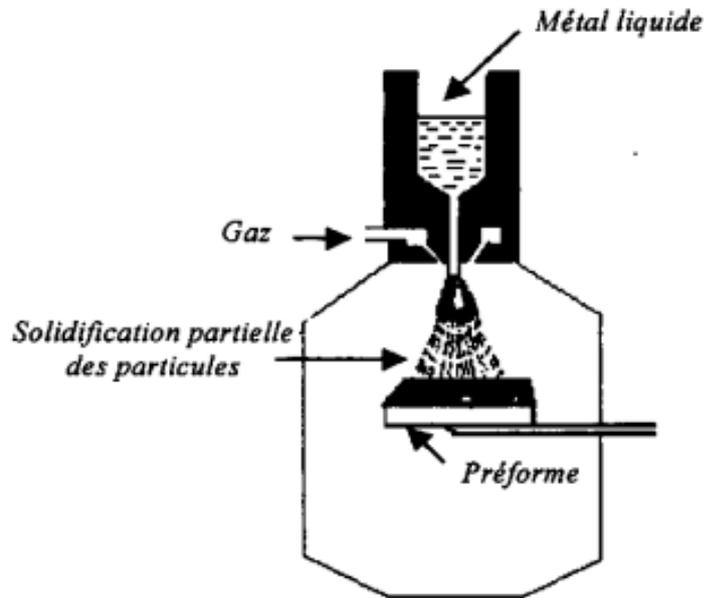


FIGURE 1.6 – Le procédé "Osprey".

Une autre application importante en croissance constante est la pulvérisation par flamme. Dans ce processus, un matériau solide sous forme de poudre, de fibre ou autre, est injecté dans une flamme. Les particules fondues sont projetées à très grande vitesse vers la cible (voir fig.I.7).

Cependant, l'alimentation en poudre est souvent obtenue par atomisation. Il existe également des applications potentielles dépendant des résultats de recherche, où l'atomisation de matériaux fondus à haute température est utilisée à d'autres fins.

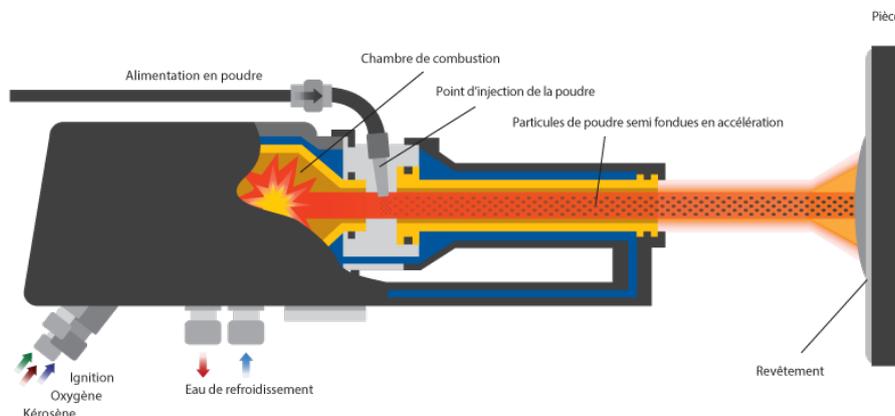


FIGURE 1.7 – Revêtement par projection thermique.

1.3.4 Avantages et inconvénients de l'atomisation

Le choix d'une technique de production de poudre dépend de plusieurs facteurs, notamment :

- Le volume du matériau à traiter,
- Les propriétés physico-chimiques du matériau,
- Les propriétés requises de la poudre.

Cependant, il est rarement évident de sélectionner à priori les détails d'un atomiseur uniquement en se basant sur ces caractéristiques. En raison de leur ductilité, la pulvérisation mécanique des métaux est souvent difficile; par conséquent, leur atomisation est considérée comme une alternative.

1.3.4.1 Avantages

Les poudres obtenues par atomisation peuvent être produites en quantités allant de 1 à 105 tonnes par an, avec une large variété de granulométries allant de 10 micromètres à 10 millimètres. Il est souvent possible de contrôler précisément la distribution des tailles de particules, parfois même dans des limites très étroites. La forme des particules obtenues, souvent presque sphérique lors de l'atomisation à gaz, offre des propriétés d'écoulement meilleures que celles obtenues par broyage. En revanche, l'atomisation à l'eau produit des formes irrégulières qui sont idéales pour la compaction et l'éjection.

1.3.4.1.1 Homogénéité structurale due à la solidification rapide L'utilisation de la poudre atomisée pour la fabrication des pièces mécaniques ainsi que pour les revêtements métalliques permet d'améliorer significativement les propriétés mécaniques et physiques des produits finis. Cette amélioration est largement due à l'élimination des hétérogénéités métallurgiques. La solidification rapide, caractéristique de presque tous les procédés d'atomisation, est particulièrement bénéfique car elle assure une homogénéité à travers toutes les particules, ainsi qu'une régularité dans la distribution et la taille des dendrites. En revanche, les particules obtenues par broyage conservent souvent les hétérogénéités présentes dans le lingot initial, ce qui peut affecter leur homogénéité.

1.3.4.1.2 Obtention des formes finies L'utilisation des poudres produites par atomisation présente plusieurs avantages par rapport aux techniques conventionnelles. Par exemple, comparer le compactage et le frittage de la poudre pour la fabrication de pièces mécaniques avec l'usinage traditionnel à partir de barres métalliques ou d'autres matériaux montre clairement ces avantages. En utilisant des poudres, il est possible de produire des pièces finies ou semi-finies sans nécessiter de fusion préalable. Cela réduit significativement le nombre d'étapes de fabrication et, par conséquent, les coûts de production.

Le revêtement métallique est également une application importante pour obtenir des formes quasiment parfaites, offrant ainsi des avantages évidents. Les pièces fabriquées par emboutissage de poudre présentent souvent de meilleures propriétés et des dimensions plus précises que celles obtenues par les méthodes traditionnelles.

1.3.4.1.3 Autres avantages Certains avantages moins évidents de l'atomisation dépendent fortement de la technique spécifique utilisée, des volumes de production et des matériaux concer-

nés. Par exemple, une installation d'atomisation de poudre bien conçue nécessite généralement moins de maintenance et de nettoyage comparativement aux méthodes de broyage mécanique, où le remplacement fréquent des outils de broyage est inévitable.

Il est généralement admis que la fabrication de pièces à partir de poudre métallique atomisée consomme moins d'énergie que les méthodes conventionnelles de fabrication.

1.3.4.2 Inconvénients

Presque toutes les caractéristiques d'un procédé peuvent être considérées comme un avantage dans une application et comme un inconvénient dans une autre. Par exemple, le coût de la fusion peut poser problème dans certains cas pour les procédés d'atomisation.

Récemment, la technologie d'atomisation a considérablement progressé grâce à l'installation de systèmes de contrôle continu des paramètres d'atomisation, garantissant ainsi une production fiable sur de longues périodes de fonctionnement des installations.

L'atomisation est un processus extrêmement complexe pour lequel il est difficile de prédire théoriquement la relation entre la qualité du produit et les caractéristiques d'entrée de l'atomiseur et du métal fondu. Souvent, des recherches et des développements préliminaires sont nécessaires pour ajuster l'atomiseur et les propriétés du métal fondu. Les nouveaux instruments de mesure des tailles de particules permettent aujourd'hui un contrôle en ligne de la qualité du produit sous forme de poudre.

Cependant, le contrôle avancé des débits, la collecte de la poudre et d'autres aspects des procédés, comme les revêtements métalliques, combinés aux complexités de l'atomisation, nécessitent un investissement financier substantiel.

1.4 Méthodes avancées d'élaboration des poudres

Les techniques les plus récentes et innovantes en élaboration de poudres métalliques sont axées sur des améliorations dans la sphéricité, la pureté, la taille des particules, et l'efficacité des processus. Voici un certaines des méthodes les plus récentes et prometteuses dans ce domaine :

1.4.1 Atomisation par plasma

La technologie plasma est largement utilisée dans la fabrication de poudres métalliques, connue sous le nom d'atomisation plasma. Ce procédé a été développé pour produire des poudres de titane de haute pureté dans une gamme variée de tailles de particules. L'atomisation plasma permet de produire des poudres de titane allant de très fines ($-25\ \mu\text{m}$) à rugueuses ($+125\ \mu\text{m}$) [14].

Les poudres métalliques de forme sphérique offrent des avantages tels qu'une bonne fluidité et la capacité à produire des pièces à haute densité. Dans les processus de fabrication utilisant des poudres fluides, moins d'additifs sont nécessaires par rapport aux poudres à faible fluidité. De plus, une haute densité signifie que lors de processus comme le frittage ou la densification par pression isostatique à chaud (HIPing), la poudre maintiendra un minimum de porosité [14].

La Figure 1.8 illustre un schéma du processus d'atomisation plasma utilisant un arc à trois

plasmas, avec du fil de titane comme matériau d'alimentation. L'arc plasma est utilisé comme source de chaleur à haute enthalpie pour fondre et pulvériser le fil de titane fondu, produisant ainsi des poudres de titane de très haute pureté et de forme ronde [14].

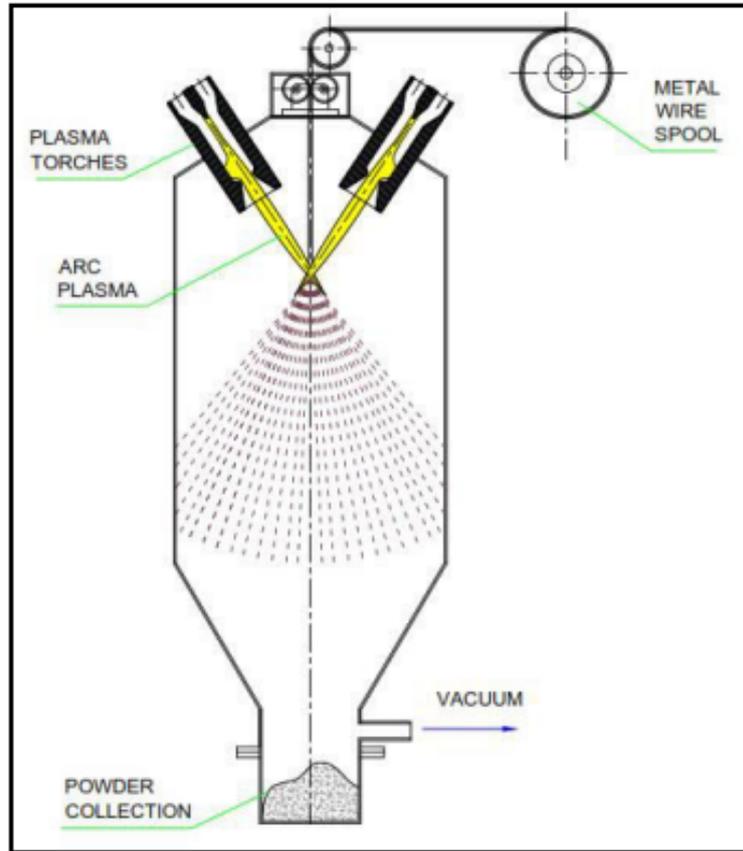


FIGURE 1.8 – Représentation schématique du procédé d'atomisation par plasma pour la production de poudres de Ti [4]

1.4.2 Atomisation par électrode tournante à plasma

La technologie de plasma pour d'autres applications d'atomisation métallique inclut l'atomisation rotative par électrode de plasma. Ce procédé implique la rotation rapide d'une tige d'alimentation métallique, tandis que l'arc de plasma d'argon ou d'azote fond l'extrémité de la tige. Le métal fondu est ensuite dispersé en fines gouttelettes métalliques en raison de la force centrifuge générée par la rotation élevée de la tige. Ce processus est illustré dans le schéma de la figure 1.9 [5].

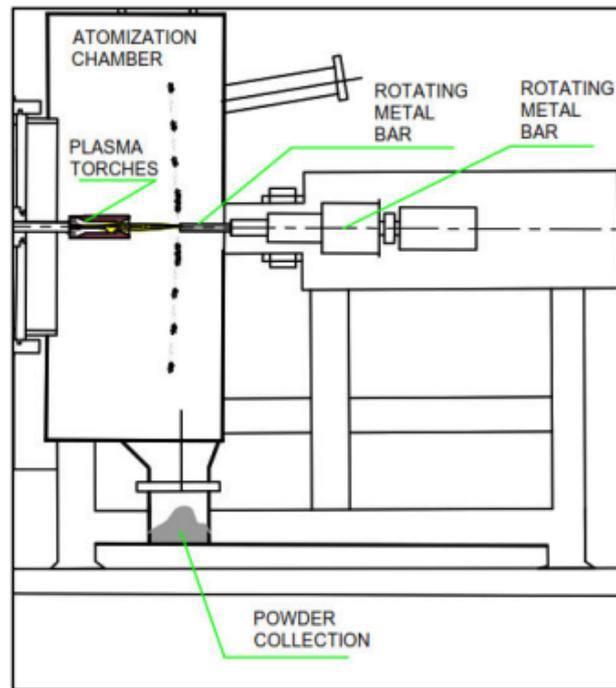


FIGURE 1.9 – Schéma de configuration de l'atomisation du procédé d'électrode rotative à plasma [5]

1.4.3 Atomisation centrifuge par plasma

La technologie de plasma pour d'autres applications de poudre métallique inclut l'atomisation centrifuge par plasma, comme illustré dans la figure 1.10 . Ce processus utilise non seulement la fusion du matériau d'alimentation par plasma, mais également un récipient tournant pour générer une force centrifuge. Cette force centrifuge contribue à améliorer la forme des particules de poudre en les rendant plus sphériques lors de l'étape de cristallisation[6].

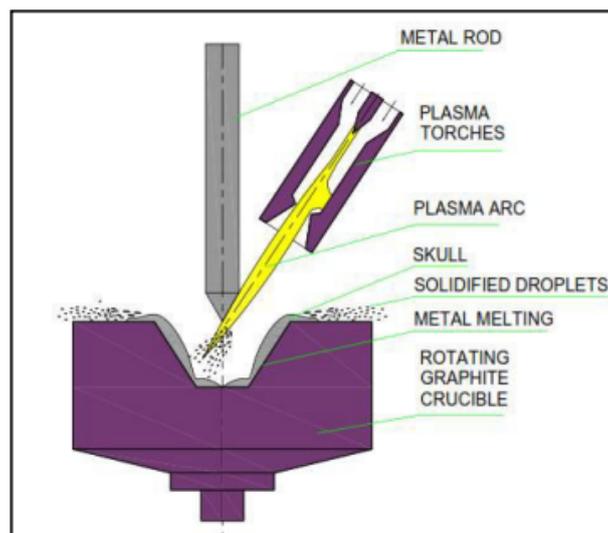


FIGURE 1.10 – Schéma de la conception de l'atomisation centrifuge à plasma [6].

Chapitre 2

Théorie du procédé d'atomisation

2.1 Introduction

L'atomisation est le processus de transformation d'un jet liquide en fines gouttelettes, soit dans un milieu gazeux, dans l'eau ou même dans le vide. Le produit final, après l'étape de pulvérisation et le transfert de chaleur qui s'ensuit, est un solide. Ce solide peut prendre la forme de poudre, de revêtement ou de préforme (ébauche). L'atomisation trouve des applications dans de nombreux domaines divers. Bien que les processus spécifiques d'atomisation puissent varier, ils partagent tous le principe physique de la désintégration du jet liquide. Parmi les domaines d'application les plus importants, on trouve :

- La pulvérisation pour la combustion : Ce processus implique l'atomisation et la combustion des combustibles pour des applications telles que les moteurs et les chaudières.
- La pulvérisation sèche : Ici, une solution ou une suspension est pulvérisée dans un gaz chaud pour produire une poudre à partir du liquide, un procédé qui présente des similarités avec l'atomisation des matériaux fondus.
- La pulvérisation agricole : Ce type de pulvérisation est utilisé pour l'application d'insecticides et d'engrais chimiques sur les cultures.

D'autres domaines significatifs incluent la pulvérisation médicale pour les inhalateurs, les aérosols et la pulvérisation de peintures.

Le terme "atomiseur" se réfère à la machine utilisée pour la pulvérisation. L'élément principal de cette machine est constitué par les buses qui projettent le liquide et les gaz à grande vitesse. Cependant, dans le contexte industriel, "atomiseur" désigne souvent l'ensemble du système d'atomisation. Ce système comprend le dispositif de pulvérisation, le mécanisme d'alimentation en matériaux fondus, la chambre d'atomisation et le système de collecte de la poudre.

2.2 Formes des buses

Il existe principalement deux types de buses couramment utilisées : les buses ouvertes, également appelées à chute libre, et les buses fermées ou confinées. Dans les systèmes à buses fermées, le métal en fusion est acheminé à travers un tube, généralement en céramique, inséré dans la buse à gaz métallique. Cette configuration assure que les deux buses, celle du métal et celle du gaz, ne se touchent pas. Le gaz vient frapper le métal en fusion juste à la sortie de la buse. À

l'inverse, dans les buses ouvertes, le jet de métal liquide tombe sur une certaine distance entre la buse de liquide et le point où il rencontre le gaz. Dans ce cas, il n'y a aucun contact direct entre la buse de liquide et celle de gaz.

2.2.1 Les buses fermées

Les buses fermées présentent certains avantages car elles minimisent les pertes en énergie cinétique et en vitesse du gaz à la sortie. Cela permet d'obtenir des vitesses de gaz très élevées dans la zone d'impact, ce qui est particulièrement bénéfique pour la production de poudres très fines (avec des diamètres inférieurs à 20 ou 100 microns, selon le métal à atomiser). La figure 2.1 .a illustre la conception des buses fermées. Toutefois, elles ont un inconvénient notable : le refroidissement rapide de la buse de métal, sauf lorsqu'on utilise un gaz chaud, comme c'est souvent le cas avec l'aluminium. Ce refroidissement impose des contraintes thermiques importantes sur le matériau de la buse.

Un autre inconvénient des buses fermées est que le jet de gaz autour des extrémités de la buse du métal provoque des variations de pression significatives à la sortie. Si l'on souhaite utiliser un grand angle d'attaque (par exemple 90°) pour atténuer le problème de refroidissement, cela engendre une pression de retour élevée. Cette pression de retour nécessite l'application d'une forte pression sur le liquide (jusqu'à 100 KPa) pour assurer une coulée continue du métal sans risquer de boucher la buse.[7]

Pour cette raison, on préfère souvent des angles d'attaque inférieurs à 50° , ce qui crée une aspiration du métal et augmente le débit de celui-ci, parfois par un facteur de deux à trois. Cela entraîne un changement notable dans le rapport des débits gaz/métal et donc une variation significative de la taille des particules de la poudre produite.

2.2.2 Les buses ouvertes

Les buses à jet libre (figure 2.1), similaires à celles présentées dans la figure 11.I.a, possèdent les caractéristiques suivantes : la buse métallique n'est généralement pas refroidie par le jet de gaz, donc les chocs thermiques sur la buse métallique ne posent pas autant de problèmes que dans le cas des buses fermées. Cependant, l'inconvénient de ce type de buse réside dans le chemin relativement long que suit le jet de gaz (en moyenne de 50 à 200 mm) avant d'atteindre le point d'impact. Cela réduit la vitesse et l'efficacité pour produire des poudres fines.

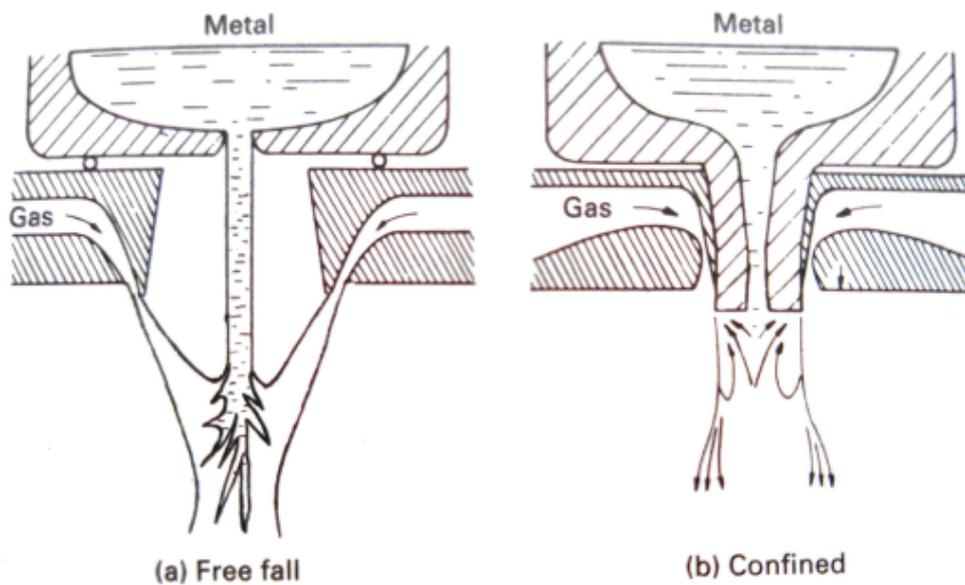


FIGURE 2.1 – Exemples de buses. (a) Buse fermée (b) Buse ouverte [7].

Dans les buses à conception ouverte, le jet de métal tombe directement dans le jet de gaz. Cette méthode a été utilisée pendant une cinquantaine d'années ou plus avec des métaux comme le zinc et l'aluminium. La figure 2.2 montre un dispositif à jet horizontal utilisé pour les matériaux à bas point de fusion, où le métal est aspiré par le jet de gaz horizontal.

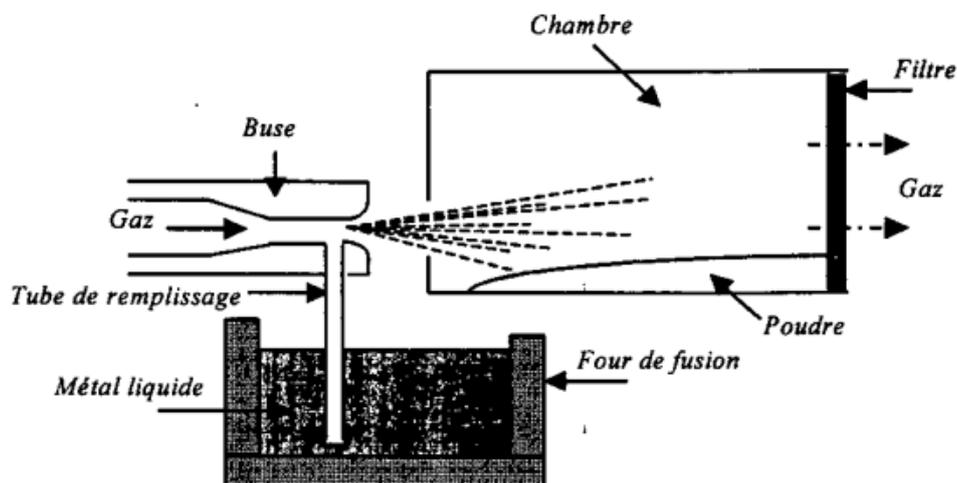


FIGURE 2.2 – Dispositif d'atomisation à jet horizontal..

Les systèmes à jet de métal vertical sont plus efficaces car ils peuvent fonctionner avec moins de risques de projection du métal contre les parois de la chambre. Plusieurs producteurs utilisent avec succès ce système pour produire des poudres de taille importante avec une régularité et un rendement excellents [15].

2.3 Mécanismes de l'atomisation

Il existe plusieurs modes théoriques de désintégration du métal liquide en gouttelettes. Ces modes peuvent être expliqués à l'aide d'hypothèses simplificatrices, telles que les faibles vitesses du liquide et la formation de gouttelettes à la longueur d'onde la plus instable théoriquement. Ces concepts sont illustrés dans la figure 2.3.

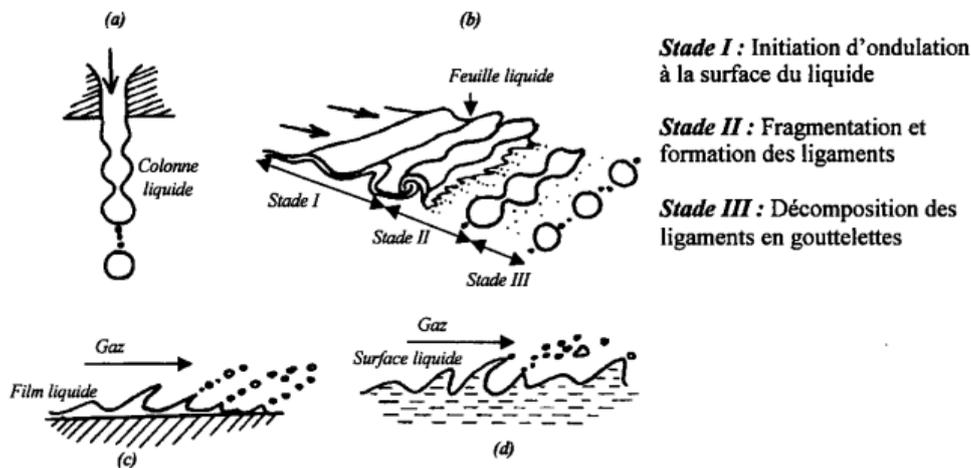


FIGURE 2.3 – Les différents modes d'atomisation.

Ces modes incluent différents processus de désintégration du métal liquide :

- La désintégration d'un liquide s'écoulant d'un orifice (figure 2.3a).
- La désintégration d'une mince couche de liquide (figure 2.3b).
- La désintégration d'un film mince de liquide sur une surface solide (figure 2.3c).
- La formation de gouttelettes à partir de la surface d'un liquide libre (figure 2.3d).

Le mécanisme d'atomisation peut être expliqué par un modèle de désintégration d'une feuille de liquide sous l'effet d'un jet de gaz, comme montré dans la figure 2.3b [8]. Ce processus commence par l'initiation d'ondulations sinusoïdales ou d'autres perturbations dont l'amplitude croît rapidement durant la phase I. Ces ondulations se développent ensuite en formant des ligaments au cours de la phase II. Enfin, ces ligaments se brisent en gouttelettes dans la phase III.

2.4 Paramètres d'atomisation

2.4.1 Influence de la température de surchauffe

À mesure que la température du métal augmente, les particules formées deviennent plus fines et plus sphériques. Cela s'explique par la réduction de la viscosité du métal liquide et de sa tension superficielle. La finesse des particules est donc liée à la température du liquide. En effet, une surchauffe diminue la viscosité et la tension superficielle du métal, tout en augmentant le temps de solidification. Ces conditions favorisent la formation de particules sphériques en raison de l'effet de la tension superficielle.

2.4.2 Influence de la vitesse du gaz (pression) et débit du métal liquide

Un facteur crucial qui influence la distribution de la taille des particules dans l'atomisation à gaz est le rapport du débit massique entre le gaz et le métal (G/A). On obtient des poudres avec une distribution de taille étroite lorsque les vitesses de refroidissement sont uniformes. Pour y parvenir, il est essentiel de maintenir le rapport G/A constant pendant toute la durée de l'atomisation. En première approximation, le débit massique du gaz est maintenu constant en fixant la pression du gaz pour une conception d'atomiseur donnée.

Dans l'atomisation conventionnelle, le métal est coulé librement sous l'effet de la gravité jusqu'au point d'impact avec le gaz. Pour une alimentation en métal à chute libre, le débit massique A dépend principalement de la pression métallostatique à la surface du bain de métal liquide, qui se situe à une hauteur h par rapport au trou de coulée ; $A = f(h)$, et est proportionnel à $h^{1/2}$. Ainsi, A peut être contrôlé en ajustant la hauteur h .

Un débit métallique variable peut entraîner des vitesses de refroidissement et de solidification des gouttelettes atomisées non constantes, ce qui se traduit par des dimensions de particules non uniformes et des changements dans la forme souhaitée.

Dans l'atomisation confinée à gaz, où le tube d'alimentation en métal liquide est placé très près du jet de gaz à haute vitesse, les interactions aérodynamiques entre le jet de gaz et le tube d'alimentation en métal provoquent une chute non libre du métal liquide. Dans ce cas, le débit dépend non seulement de la hauteur h mais aussi de la différence de pression entre la pression à la sortie du tube d'alimentation et la pression ambiante.

Les mesures de la pression du gaz à la sortie du tube d'alimentation, utilisant un atomiseur à gaz circulaire sans jet de métal, ont montré que les variations de pression (positives ou négatives) par rapport à la pression ambiante dépendent de la position relative entre le jet de gaz et le tube d'alimentation en métal.

La figure 11.6 illustre les résultats d'une étude menée par Teïchi Ando [16]. Ces variations de pression peuvent significativement ralentir ou accélérer le débit du métal.

Des variations excessives de la pression positive peuvent pousser le gaz d'atomisation à pénétrer dans le creuset par le tube d'alimentation, ce qui pourrait entraîner un barbotage du liquide ou même provoquer la solidification du métal à l'intérieur du tube. À l'inverse, des variations excessives de la pression négative (aspiration) peuvent réduire le rapport G/A à des niveaux indésirables, ce qui risque de ne pas assurer une désintégration suffisante du métal liquide.

Cependant, il est impossible de mesurer directement la pression en présence de la coulée de métal. Ainsi, on ne peut pas obtenir les valeurs de pression précises pendant l'atomisation à gaz, sauf si l'on connaît la forme mathématique de la relation $A = f(\Delta(P), h)$. Les pressions mesurées à la sortie ne peuvent pas être directement reliées au débit de métal, ce qui signifie qu'elles ne fournissent aucun moyen de contrôler la vitesse d'atomisation dans un système d'atomisation confinée à gaz.

2.5 Taille des particules

L'une des premières équations empiriques les plus connues pour la taille moyenne des particules est l'équation de Nukiyama et Tanasawa [17], qui se présente sous la forme suivante :

$$d_0 = \frac{585 \left(\frac{\gamma_s}{V_{\text{mel}}} \right)^{0.5}}{\sqrt{\frac{\mu}{\rho_m}}} + 597 \left(\frac{\mu}{\gamma \rho_m} \right)^{0.225} \left(\frac{10000 Q_l}{Q_a} \right)^{1.5} \quad (2.1)$$

où :

- d_0 : diamètre moyen des gouttelettes (μm).
- ρ_m : densité du liquide (g/cm^3).
- γ_s : tension superficielle du liquide ($dyne/cm$).
- μ : viscosité dynamique du liquide ($dyne \cdot s/cm^2$).
- V_{mel} : vitesse relative entre l'air et le liquide (m/s).
- Q_l : débit volumique du liquide (l/s).
- Q_a : débit volumique de l'air (l/s).

Cette équation a été dérivée à partir d'une série d'expériences d'atomisation à température constante, en variant la viscosité et la pression, et en utilisant l'air comme fluide d'atomisation. Lubanska [18] a proposé une relation empirique donnant la taille moyenne d_m des particules de la poudre atomisée au gaz. Celle-ci est de la forme :

$$\frac{d_m}{d_{\text{met}}} = C_m \left(\frac{V_m}{V_g w} \left(1 + \frac{A_1}{A_a} \right) \right)^{1/2} \quad (2.2)$$

où :

- w : nombre de Weber,
- $w = \frac{V_a^2 \rho_m d_{\text{met}}}{\gamma_s}$,
- d_m : diamètre moyen des particules,
- d_{met} : diamètre de flux de métal,
- V_m : viscosité cinématique du métal liquide,
- γ_g : viscosité cinématique du fluide atomiseur,
- λ : débit massique du métal liquide,
- V_a : vitesse du fluide d'atomisation,
- ρ_m : densité du métal liquide,
- γ_s : tension superficielle du métal liquide,
- A_a : débit massique du fluide atomiseur,
- C_m : constante.

Les deux équations précédentes indiquent que la taille des particules diminue avec l'augmentation de la tension superficielle du métal liquide et de la vitesse du gaz atomiseur.

2.6 Formes des particules

Avec l'avènement des ordinateurs, de nouvelles approches d'analyse quantitative de la forme des particules sont devenues possibles. Grâce aux nombreuses corrélations empiriques entre les propriétés techniques et les propriétés volumiques des poudres (densité apparente, débit, densité après compression), il est désormais possible d'utiliser ces propriétés pour déterminer la forme des particules.

La compréhension de la forme des particules atomisées nécessite la connaissance des facteurs qui influencent les vitesses relatives de refroidissement et la sphéroïdisation. Généralement, dans

l'atomisation à l'eau, les vitesses de refroidissement sont de un à deux fois supérieures à celles de l'atomisation à gaz (azote ou argon). À mesure que les forces du fluide atomiseur diminuent avec la distance dans la zone d'atomisation propre, les tensions superficielles ont tendance à sphéroïdiser les gouttelettes initialement irrégulières [17].

Ainsi, une fois que la gouttelette quitte la zone de haute turbulence, les tensions superficielles commencent à influencer, pour autant que la gouttelette ne soit pas refroidie à un point où sa viscosité devient significative. Si le temps de sphéroïdisation () de la gouttelette est court par rapport au temps de solidification (), la particule a tendance à adopter une forme sphérique. En revanche, si le temps de sphéroïdisation est long, la particule a tendance à conserver une forme irrégulière.

Sur la base de cette hypothèse, Nichiporenko et Naida [19] ont proposé des expressions permettant d'évaluer les temps de sphéroïdisation et de solidification

$$\tau_{\text{sph}} = \frac{3\pi^2\mu(r_2^4 - r_1^4)}{4V_p\gamma_s} \quad (2.3)$$

où :

- τ_{sph} : temps de sphérisation,
- μ : viscosité dynamique du liquide,
- r_1 : rayon de la particule avant la transformation en forme sphérique,
- r_2 : rayon de la particule après la transformation (on suppose $r_2/r_1 \approx 10$),
- V_p : volume de la particule,
- γ_s : tension superficielle du liquide.

Le temps de refroidissement d'une sphère métallique portée au point de fusion, en supposant que le transfert de chaleur se fait par convection et en tenant compte du temps nécessaire au dégagement de la chaleur latente de fusion, est donné par :

$$T_{\text{sol}} = \frac{d_p\rho_m}{6h_c} \left((C_p)_m \ln \left(\frac{T_i - T_g}{T_m - T_g} \right) + \frac{\Delta H_m}{T_m - T_g} \right) \quad (2.4)$$

où :

- d_p : diamètre de la particule,
- ρ_m : densité du métal,
- h_c : coefficient de transfert de chaleur par convection,
- $(C_p)_m$: chaleur spécifique du métal,
- T_i : température initiale de la particule,
- T_g : température du gaz,
- T_m : température du métal liquide,
- ΔH_m : chaleur latente de fusion du métal.

Bien que les équations (2.3) et (2.4) soient simplifiées, elles sont extrêmement utiles pour estimer l'influence des différents paramètres sur la forme des particules. Le coefficient de transfert de chaleur h_c de l'équation (2.5) est défini comme :

$$h_c = \frac{\lambda}{d_p} \left(2 + 0.6\text{Re}^{0.5}\text{Pr}^{0.33} \right) \quad (2.5)$$

où :

- λ : conductivité thermique du fluide atomiseur,
- Re : nombre de Reynolds,
- Pr : nombre de Prandtl.

Les nombres sans dimension Re et Pr sont utilisés en dynamique des fluides pour caractériser les conditions d'écoulement.

$$Re = \frac{\rho_a V_a d_p}{\mu_d} \quad (2.6)$$

$$Pr = \frac{\mu_d (C_p)_a}{\lambda} \quad (2.7)$$

où :

- ρ_d : densité du fluide,
- V_a : vitesse du fluide,
- d_p : diamètre de la particule,
- μ_d : viscosité dynamique du fluide,
- $(C_p)_a$: chaleur spécifique du fluide,
- λ : conductivité thermique du fluide.

Le coefficient de transfert de chaleur h_c est plus significatif pour les liquides que pour les gaz. C'est pourquoi les particules de poudre atomisées à l'eau ont tendance à être plus irrégulières que celles atomisées au gaz. En effet, selon l'équation (2.5), le temps de solidification est plus court dans le cas de l'atomisation à l'eau.

2.7 Microstructure des poudres

Dans la technologie conventionnelle de la coulée, les vitesses de refroidissement sont généralement inférieures à 100°C/s . En revanche, dans le cas de la poudre atomisée, la grande surface spécifique par unité de volume permet un refroidissement à des vitesses comprises entre 10^3 et 10^4 $^\circ\text{C/s}$. Plus la taille des particules diminue, plus la vitesse de refroidissement augmente, atteignant parfois des valeurs extrêmes de 10^8 $^\circ\text{C/s}$. Cette augmentation de la vitesse de refroidissement réduit le degré de ségrégation. Le produit de la coulée présente une structure dendritique, caractérisée par la taille des grains et la distance interdendritique entre les branches secondaires, qui sont utilisées pour décrire la structure dendritique et la ségrégation.

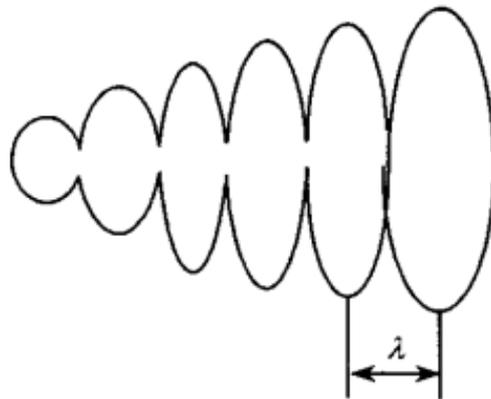


FIGURE 2.4 – Dendrites secondaires

L'atomisation des poudres peut produire des microstructures avec une distance interdendritique (voir figure 2.4) inférieure à 1 μm . Dans le cas extrême, cela correspond à une poudre amorphe où le refroidissement est si rapide que la cristallisation est évitée.

- Les métaux amorphes présentent une structure aléatoire non cristalline.
- Les matériaux micro-cristallins sont également refroidis rapidement, mais possèdent une structure cristalline fine. Durant un refroidissement normal, l'évolution microstructurale est gouvernée par la germination et la croissance.

2.7.1 Influence de taille de la particule sur sa microstructure

L'atomisation à gaz est une méthode attrayante pour obtenir des microstructures contrôlées grâce à un refroidissement par convection rapide. Pour une première approximation, la vitesse de refroidissement peut être calculée en utilisant l'approche newtonienne [15] :

$$\frac{dT}{dt} = -K \cdot S \cdot (T - T_0) \quad (2.8)$$

où :

- T : température absolue de la particule,
- S : surface de la particule,
- T_0 : température ambiante,
- K : vitesse du transfert de chaleur par unité de surface.

En conséquence, pendant l'atomisation, la température de la particule décroît exponentiellement avec le temps en raison du refroidissement par convection. La distance entre deux branches de dendrites secondaires d'un solide formé par germination et croissance à partir du liquide, pour une particule de diamètre varie comme suit :

$$\lambda_d = C d_p^n \quad (2.9)$$

où :

- C : une constante qui dépend du matériel et du processus d'atomisation,
- d_p : diamètre de la particule,
- n : un exposant variant entre 0.5 et 1.0, dépendant de la composition de l'alliage et du mode de solidification.

Pour une gouttelette sphérique, le refroidissement se fait par convection et rayonnement. Le rôle relatif de chacun de ces deux modes de refroidissement dépend de la conductivité thermique du gaz, de la température d'atomisation, de la température du gaz, de la vitesse de la particule et de la pression du gaz. Lors de l'atomisation sous vide, la perte de chaleur se fait principalement par rayonnement, ce qui entraîne une vitesse de refroidissement plus faible que celle par convection.

En revanche, dans le cas de l'atomisation à gaz, c'est le refroidissement par convection qui prédomine. La vitesse de refroidissement peut être exprimée par :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{6}{d_p \rho_m (C_p)_m} \left[h_c (T_m - T_0) + \epsilon S_t (T^4 - T_0^4) \right] \quad (2.10)$$

où :

- ρ_m : densité du métal,
- $(C_p)_m$: capacité calorifique du métal,
- T_m : température absolue du métal,
- T_0 : température ambiante,
- h_c : la constante de refroidissement par convection,
- ϵ : l'émissivité,
- S_t : la constante de Stefan-Boltzmann.

2.7.2 Théorie de la germination appliquée à l'atomisation

La transformation d'un liquide en un solide cristallin se déroule en deux étapes distinctes. La première étape est la germination, qui commence par l'organisation d'un groupe d'atomes dans une structure solide au sein du liquide. Une fois qu'un germe solide est formé dans le liquide, les atomes s'agrègent autour de ce germe, ce qui entraîne une augmentation du volume solide. La croissance des germes permet de réduire l'énergie du système. La croissance ne peut avoir lieu qu'après la germination. La suppression de la germination est une méthode pour obtenir un solide amorphe.

Dans le processus de germination homogène, un petit germe se forme spontanément dans le liquide pour initier la transformation. Ce germe se développe ensuite pour transformer la gouttelette en un solide cristallin. En dessous de la température d'équilibre de fusion, l'énergie libre du solide stable est inférieure à celle du liquide, favorisant ainsi la formation du solide cristallin.

Ainsi, il existe une différence d'énergie libre par unité de volume $\Delta(G_V)$ (négative) qui varie linéairement avec $\Delta(T)$ ($\Delta(T)$ représente la différence de température entre la température d'équilibre et le solidus réel).

$$\Delta G_v = \Delta G_0 \Delta T \quad (2.11)$$

Où $\Delta(G_0)$ représente la variation de l'énergie libre avec la température en dessous de la température de solidification d'équilibre (T_M).

L'énergie libre totale $\Delta(G_T)$ nécessaire pour former un germe de rayon r dans le liquide en refroidissement est définie par l'équation (2.12).

$$\Delta G_T = 4\pi r^2 \gamma_s + \frac{4\pi r^3 \Delta G_v}{3} \quad (2.12)$$

Un aspect crucial de l'équilibre, selon cette équation, est que l'énergie totale du système augmente avec la formation d'un petit germe. Par conséquent, la transformation n'est pas favorable à moins qu'un germe n'atteigne une taille critique.

Le rayon critique du germe r_c est obtenu en dérivant l'équation (2.12) par rapport au rayon r de la particule.

$$r_c = -\frac{2\gamma_s}{\Delta G_v} \quad (2.13)$$

Puisque l'énergie libre volumique $\Delta(G_V)$ est négative et décroissante avec $\Delta(T)$, donc d'après

l'équation 2.13 il devient plus facile de former un germe solide avec l'augmentation de $\Delta(T)$, comme l'indique l'équation (2.13).

La vitesse de formation des germes est appelée vitesse de germination et elle est mesurée en nombre de germes par unité de volume par unité de temps. Cette vitesse varie en fonction de nombreux paramètres, y compris la viscosité du liquide et la température. Pour une première approximation [15], la vitesse de germination I peut être exprimée comme suit :

$$I = I_0 d_p^2 \exp\left(-\frac{Q_i}{kT}\right) \exp\left(-\frac{W_M}{T\Delta T^2}\right) \quad (2.14)$$

où :

- I_0 : un facteur de fréquence qui représente le nombre de tentatives de germination par unité de temps,
- d_p : est le diamètre de la particule,
- Q_i : est l'énergie d'activation pour une coulée visqueuse (qui est équivalente à l'énergie d'activation pour la diffusion à travers le liquide),
- k : est la constante de Boltzmann,
- T : est la température absolue (K),
- ΔT : est la différence entre la température d'équilibre de fusion et la température de transformation,
- W_M : est une collection de l'enthalpie de fusion, de la température de fusion de l'énergie superficielle et du volume atomique.

En raison de la complexité de sa dépendance avec la température, la vitesse de germination subit des variations significatives pendant le refroidissement, comme illustré dans la figure 2.5.

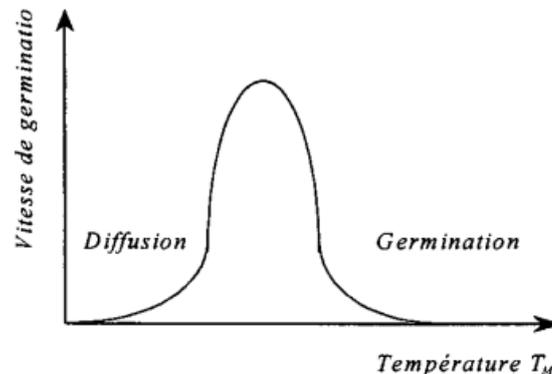


FIGURE 2.5 – Variation de la vitesse de germination en fonction de la température.

Avec la diminution de la température, la vitesse de germination augmente, atteint un maximum, puis décroît. Aux températures élevées, la faible force motrice et la grande taille des germes entravent la germination, ce qui se reflète par une faible différence de température (T). Aux températures basses ($\Delta(T)$ élevée), la faible mobilité des atomes dans le liquide empêche également la germination.

Ainsi, si une gouttelette en fusion peut être refroidie à travers la plage de température correspondant au pic de vitesse de germination, il est possible d'éviter la cristallisation. Le liquide devient alors suffisamment visqueux pour ne pas se cristalliser, produisant ainsi un solide amorphe. Avec

des vitesses de solidification rapides telles que celles observées dans l'atomisation à gaz, la solidification peut se produire plus rapidement que la diffusion atomique dans le liquide, éliminant ainsi la ségrégation et donnant une structure solide plus homogène.

Lors de la transformation du liquide en solide, la chaleur est libérée à l'interface solide-liquide, ce qui entraîne un réchauffement proportionnel à la capacité calorifique C_p .

$$\Delta T_R = \frac{\Delta H_s}{C_p} \quad (2.15)$$

Où $\Delta(T_R)$ est l'augmentation de la température et $\Delta(H_S)$ est l'enthalpie de solidification.

Le temps de solidification d'une particule atomisée est une variable critique, estimée approximativement par l'équation (2.10). Dans cette équation, le coefficient de transfert de chaleur h_c dépend de la conductivité thermique du gaz et du nombre de Reynolds du système. Cependant, cette équation ne représente qu'une approximation dans le calcul complexe du temps de solidification, qui influence la taille de la chambre d'atomisation.

Pour différents types d'atomiseurs, les dimensions de la chambre varient significativement. Par exemple :

Pour les atomiseurs centrifuges, la hauteur de la chambre est d'environ 4 mètres. Dans le cas de l'atomisation à l'argon, la chambre peut atteindre environ 8 mètres de hauteur. Pour l'atomisation à explosion sous vide partiel, où le refroidissement par convection est limité, la taille de la chambre peut être de l'ordre de 15 mètres de hauteur. Enfin, dans le cas de l'atomisation à deux fluides utilisant gaz et eau, le diamètre de la chambre est généralement d'environ 0.5 mètre. Ces dimensions sont adaptées en fonction des exigences spécifiques de l'atomisation pour assurer un refroidissement efficace et contrôlé des particules atomisées.

Applications des poudres obtenues par la solidification rapide L'utilisation de la solidification rapide est justifiée par les améliorations qu'elle apporte aux propriétés magnétiques, électriques, mécaniques, de résistance à la corrosion et aux rayonnements.

Dans les phases amorphes, les températures de Curie sont plus élevées, ce qui réduit les pertes magnétiques par hystérésis. De plus, l'absence de joints de grains dans ces matériaux améliore considérablement la résistance à la corrosion, jusqu'à un facteur de 100 environ [15]

Pour les poudres d'aluminium atomisées, le refroidissement rapide augmente la limite de solubilité des éléments d'addition grâce à l'effet de trempe. Par exemple [15] :

- La solubilité du chrome dans l'aluminium passe de 0,4
- La solubilité du cuivre dans l'aluminium augmente de 2,5
- La solubilité du silicium dans l'aluminium s'élève de 1,6

Ces augmentations sont dues à l'extraction rapide de la chaleur, qui empêche les atomes de se réorganiser dans une structure ordonnée. Cette propriété est particulièrement avantageuse pour les alliages aluminium-lithium (Al-Li), où le lithium améliore la résistance et la limite élastique. Cependant, cela peut dégrader la ductilité. La solidification rapide permet également d'améliorer de manière notable la limite de fatigue. Les nouveaux alliages Al-Li présentent une densité réduite et un module d'élasticité plus élevé par rapport aux alliages d'aluminium traditionnels, tout en offrant une résistance mécanique supérieure.

2.8 Influence des éléments d'addition

Lorsque l'on ajoute de petites quantités d'éléments comme le magnésium (Mg), le titane (Ti), le lithium (Li) ou le calcium (Ca) au cuivre atomisé à l'eau, la forme des particules de poudre tend à devenir plus irrégulière. Ces éléments ont pour effet de diminuer la tension superficielle du cuivre en fusion. Selon l'équation (2.11), une baisse de la tension superficielle augmente le temps de sphéroïdisation des particules, ce qui conduit à la formation de particules avec des formes plus irrégulières. Toutefois, pour de nombreuses poudres atomisées, une grande fraction des particules fines tend à adopter une forme sphérique.

2.9 Influence des collisions sur la forme des particules

Dans le processus d'atomisation, en particulier lors de l'atomisation à gaz, les particules peuvent entrer en collision les unes avec les autres, ce qui peut avoir un impact considérable sur leur forme finale. Malgré cette influence potentiellement significative, de nombreuses études sur l'atomisation des poudres métalliques ont tendance à négliger cet aspect. Les modèles mathématiques développés pour simuler le processus d'atomisation prennent rarement en compte ce phénomène de collision entre particules, ce qui pourrait limiter leur précision.

Chapitre 3

Conception de l'atomiseur

3.1 Description Générale de l'Atomiseur

L'atomiseur développé pour ce projet est spécifiquement conçu pour la production de poudres métalliques à partir de métal fondu, en utilisant une méthode d'atomisation par gaz. Le processus débute par la fusion du métal dans un four à creuset de grande capacité, séparé de l'atomiseur. Ce four utilise un mélange de méthane et d'oxygène pour atteindre des températures de fusion comprises entre 750 et 850°C, adaptées à la fusion de l'aluminium.

Avant le transfert du métal fondu dans l'atomiseur, un entonnoir de coulée en acier, isolé thermiquement avec de la laine de céramique, est préchauffé à l'aide d'un chalumeau pendant environ une heure. Ce préchauffage est essentiel pour minimiser les pertes thermiques soudaines et assurer une coulée homogène du métal.

Le métal fondu est ensuite introduit dans la buse d'atomisation, où il est pulvérisé en fines gouttelettes sous l'effet d'un jet de gaz à haute pression. L'atomisation est réalisée en utilisant soit de l'argon, soit de l'air, selon les conditions du processus. Chaque gaz offre des avantages spécifiques pour la production de poudre, bien que l'accent soit mis sur la production de poudre sans entrer dans les détails de la caractérisation des tailles ou distributions des particules.

La chambre d'atomisation, de forme cylindrique, a été fabriquée à partir d'une citerne en acier galvanisé, choisie pour sa robustesse et ses dimensions adaptées à la dynamique des particules. La géométrie cylindrique favorise une trajectoire tourbillonnante des particules métalliques atomisées, ce qui permet un refroidissement naturel au cours de leur déplacement. Ce processus supprime ainsi la nécessité d'un système de refroidissement dédié, tout en assurant une solidification rapide des particules.

Les particules métalliques, après atomisation, se répartissent en fonction de leur taille. Les plus grosses se déposent par gravité au fond de la chambre, où elles sont accessibles via une trappe de collecte spécialement aménagée. Les particules fines, quant à elles, sont capturées par un cyclone qui utilise la force centrifuge pour les séparer du flux de gaz résiduel, assurant ainsi une collecte efficace des poudres.

La gestion des paramètres de l'atomiseur, tels que la température du métal, la pression du gaz, et le débit, est effectuée manuellement. Des thermocouples sont utilisés pour surveiller en continu la température du métal fondu, mais les ajustements nécessaires sont réalisés par l'opérateur. Cette approche permet une flexibilité et une adaptation en temps réel aux conditions d'atomisation, sans chercher à optimiser chaque paramètre en fonction de la qualité finale de la poudre.

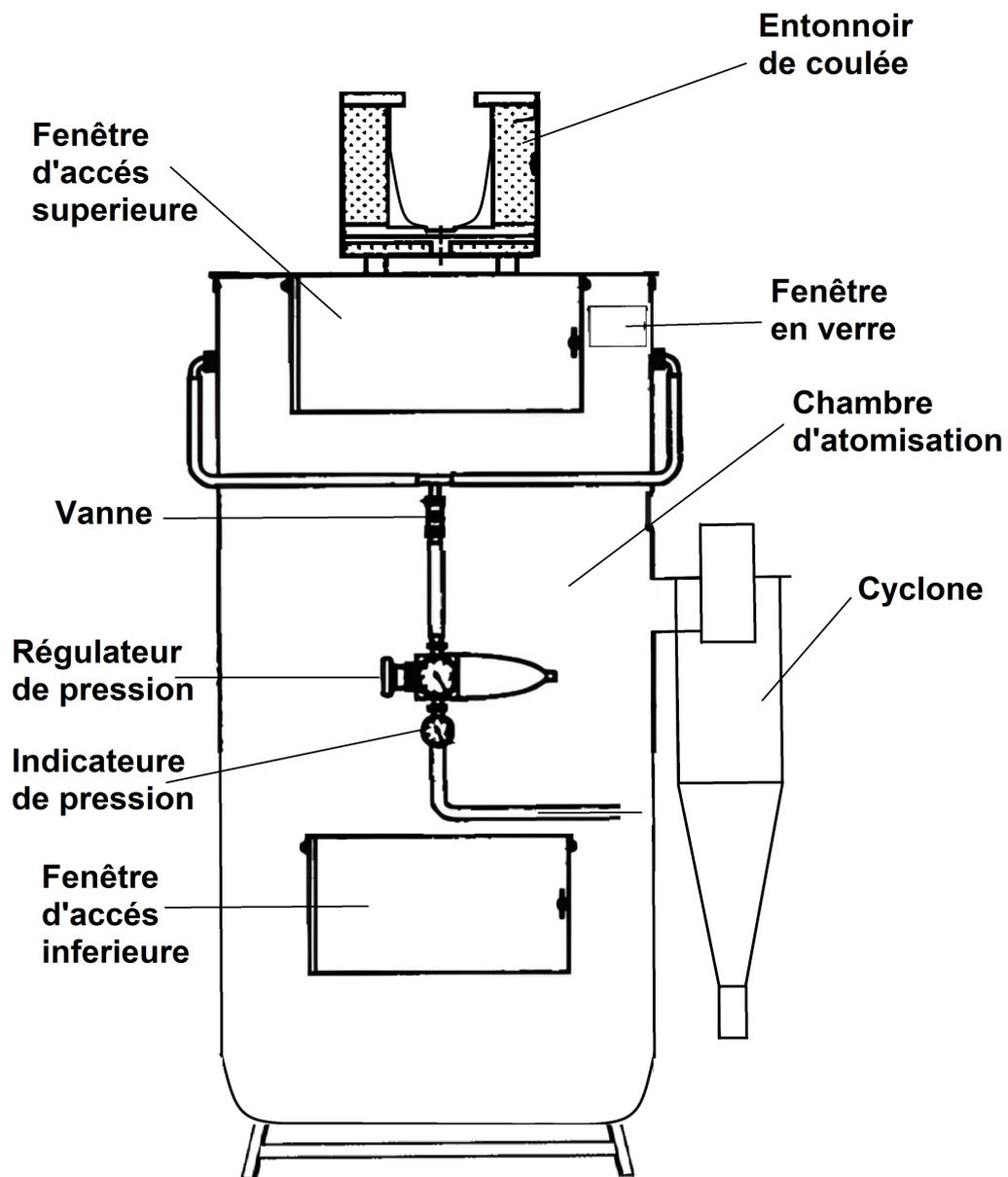


FIGURE 3.1 – Vue d'ensemble de l'atomiseur.



FIGURE 3.2 – image réelle générale d'ensemble de l'atomiseur.

3.2 Conception de l'Entonnoir de Coulée

L'entonnoir de coulée a été conçu en acier doux, choisi pour ses excellentes propriétés mécaniques et sa résistance à la chaleur. Ce matériau est particulièrement adapté à des températures élevées, essentielles dans le processus d'atomisation, tout en étant facile à usiner.

Propriétés de l'Acier Doux	Valeur
Conductivité thermique	35 W/m · K
Température de fusion	1500 °C
Résistance mécanique	450 MPa

TABLE 3.1 – Propriétés de l'acier doux utilisé pour l'entonnoir de coulée. [1]

Pour éviter toute perte de chaleur et protéger les composants adjacents, l'entonnoir est isolé avec de la laine de céramique. L'isolant en laine de céramique est placé dans l'espace annulaire entre l'entonnoir en acier et le support extérieur cylindrique en acier, formant une barrière thermique qui protège le métal fondu des pertes de chaleur comme montré dans la figure 3.2 .

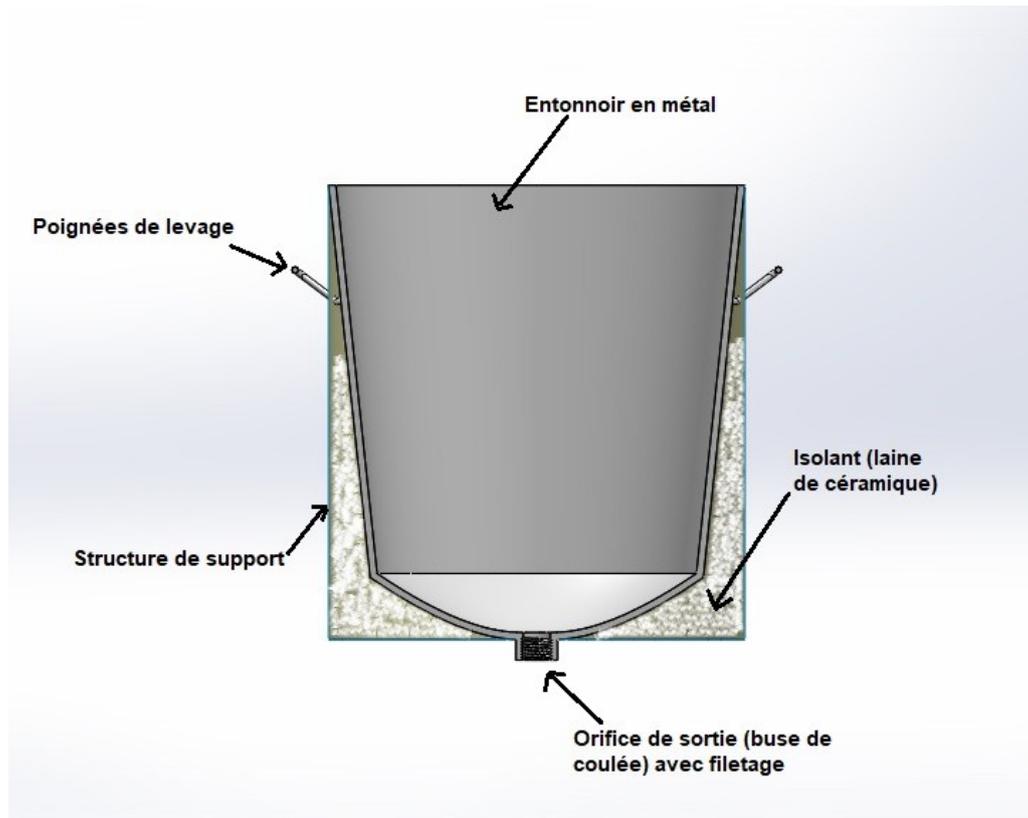


FIGURE 3.3 – Coupe transversale de l'entonnoir.

Ce matériau a été sélectionné pour son faible coefficient de conductivité thermique, assurant une isolation thermique efficace.

Propriétés de la Laine de Céramique	Valeur
Conductivité thermique	0.42 (à 1000°C) W/m · K
Température maximale	1260 °C

TABLE 3.2 – Propriétés de la laine de céramique utilisée pour l'isolation. [2]

L'entonnoir a des dimensions spécifiques pour garantir un flux optimal du métal fondu, avec une hauteur de 220 mm, un diamètre supérieur de 200 mm et une épaisseur de paroi de 10 mm. **Un dessin technique détaillé de l'entonnoir de coulée est présenté en Annexe I.**

Dimensions de l'Entonnoir	Valeur
Hauteur	220 mm
Diamètre supérieur	200 mm
Épaisseur des parois	10 mm

TABLE 3.3 – Dimensions principales de l'entonnoir de coulée.

Le contrôle du débit du métal à la sortie de l'entonnoir est assuré par un système de goujons filetés, qui relie l'entonnoir à la buse d'atomisation. Ces goujons de longueur 10cm sont percés de part en part, avec des diamètres variables, permettant ainsi de réguler précisément le débit du métal fondu en fonction des besoins du processus.

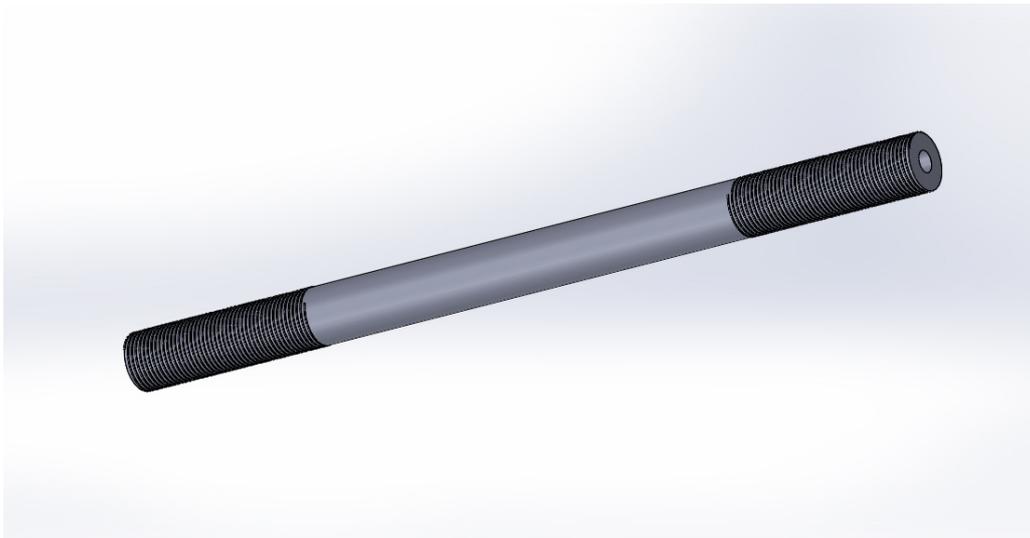


FIGURE 3.4 – Goujon persé de part en part avec différents diamètres.

En ajustant le diamètre des orifices, il est possible de moduler le flux de métal, garantissant une atomisation optimale en fonction de la viscosité du métal et des paramètres de l'atomiseur.

Diamètres des Goujons	Débit (L/min)
2 mm	1.5
3 mm	2.5
4 mm	3
5 mm	4.5

TABLE 3.4 – Goujons filetés et débits associés.(VALEURE EXPERIMENTALE)

Un schéma technique de l'entonnoir montre les dimensions principales, l'isolation thermique, et le système de contrôle du débit, illustrant l'efficacité de cette conception dans le processus d'atomisation.

3.2.1 Calcul de la vitesse d'écoulement du métal liquide

Pour calculer le débit ou la vitesse du métal liquide à travers le trou de coulée nous devons appliquer l'équation de Bernoulli. Dans ce cas on peut écrire :

$$\frac{v^2}{2} + gz + \frac{P}{\rho} = \text{Cte} \quad (3.1)$$

Prenons l'origine O de l'axe Oz (Fig. III.5.) dans la région où la section de la veine liquide devient constante (région très voisine de l'orifice). Les pressions statiques au voisinage de la surface libre ($z = H_A$) et en $O(z = H_B)$ sont égales à la pression atmosphérique.

Si on considère que la vitesse V_A est non nulle c'est à dire que le niveau de liquide diminue en fonction du temps, on peut écrire :

$$\rho B V_B = \rho A V_A \Rightarrow V_B = \frac{A}{B} V_A \quad (3.2)$$

Avec :

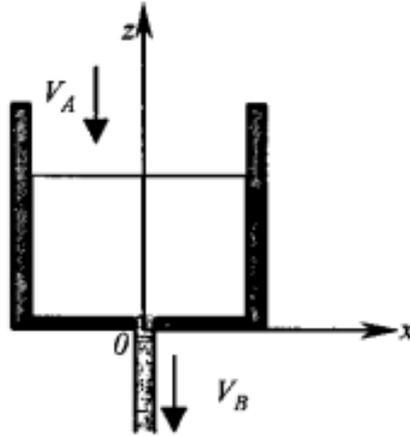


FIGURE 3.5 – Jet libre d'un métal liquide.

- ρ : densité du liquide
- A : section interne du cylindre (creuset) contenant le liquide
- B : section de l'orifice
- V_A : vitesse du liquide à l'intérieur du creuset
- V_B : vitesse du liquide à la sortie de l'orifice

$$\frac{P_A}{\rho} + \frac{v_A^2}{2} + gH_A = \frac{P_B}{\rho} + \frac{v_B^2}{2} + gH_B \quad (3.3)$$

Avec $H_B = 0$ et $P_A = P_B$ on obtient :

$$V_A = \left(\frac{2gH}{\left(\frac{A}{B}\right)^2 - 1} \right)^{1/2} \quad (3.4)$$

$$V_B = \left(\frac{2gH}{1 - \left(\frac{B}{A}\right)^2} \right)^{1/2} \quad (3.5)$$

Avec la variation de la masse :

$$\begin{aligned} dm &= -d\rho A \Rightarrow \Delta\rho A = -\rho A \Rightarrow \rho P = \rho B V_B \cdot dt, \\ -dA \frac{dh}{dt} &= B V_B \Rightarrow -dA \frac{dh}{dt} = B \left(\frac{2gH}{\left(\frac{B}{A}\right)^2 - 1} \right)^{1/2}, \\ \frac{dh}{dt} &= \left(\frac{2gH}{\left(\frac{A}{B}\right)^2 - 1} \right)^{1/2} \Rightarrow dh(t)^{1/2} = -dt \left(\frac{2g}{\left(\frac{A}{B}\right)^2 - 1} \right)^{1/2} \end{aligned}$$

Après intégration on obtient :

$$h(t) = \frac{1}{4} \left(-\frac{2g}{\left(\frac{A}{B}\right)^2 - 1} \right) t^2 + C \quad (3.6)$$

Si $t = 0$, $h = H \Rightarrow C = H^2$:

$$h(t) = \frac{1}{4} \left(-\frac{2g}{\left(\frac{A}{B}\right)^2 - 1} \right) t^2 + H^2 \quad (3.7)$$

Si la vitesse $V_A = 0$ on applique la formule de Torricelli :

$$V_B = (2gH)^{1/2} \quad (3.8)$$

3.3 conception de la buse

Initialement, j'ai conçu la buse avec une forme conique, composée de deux parties principales (figure 3.5). La forme conique de la buse n'a pas été choisie seulement pour son esthétique, mais aussi pour sa fonctionnalité, visant à diriger efficacement les flux de gaz et de métal. Cette conception permettait au gaz d'atomisation d'envelopper le jet de métal fondu, créant un flux tourbillonnant qui prolongeait le trajet des particules dans l'air.

Cependant, les premiers essais réalisés avec cette conception n'ont pas permis d'obtenir les résultats escomptés, car le flux de gaz n'était pas suffisant pour désintégrer le métal liquide en fines particules. En réponse à cet échec, une révision complète de la conception de la buse a été entreprise. La nouvelle conception, toujours basée sur un design conique optimisé, vise à corriger les limitations identifiées. L'accent a été mis sur l'amélioration de l'alignement et de la direction du flux de gaz pour maximiser l'interaction avec le métal liquide.

L'efficacité accrue du flux de gaz en forme de tourbillon dans la pulvérisation et le refroidissement du métal fondu a été optimisée pour améliorer la qualité des particules mais aussi pour jouer un rôle crucial dans la réduction de la taille nécessaire de la chambre d'atomisation. Grâce à ce processus révisé, les particules de métal ont suffisamment de temps pour se refroidir et se solidifier même dans un espace plus compact. **Un dessin technique détaillé de la buse révisée est présenté en Annexe I.**

Pour optimiser le processus d'atomisation selon différents besoins de production, j'ai testé divers angles de sortie pour la buse (Figure 3.6) : 20° , 30° , et 45° . Chaque angle influence significativement le comportement du flux de gaz et du métal, affectant ainsi la taille et la distribution des particules produites. Un angle plus aigu, comme 20° , concentre le flux de métal et de gaz pour une atomisation plus fine, tandis qu'un angle plus large, comme 45° , offre une dispersion plus étendue et un refroidissement plus rapide des particules. Les ajustements apportés à la buse ont démontré que l'optimisation de l'angle est essentielle pour contrôler les caractéristiques finales de la poudre produite.

Ces modifications de conception ont été cruciales pour surmonter les défis initiaux et ont permis de produire de la poudre de manière efficace avec la nouvelle buse, confirmant la validité des ajustements effectués.

Pour optimiser le processus d'atomisation selon différents besoins de production, j'ai utilisé trois types de buses, chacune avec un angle de conique différent (Figure 3.6) : **20°** , **30°** , et **45°** . Chaque angle influe significativement sur le comportement du flux de gaz et de métal, affectant ainsi la taille et la distribution des particules produites. Un angle plus aigu, comme 20° , concentre le flux de métal et de gaz pour une atomisation plus fine, tandis qu'un angle plus large, comme 45° , offre une dispersion plus large et un refroidissement plus rapide des particules.

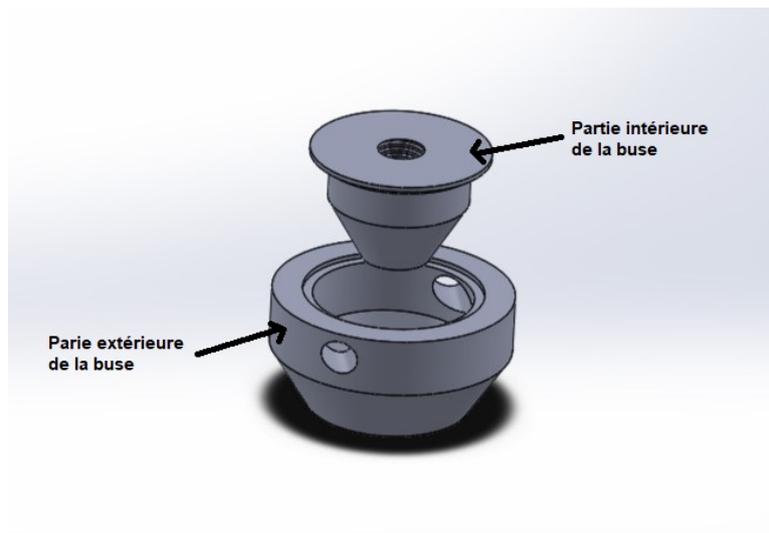


FIGURE 3.6 – Deux parties de la buse.

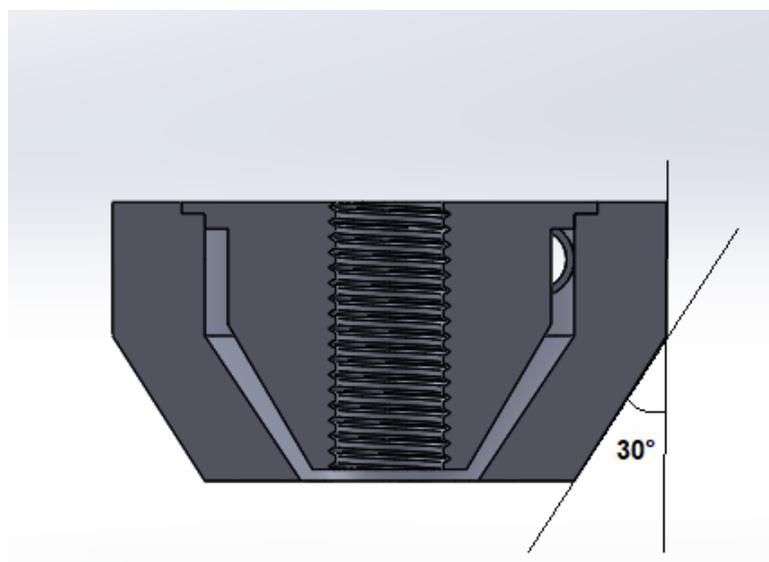


FIGURE 3.7 – Angle de buse à 30°.

La buse de mon atomiseur est fabriquée en acier doux. Les propriétés physiques de l'acier doux ont été détaillées dans les pages précédentes. Je présente ci-dessous les avantages spécifiques de l'utilisation de l'acier doux pour la fabrication de la buse, organisés sous forme de liste pour une clarté maximale :

- **Malléabilité et facilité de fabrication** : Permet des ajustements précis lors de la conception et de la production.
- **Coût économique** : Rend le projet plus abordable tout en conservant une qualité acceptable.
- **Adaptabilité** : Essentielle pour des modifications aisées et fréquentes, nécessaire pour l'optimisation continue du processus d'atomisation.
- **Durabilité** : Adéquate face aux contraintes mécaniques modérées, garantissant une longévité opérationnelle.
- **Bonne soudabilité** : Facilite la construction robuste et hermétique de la buse.

3.3.1 La partie Intérieure de la Buse

La partie intérieure de la buse est essentiellement cylindrique avec un rétrécissement conique vers le bas, où le métal fondu est expulsé. Cette forme conique aide à canaliser le métal fondu de manière efficace vers la sortie, en assurant un flux cohérent et contrôlé.

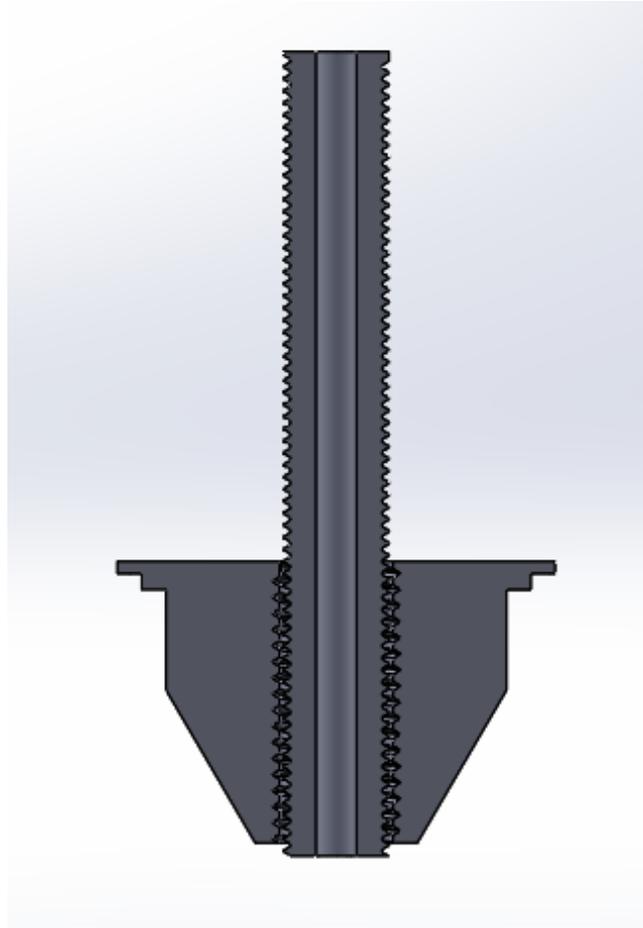


FIGURE 3.8 – Emplacement du goujon dans la partie intérieure de la buse.

Le goujon, clairement visible au centre de la buse (figure 3.6), s'étend verticalement à travers toute la longueur de la partie conique interne. Il est intégralement fileté, permettant un ajustement précis de sa position verticale. Cela offre une capacité exceptionnelle de régler la distance entre la sortie du métal fondu et le point d'impact avec le flux de gaz, impactant directement la granulométrie et la dispersion des particules de métal.

Une distance plus grande permet un refroidissement plus prolongé et une dispersion plus large des particules, tandis qu'une distance réduite produit une dispersion plus fine et rapide.

3.3.2 La partie extérieure de la buse

Tout comme la partie intérieure, La paroi de la buse présente une forme conique qui se rétrécit vers le bas. Cette forme aide à concentrer et diriger le flux de gaz vers la sortie de la buse, optimisant ainsi l'efficacité de l'atomisation (figure 3.8).

Un orifice circulaire et parallèle est visible sur le côté de la buse, servant d'entrée pour le gaz d'atomisation. Cette entrée est positionnée de manière tangentielle par rapport à la paroi interne de la buse, ce qui favorise la création d'un mouvement de gaz en spirale ou turbillon

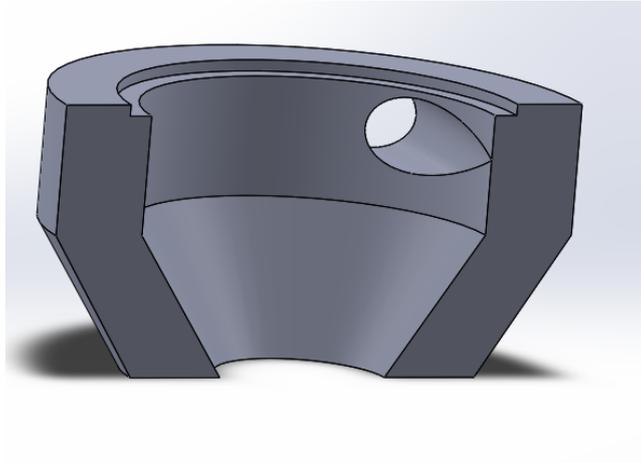


FIGURE 3.9 – Coupe transversale de la partie extérieure de la buse.

à l'intérieur de la buse. Ce mouvement turbulent joue un rôle crucial dans l'atomisation du métal fondu en augmentant la dispersion et le mélange du métal avec le gaz. Cette image en vue de haut offre une perspective différente de la conception de la buse, montrant clairement la disposition des différentes sections et des entrées de gaz.

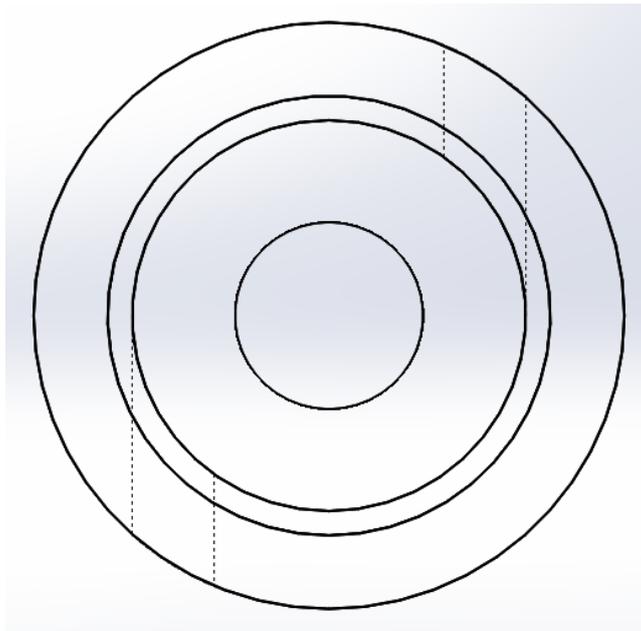


FIGURE 3.10 – représentation graphique en vue de haut.

3.3.3 Calcul de la vitesse des gouttelettes

Pour déterminer les dimensions de la chambre d'atomisation nous devons savoir la vitesse des gouttelettes après désintégration. La figure ci-dessous montre la désintégration du liquide par l'air et les composantes des vitesses du métal, de l'air et du mélange.

Pour cela on applique le principe de conservation de la quantité de mouvement qui donne aux points d'impact :

$$\text{Impulsion initiale (métal liquide)} + \text{Impulsion du gaz} = \text{Impulsion finale.}$$

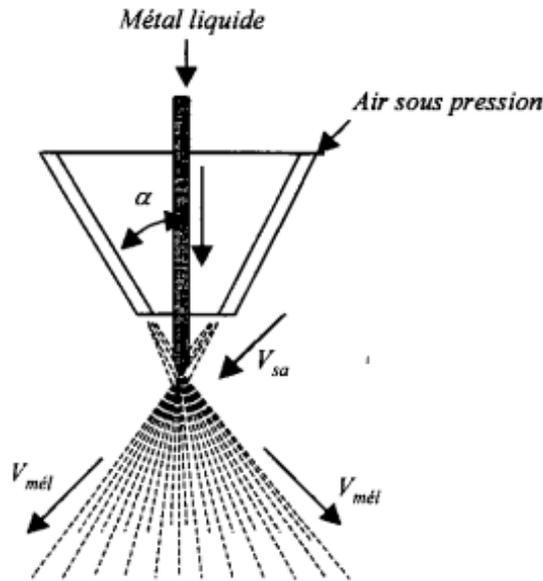


FIGURE 3.11 – Pulvérisation du métal liquide par le gaz atomiseur..

La vitesse du mélange selon l'axe vertical z :

$$A_a V_{sa} \cos \alpha + A_l V_l = (A_a + A_l) V_{m\acute{e}tz} \quad (3.9)$$

d'où

$$V_{m\acute{e}tz} = \frac{A_a V_{sa} \cos \alpha + A_l V_l}{A_a + A_l} \quad (3.10)$$

Avec :

- A_a : débit massique du gaz,
- V_{sa} : vitesse de l'air à la sortie de la buse,
- A_l : débit massique du liquide,
- V_l : vitesse du métal liquide.

Selon l'axe horizontal on a :

$$A_a V_{sa} \sin \alpha = (A_a + A_l) V_{m\acute{e}tx} \quad (3.11)$$

D'où :

$$V_{m\acute{e}tx} = \frac{A_a V_{sa} \sin \alpha}{A_a + A_l} \quad (3.12)$$

Supposons que le cône conserve l'angle après le choc ; il se forme un cône sur lequel des particules sont amenées avec une vitesse $V_{m\acute{e}t}$. Ainsi :

$$V_{m\acute{e}t} = \sqrt{V_{m\acute{e}tx}^2 + V_{m\acute{e}tz}^2} \quad (3.13)$$

Et finalement, la vitesse totale du métal est donnée par :

$$V_{m\acute{e}t} = \left((A_a V_{sa} \cos \alpha + A_l V_l)^2 + (A_a V_{sa} \sin \alpha)^2 \right)^{1/2} \quad (3.14)$$

$$V_{m\acute{e}t} = \left(\left(\frac{A_a V_{sa} \cos \alpha + A_l V_l}{A_a + A_l} \right)^2 + \left(\frac{A_a V_{sa} \sin \alpha}{A_a + A_l} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (3.15)$$

3.4 Conception de la chambre d'atomisation

La chambre est fabriquée à partir d'une citerne d'eau verticale en acier galvanisé, choisie pour sa robustesse et sa résistance à la corrosion. Les dimensions de la chambre sont soigneusement calculées pour fournir un espace suffisant pour une expansion adéquate des particules métalliques tout en permettant un refroidissement efficace.

Calcul des dimensions de la chambre d'atomisation (rayon et hauteur) Ces dimensions sont fonction du temps de solidification, de la vitesse des gouttelettes et de l'angle du cône α . Les équations donnant le rayon et la hauteur utile (entre le point d'impact liquide - gaz et le point d'impact particule - paroi juste après solidification) de la chambre d'atomisation sont les suivantes :

$$R = V_{\text{mél}} t_{\text{sol}} \sin \alpha \quad (3.16)$$

$$H = V_{\text{mél}} t_{\text{sol}} \cos \alpha \quad (3.17)$$

La hauteur globale de la chambre est de 1.8 mètres, avec un diamètre de 0.9 mètre, offrant ainsi un volume optimal pour le traitement des particules.

Pour faciliter l'accessibilité et la maintenance, j'ai intégré des fenêtres d'accès dans la conception de la chambre.

Position	Fonction
Fenêtre supérieure	Manipulation et remplacement de la buse
Fenêtre inférieure	Récupération de la poudre
Fenêtre en verre	Surveillance du processus

TABLE 3.5 – Fonctionnalité des Fenêtres d'Accès

Les joints des fenêtres sont renforcés avec du silicone ou un polymère d'étanchéité pour garantir une isolation complète et maintenir l'intégrité de l'environnement interne. Ces joints fournissent la flexibilité nécessaire pour supporter les variations thermiques sans compromettre l'étanchéité.

3.4.1 l'Assemblage de l'Entonnoir sur la Chambre d'Atomisation

L'entonnoir de coulée est conçu pour s'adapter précisément sur l'ouverture supérieure de la chambre d'atomisation, garantissant ainsi un passage fluide du métal. Les supports métalliques robustes aident à maintenir l'entonnoir en position verticale et assurent la stabilité de l'ensemble pendant l'opération.

Des supports structuraux sont utilisés pour fixer solidement l'ensemble de l'atomiseur au mur. Cette méthode de fixation non seulement optimise l'espace au sol mais augmente également la sécurité en stabilisant l'atomiseur pendant le fonctionnement, réduisant ainsi les risques de mouvement ou de basculement.

3.5 Conception du cyclone

Même si l'entraînement du solide peut être considérablement limité par l'agencement convenable d'une zone de désengagement, il convient cependant de prévoir la mise en place d'un cyclone pour arrêter les particules les plus fines.

Calcul du cyclone

Les dimensions d'un cyclone standard sont représentées sur la figure ci-dessous.

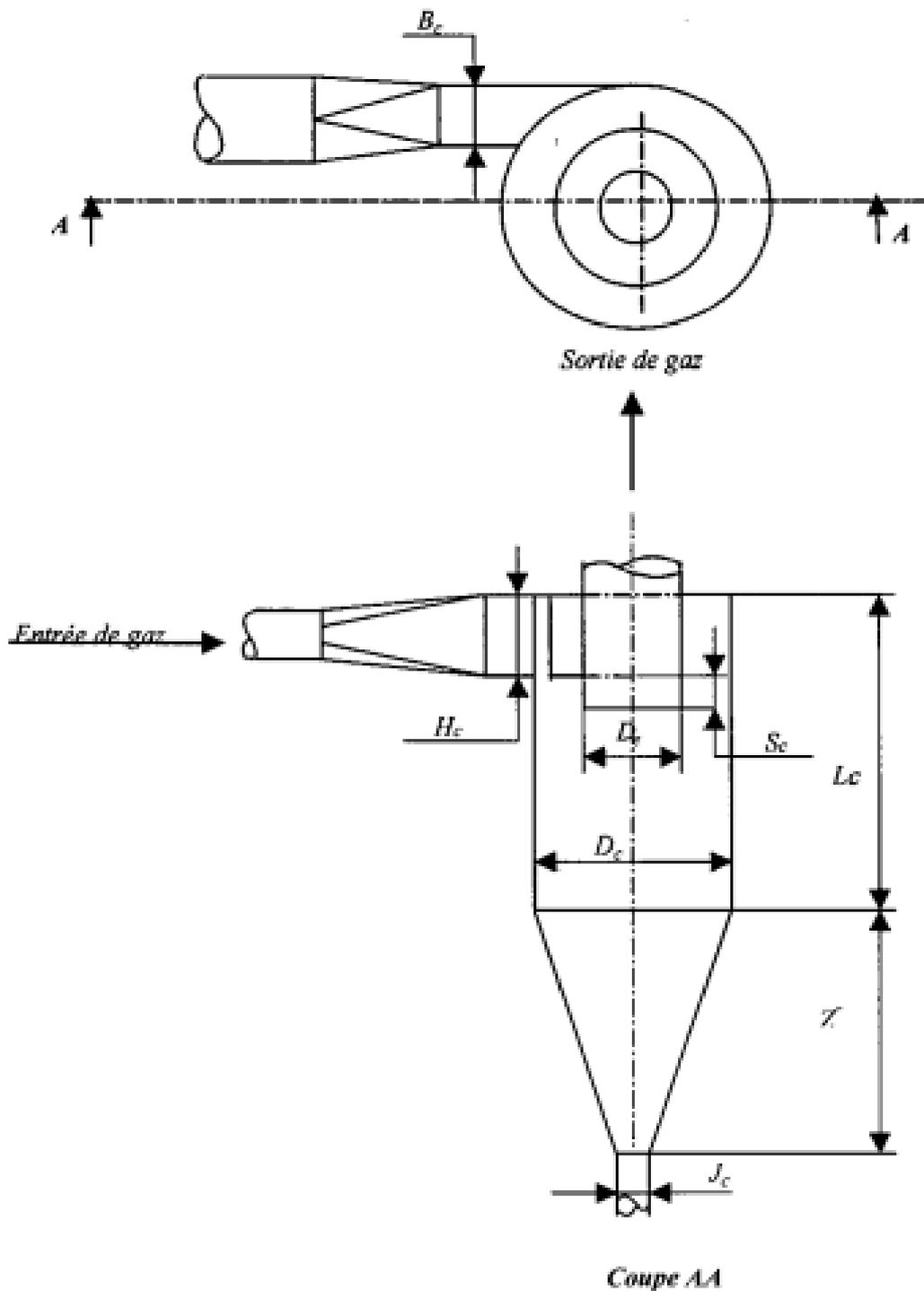


FIGURE 3.12 – Schéma d'un cyclone standard

$$V_c = \frac{Q_g}{B_c H_c} \quad (3.18)$$

Comme $H_c = 2B_c$, alors :

$$V_c = \frac{Q_g}{2B_c^2} \quad (3.19)$$

V_c et B_c étant reliées par l'équation donnant le seuil d'arrêt du cyclone, soit :

$$d_{\text{pmin}}^2 = \frac{-9\mu_g B_c}{5\pi V_c (\rho_s - \rho_g)} \quad (3.20)$$

et $B_c = \frac{D_c}{4}$, alors :

$$d_{\text{pmin}}^2 = \frac{9\mu_g D_c^2}{160\pi Q_g (\rho_s - \rho_g)} \quad (3.21)$$

$$D_c = \left[\frac{16\pi Q_g (\rho_s - \rho_g) d_{\text{pmin}}^2}{0.9\mu_g} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3.22)$$

D_c étant la principale dimension, toutes les autres dimensions du cyclone sont calculées comme suit :

$$B_c = \frac{D_c}{4} \quad (3.23)$$

$$D_c = \frac{H_c}{2} = 2D_c \quad (3.24)$$

$$L_c = Z_c = 2D_c \quad (3.25)$$

$$S_c = \frac{D_c}{8} \quad (3.26)$$

$$J_c = B_c \quad (3.27)$$

Chapitre 4

Mise en service de l'atomiseur et élaboration de la poudre

4.1 Introduction

La mise en point de l'atomiseur dans mon projet visait à assurer un fonctionnement optimal en validant les performances du four à creuset, spécifiquement conçu pour fondre l'aluminium. Ce four utilise un mélange d'oxygène et de méthane pour chauffer l'aluminium recyclé, initialement sous forme de canettes, à une température contrôlée entre 700 et 800°C. L'objectif principal de cette étude est de produire des poudres d'aluminium en utilisant l'atomisation par gaz, sans approfondir l'influence des paramètres d'atomisation sur la qualité des poudres obtenues.

4.2 Elaboration de la poudre

4.2.1 Matériaux utilisés

L'aluminium a été choisi pour les études sur l'atomisation en raison de sa disponibilité, de son coût abordable, et de sa facilité de fusion. De plus, l'aluminium est largement utilisé dans de nombreuses industries, ce qui rend la recherche sur son atomisation pertinente pour des applications réelles. Sa faible viscosité et sa bonne fluidité à l'état fondu (**Table 4.1**) facilitent également l'atomisation, permettant d'obtenir des particules fines et homogènes pour des études granulométriques.

Caractéristiques	Valeurs à 500°C
Masse volumique (g/cm ³)	2.3
Tension superficielle (N/m)	0.86
Viscosité (mPa.s)	1.2
Capacité thermique massique (J/g.K)	1.09

TABLE 4.1 – Caractéristiques physiques de l'aluminium à 500°C [3]

4.2.2 Déroutement des essais

Les essais initiaux ont été réalisés sous différentes conditions d'atomisation afin de valider la capacité de l'atomiseur à produire des poudres d'aluminium. Après avoir porté une charge de 2 kg d'aluminium à une température de chauffage contrôlée, manuellement surveillée pour atteindre une homogénéisation complète de la masse en fusion, la coulée de métal liquide a été réalisée à travers un entonnoir adapté à l'atomiseur. L'entonnoir est équipé d'un goujon de diamètre variable (2, 3, 5), permettant un contrôle précis du débit de métal.

Cependant, les premiers essais n'ont pas été couronnés de succès, car le flux de gaz argon utilisé à haute pression n'a pas réussi à désintégrer le métal liquide en fines particules. Les résultats ont montré une accumulation de métal fondu au fond de la chambre d'atomisation, sans formation de poudre, indiquant que le flux de gaz n'était ni suffisamment puissant ni correctement orienté.

En réponse à ces résultats décevants, une révision complète de la conception de la buse a été entreprise. Les modifications apportées incluaient l'optimisation de la géométrie interne de la buse pour améliorer l'interaction entre le flux de gaz et le métal liquide, en alignant plus précisément le jet de gaz avec la sortie de métal. La nouvelle buse a été fabriquée selon cette conception révisée et installée pour des essais ultérieurs.

Avec la nouvelle buse en place, les essais ont démontré une nette amélioration. La désintégration du liquide a été obtenue par l'argon avec succès, grâce à un jet de gaz amélioré qui a généré un flux turbulent capable de pulvériser le métal fondu en fines particules sphériques. Le système de buse révisé a permis de centrer le flux de gaz à l'axe de la buse, optimisant ainsi la dispersion du métal liquide.

La désintégration du liquide est obtenue par l'argon. Celui-ci arrive à partir d'une bouteille de gaz dont la capacité est de 50 litres se trouve sous une pression de 150 bars, assurant l'alimentation en argon durant toute la période d'atomisation. La pression dans la bouteille est indiquée par un manomètre placé avant le régulateur de pression. Le but de ce montage est de connaître la pression P_r dans le réservoir et de régler la pression de pulvérisation P_t telle que $P_p < P_t$.

L'air est également introduit dans la buse par une vanne connectée au régulateur de pression et aux conduits d'alimentation, permettant de maintenir un apport constant d'air parallèle à l'axe de la buse. L'orientation des conduits a été modifiée pour générer un flux de gaz tangent à la surface intérieure de la buse, créant ainsi un mouvement tourbillonnaire à la sortie de la buse. Cette configuration a permis d'obtenir une trajectoire hélicoïdale des gouttelettes après désintégration, favorisant un refroidissement plus uniforme et une solidification des particules sans adhérence aux parois de la chambre.

Finalement, les particules plus grosses tombent par gravité au fond de la chambre d'atomisation, tandis que les plus fines sont capturées par un cyclone situé à la sortie de la chambre, permettant une collecte efficace des particules pulvérisées.

4.2.3 Considérations Opérationnelles et Pratiques de Sécurité

Considérations Opérationnelles et Pratiques de Sécurité Lors de la mise en fonctionnement de l'atomiseur, j'ai accordé une importance primordiale à la sécurité, en particulier pendant la coulée du métal liquide, qui est une étape critique du processus d'atomisation. Étant donné les risques associés à la manipulation de métal en fusion, j'ai mis en place des mesures de sécurité rigoureuses pour me protéger et garantir un environnement de travail sécurisé.

Équipements de Protection Individuelle

Masques Respiratoires : Pour éviter l'inhalation de fumées toxiques et de particules fines produites lors de la fusion et de l'atomisation du métal, j'utilise un masque respiratoire à cartouches filtrantes. Ce masque est conçu pour filtrer les particules métalliques et les gaz nocifs tels que l'oxyde d'aluminium, assurant une atmosphère respirable pendant l'opération.

Lunettes de Sécurité : Je porte des lunettes de sécurité anti-éclaboussures avec des lentilles résistantes aux chocs et aux rayonnements UV. Ces lunettes protègent mes yeux des projections de métal et de la lumière intense générée par le métal en fusion, réduisant le risque de brûlures oculaires.



FIGURE 4.1 – Lunettes de sécurité pour la protection contre les éclaboussures et les rayonnements UV.

Gants Résistants à la Chaleur : J'utilise des gants spécifiques en matériaux résistants à des températures élevées, tels que gants en cuir traité avec des doublures isolantes. Ces gants protègent mes mains et avant-bras contre les éclaboussures de métal fondu et les surfaces chaudes lors de la manipulation des outils de coulée.

Chaussures de Sécurité Spécifiques : J'utilise des chaussures de sécurité avec embouts en acier et semelles résistantes à la chaleur pour protéger mes pieds contre les chutes d'objets lourds et les éclaboussures de métal fondu. Les semelles isolantes minimisent le risque de brûlures en cas de contact avec des surfaces chaudes.

Vêtements de Protection Adaptés : Je porte des vêtements de travail ignifugés, comprenant une veste et un pantalon longs en matériaux tels que le coton traité, pour une protection complète du corps. Ces vêtements sont conçus pour résister aux éclaboussures de métal fondu et aux rayonnements thermiques, tout en étant confortables pour des périodes de travail prolongées.



FIGURE 4.2 – Gants résistants à la chaleur pour la manipulation sécurisée du métal fondu.

4.3 Résultats obtenus

4.3.1 Résultats des premiers essais d'atomisation

Les premiers essais d'atomisation ont rencontré des difficultés techniques qui ont conduit à un échec du processus. Comme illustré dans la figure 4.3, le métal fondu n'a pas été correctement pulvérisé, ce qui a entravé la formation de particules métalliques. Au lieu d'une désintégration efficace, le métal s'est écoulé en continu au fond de la chambre d'atomisation, sans que le gaz ne parvienne à le fragmenter.



FIGURE 4.3 – Résultat obtenu avant la modification

Après une analyse approfondie des résultats, nous avons identifié plusieurs facteurs susceptibles d'avoir contribué à cet échec. L'un des principaux problèmes provenait de la buse d'atomisation, qui n'avait pas été usinée avec la précision nécessaire pour garantir un flux d'air optimal. La buse, élément clé dans l'atomisation, doit non seulement diriger l'air avec précision, mais aussi garantir que ce flux est suffisamment intense pour désintégrer le métal fondu en gouttelettes fines. Dans ce cas précis, le flux d'air n'était pas correctement orienté et manquait de force au point d'impact avec le métal fondu.

Cette mauvaise orientation du flux a empêché l'air de rencontrer et de fragmenter efficacement le métal en petites particules. Au lieu de cela, le métal fondu a continué à couler sans interruption, résultant en un échec du processus d'atomisation et, par conséquent, une absence de production de poudre. Cet échec a mis en lumière l'importance cruciale de la conception et de la fabrication précises de la buse dans le succès du procédé d'atomisation.

4.3.2 Résultats après modification de la buse

Suite à l'échec des premiers essais, une révision technique de la buse a été effectuée afin de corriger les problèmes identifiés. Nous avons procédé au réusinage de la buse, en veillant scrupuleusement à ce que celle-ci soit usinée conformément aux spécifications du plan initial, détaillé dans l'annexe du présent mémoire. Ce réusinage a permis de résoudre les défauts précédemment observés dans l'orientation du flux d'air.

Avec cette nouvelle buse, nous avons effectué un deuxième essai d'atomisation. Contrairement au premier essai, celui-ci a produit des résultats positifs. Comme le montre la figure 4.5, nous avons réussi à produire des particules métalliques. Cependant, ces particules sont restées relativement grossières, avec une taille moyenne d'environ 500 micromètres. En termes de morphologie, les particules présentent des formes irrégulières, ce qui indique que, bien que l'atomisation ait eu lieu, le processus nécessite encore des ajustements pour améliorer la finesse et la régularité des particules.



FIGURE 4.4 – Résultat obtenu après la modéficaction de la buse

L'obtention de particules métalliques à cette étape représente une avancée significative par rapport aux essais initiaux. Cependant, ces résultats soulignent également la nécessité d'une optimisation des paramètres d'atomisation pour améliorer la qualité des poudres produites, notamment en réduisant leur taille et en obtenant une meilleure uniformité des formes. Ces ajustements peuvent porter sur plusieurs facteurs, tels que l'angle d'atomisation, la température du métal fondu ou encore le débit de gaz et de métal.

4.3.3 Analyse des résultats

Après avoir procédé à la modification de la buse et effectué un second essai d'atomisation, nous avons observé des résultats encourageants, bien que les particules métalliques obtenues aient encore présenté des défauts notables. Les particules produites avaient une taille moyenne d'environ 500 micromètres, ce qui est encore trop grossier pour les applications visées. De plus, leur forme irrégulière suggère que le processus d'atomisation n'a pas été pleinement optimisé, malgré un démarrage correct du phénomène de pulvérisation du métal fondu.

Ces résultats nous indiquent clairement que pour obtenir des poudres métalliques de qualité plus fine et homogène, des ajustements supplémentaires sont nécessaires. Plusieurs paramètres critiques doivent être modifiés pour affiner le processus d'atomisation. En particulier, l'optimisation de l'angle d'atomisation pourrait améliorer la manière dont le gaz atomise le métal liquide. De même, le débit du métal fondu doit être finement contrôlé pour assurer une atomisation plus homogène et régulière.

Enfin, le degré de surfusion du métal, c'est-à-dire l'écart entre la température de fusion et celle à laquelle le métal est atomisé, joue un rôle déterminant dans la formation des gouttelettes métalliques. Une meilleure maîtrise de ce paramètre pourrait permettre d'obtenir des particules plus petites et mieux sphérifiées.

En ajustant soigneusement ces différents paramètres, nous devrions être en mesure de raffiner le processus d'atomisation et ainsi améliorer la finesse, la régularité et la qualité des poudres obtenues, les rapprochant des standards requis pour les applications industrielles modernes.

Conclusion générale

Ce mémoire a exploré la conception, la mise en service, et l'optimisation d'un atomiseur à gaz pour la production de poudres d'aluminium, en se concentrant sur les aspects techniques et pratiques sans se focaliser sur la caractérisation détaillée des poudres obtenues.

Le projet a mis en lumière les défis inhérents à la conception d'un équipement capable de transformer efficacement le métal fondu en particules fines, et a démontré l'importance d'une approche méthodique et d'une adaptation continue du processus.

Au terme de ce travail, des perspectives restent ouvertes. Elles concernent à la fois l'installation d'atomisation et les méthodes de caractérisation des poudres à élaborer

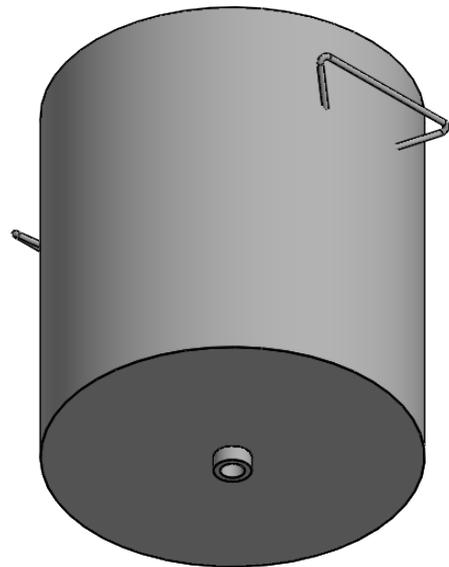
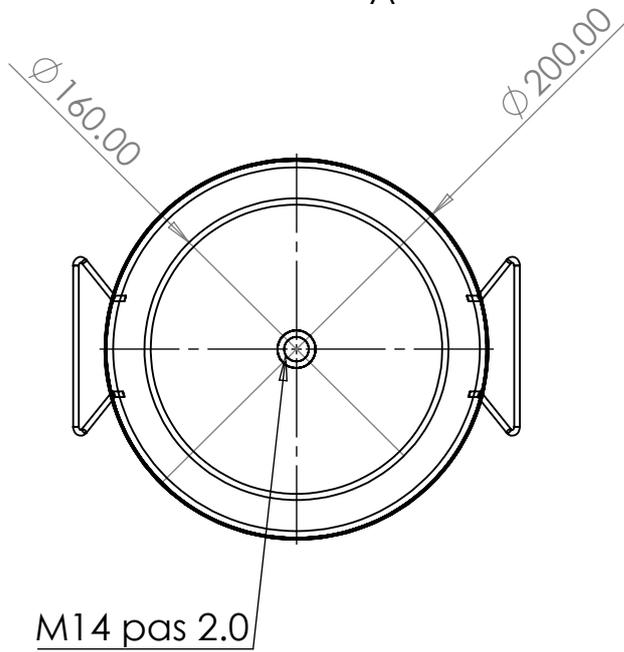
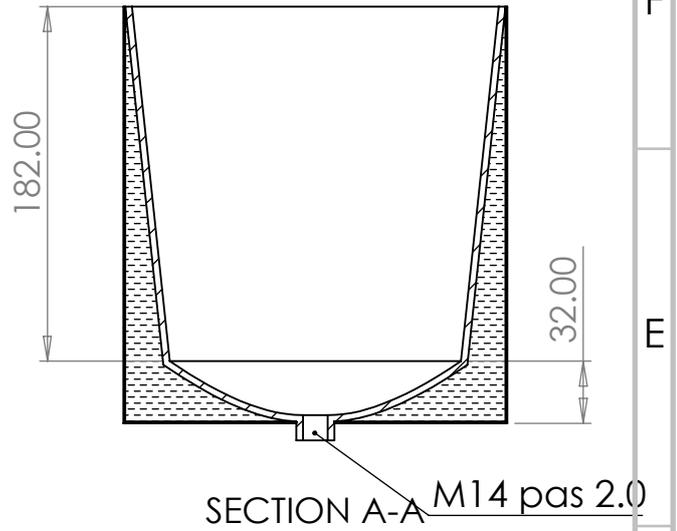
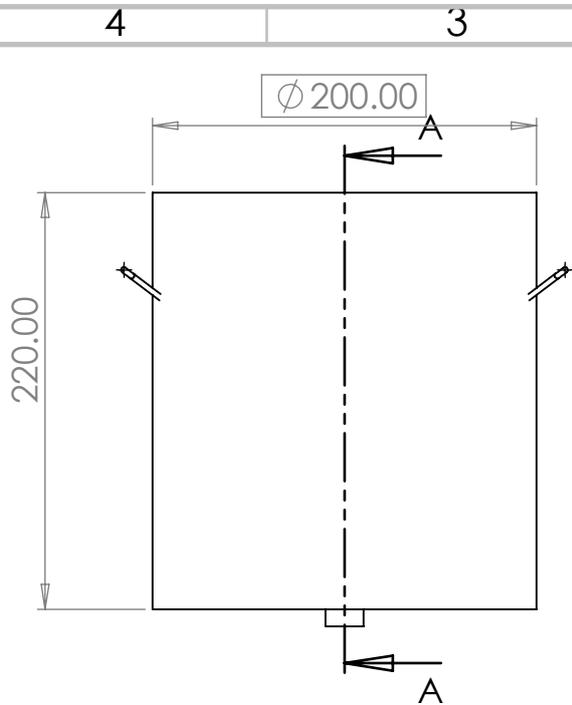
Parmi les perspectives éventuelles en vu de l'évolution de ce projet on peut citer :

- Optimisation des Composants : Améliorer la conception de la buse et le système de gestion des gaz pour maximiser l'efficacité de désintégration du métal et le rendement en poudre.
- Intégrer des systèmes d'automatisation et de contrôle en temps réel pour optimiser les paramètres d'atomisation et réduire les variations de production.
- Substituer le four actuel par un four à induction pour atteindre des températures élevées plus rapidement et traiter une gamme plus large de métaux et d'alliages.
- Concevoir un système de récupération et de recyclage des gaz inertes pour réduire les coûts d'exploitation et l'empreinte environnementale de l'installation.

Bibliographie

- [1] LUCAS L, D. Tension superficielle. 1984.
- [2] KLAR E and FESKO J, W. metals handbook of powder metallurgy. *metals handbook of powder metallurgy*, pages 25–35, 1982.
- [3] Prosper Moissonnier. *L'aluminium : ses propriétés, ses applications : historique, minerais, fabrication, propriétés, applications générales*. Gauthier-Villars, 1903.
- [4] S Grenier and F Allaire. Plasma atomization gives unique spherical powders. *Metal Powder Report*, 52(11) :34–37, 1997.
- [5] Erwin Wosch, Andrei Prikhodovski, Stephan Feldhaus, and Tarek El Gammal. Investigations on the rapid solidification of steel droplets in the plasma-rotating-electrode-process. *Steel research*, 68(6) :239–246, 1997.
- [6] SV Bogdanov. Prospects of production of granular composite materials by method of the plasma-centrifugal atomization. *Metallurgist*, 61(11) :1122–1129, 2018.
- [7] Andrew J Yule and John J Dunkley. Atomization of melts for powder production and spray deposition. (*No Title*), 1994.
- [8] GRANDZOL R, J and TALLMADGE J, A. effect of jet angle on water atomization. *the int.J. of powder met : powder tech*, 11(2) :103–116, 1975.
- [9] KIEFFER R and HOTOP W. Fer et aciers frittés. 1951.
- [10] R MEYER. Poudres métalliques. 1980.
- [11] CHAUSSIN C and HILLY G. élaboration des métaux. Tome2, 1984.
- [12] CHAMPAGNE B and ANGERS R. fabrication of powder by rotating electrode process. *power met , powder tech*, 16 :359–367, 1980.
- [13] E SINGER A, R. Journal of the institute of metallurgy. *Journal of the institute of metallurgy*, pages 100–185, 1972.
- [14] Ali Alagheband and Chris Brown. Plasma atomization goes commercial. *Metal Powder Report*, 53(11) :26–28, 1998.
- [15] GERMAN R, M. Powder metallurgy science. 1994.
- [16] ANDO T, TSAO C, Y, WAHLROOS J, and GRANT N, J. analysis and control of gas atomisation. *the int.J. of powder metallurgie*, 26(4) :311–317, 1990.
- [17] NUKIYAMA S and TANASAWA Y. experiments on the atomization of liquids. *reports 1-6 translated from Trans . soc.mech.ENG (JAP)*, 4–6, 1938.
- [18] LUBANSKA H. correlation of spray ring data for gas atomization of liquid metals. *MET*, 22(2) :45–49, 1970.
- [19] NICHIPORENKO CO, S and NAIDA YU, L. fashioning the type of spraying powder particles. 70(10), 1968.

Annexe I : Sous-ensembles de l'Atomiseur



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

ENTONNOIR DE COULEE

TITLE:

ENTONNOIR DE COULEE

DWG NO.

ATOMISEUR

A4

MATERIAL:

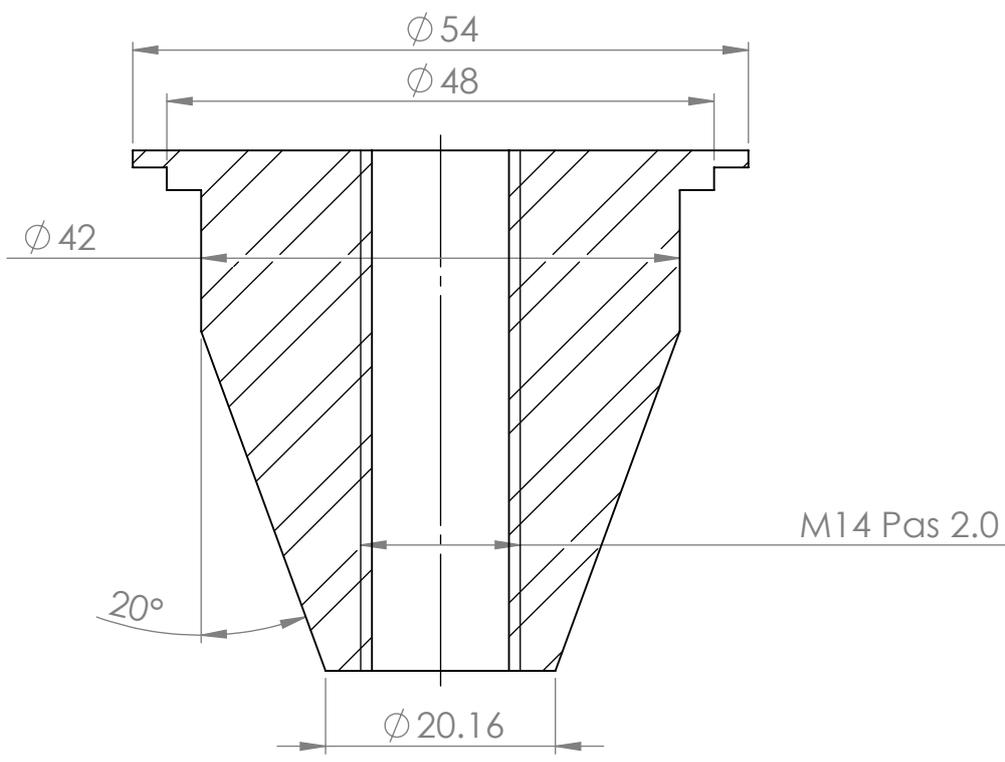
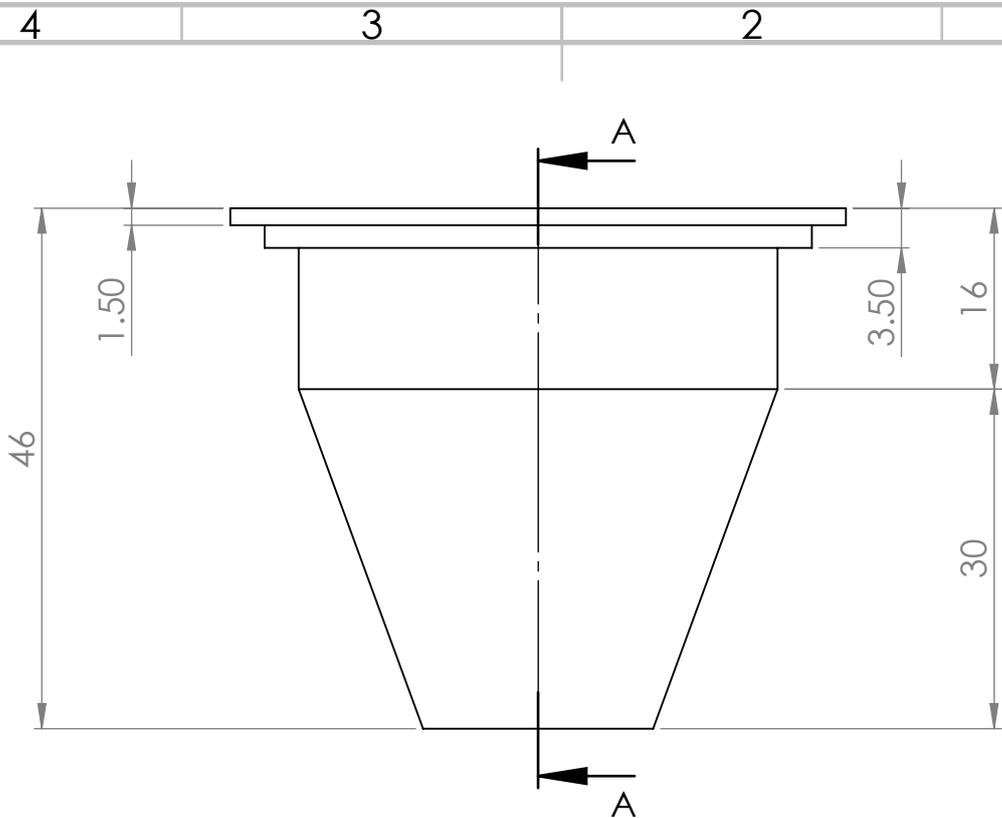
WEIGHT:

SCALE:1:4

SHEET 1 OF 1

A

A



COUPE A-A
ECHELLE 3 : 2

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES:
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

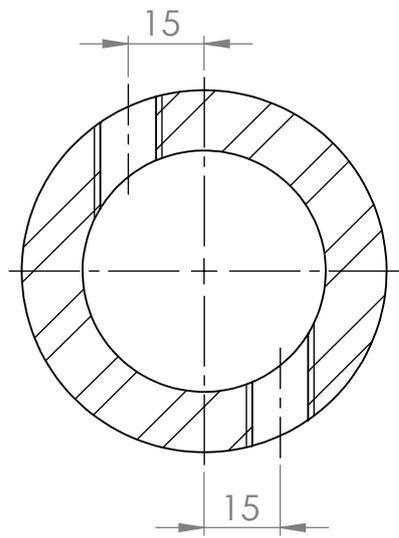
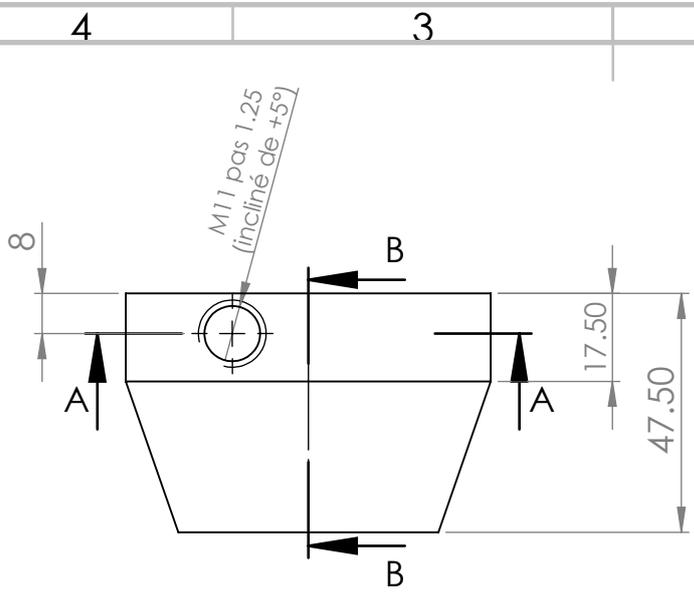
REVISION

	NOM	SIGNATURE	DATE
AUTEUR			
VERIF.			
APPR.			
FAB.			
QUAL.			

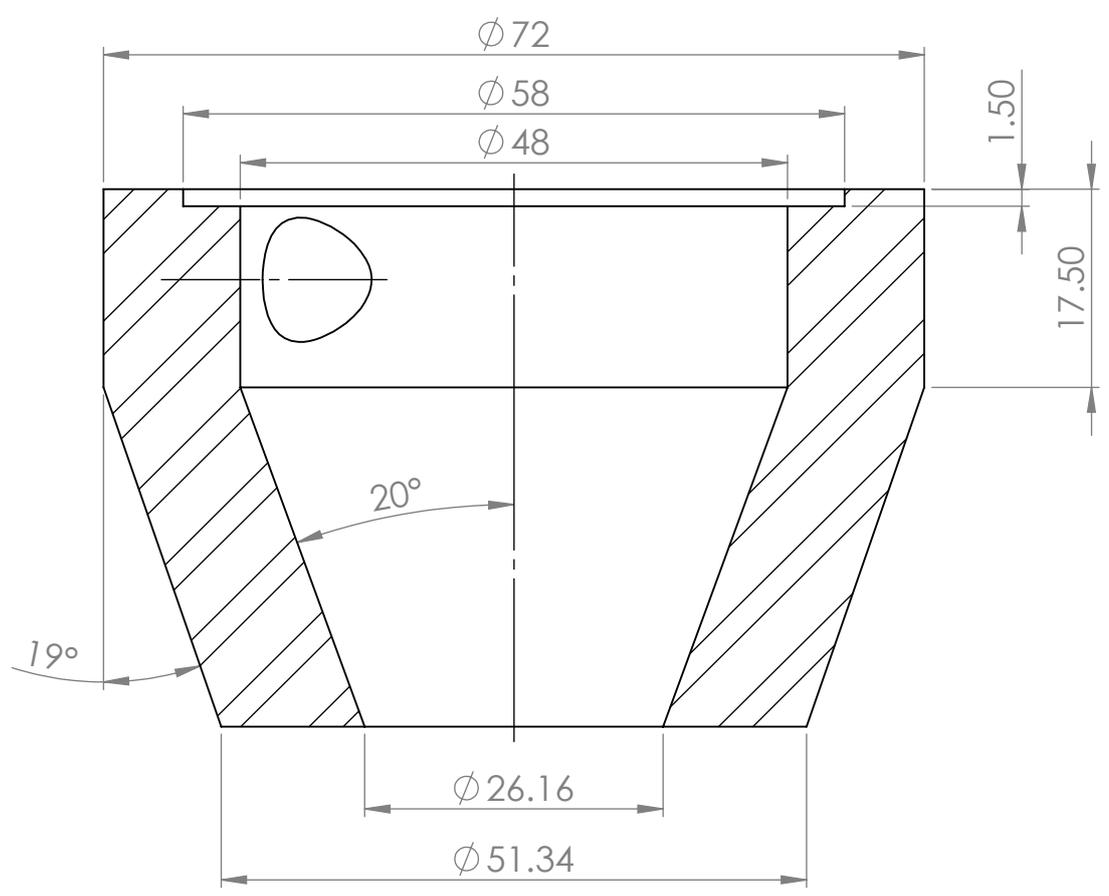
TITRE:	
No. DE PLAN	
MATERIAU:	
MASSE:	
ECHELLE:1:1	FEUILLE 1 SUR 1

Cone intérieur de la buse 20

A4



COUPE A-A



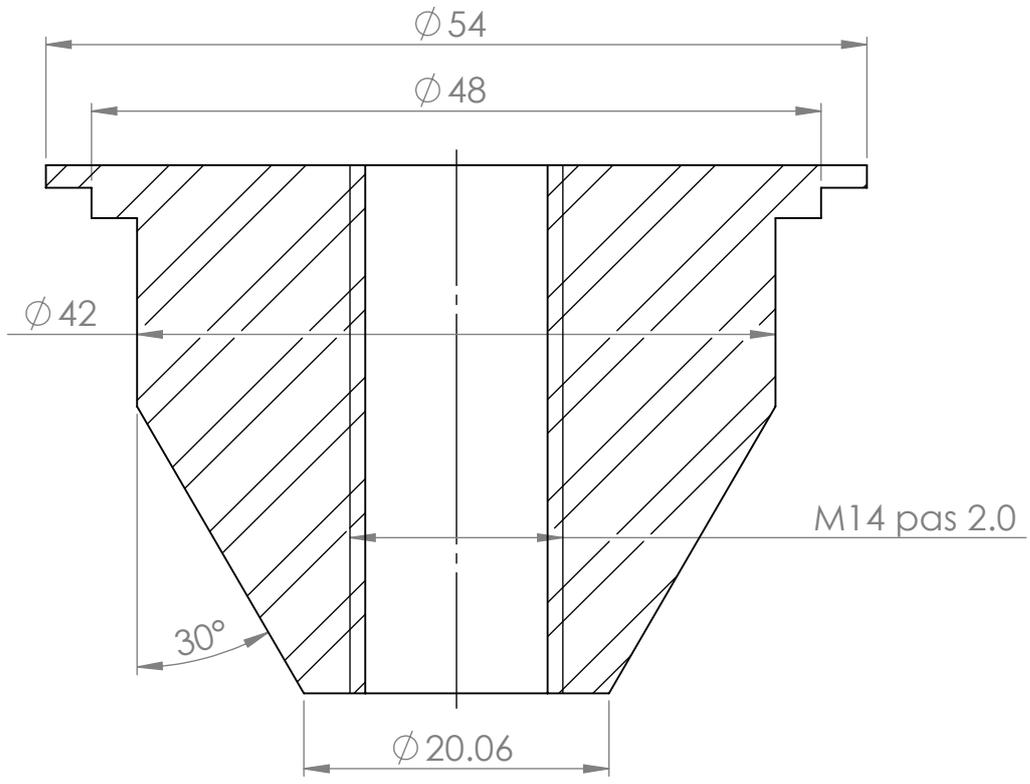
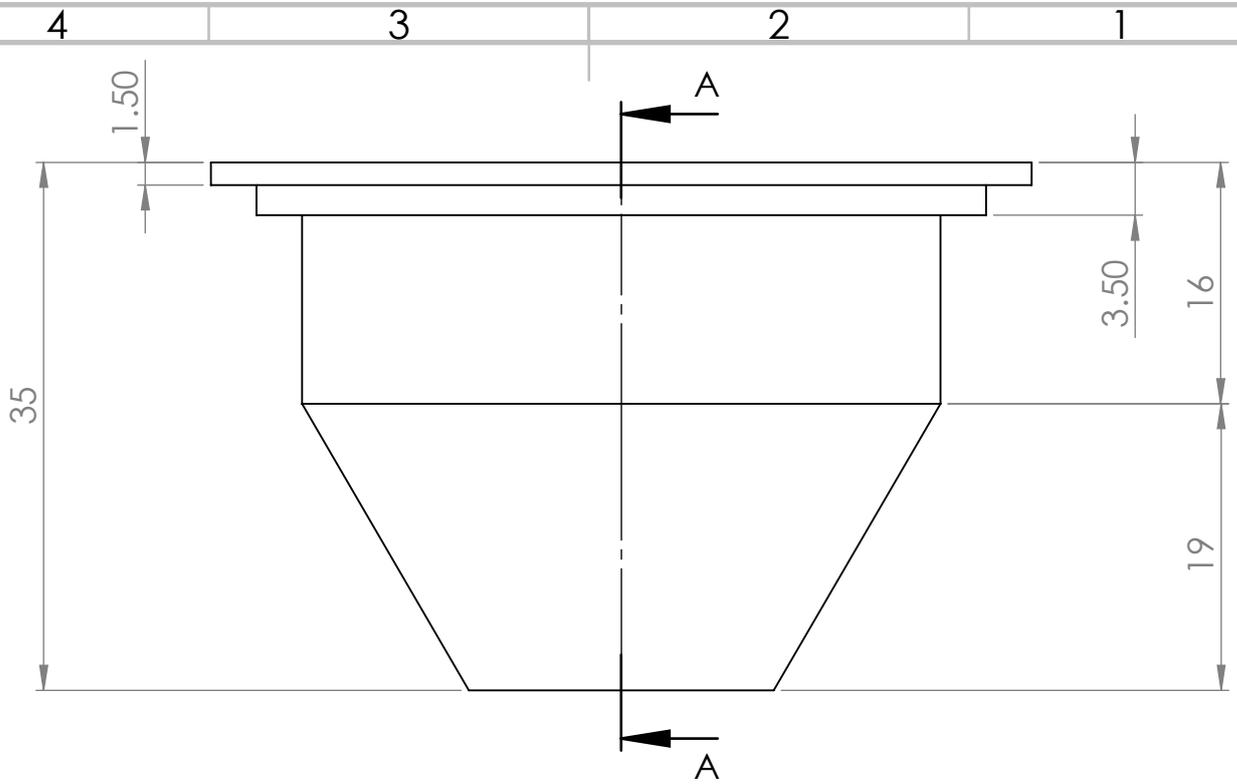
COUPE B-B
ECHELLE 3 : 2

SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:	FINITION:	CASSER LES ANGLES VIFS	NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION

NOM	SIGNATURE	DATE
AUTEUR		
VERIF.		
APPR.		
FAB.		
QUAL.		

TITRE:	
No. DE PLAN	
MATERIAU:	
MASSE:	

Cone extérieur de la buse 20



COUPE A-A
ECHELLE 2 : 1

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES:
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

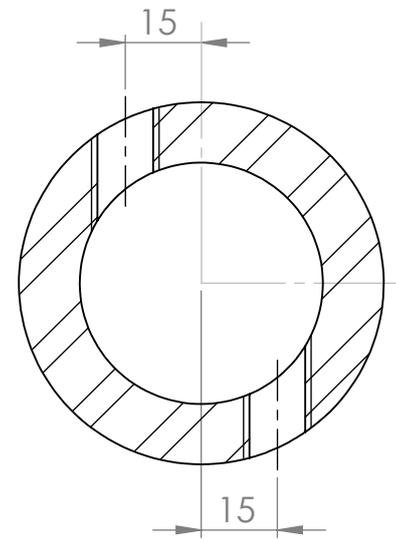
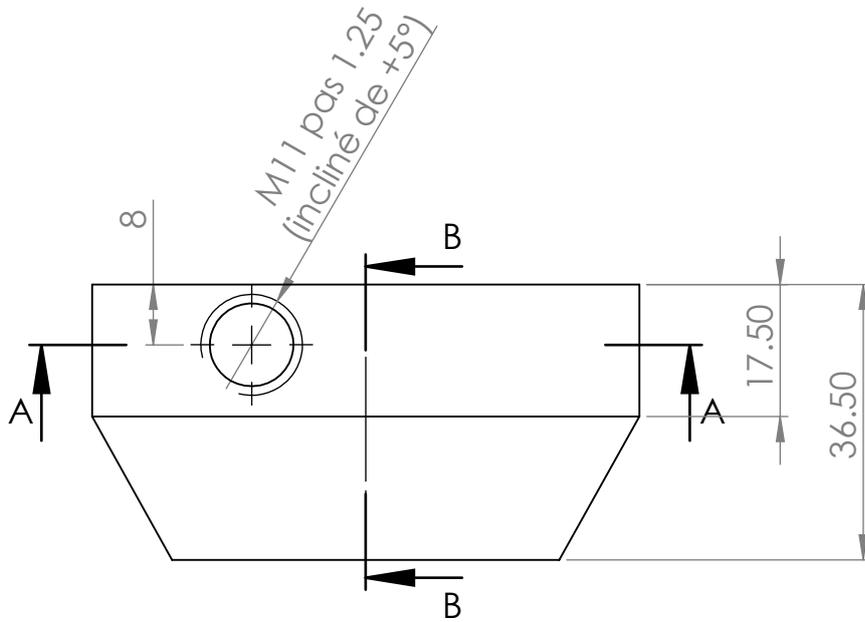
REVISION

	NOM	SIGNATURE	DATE
AUTEUR			
VERIF.			
APPR.			
FAB.			
QUAL.			

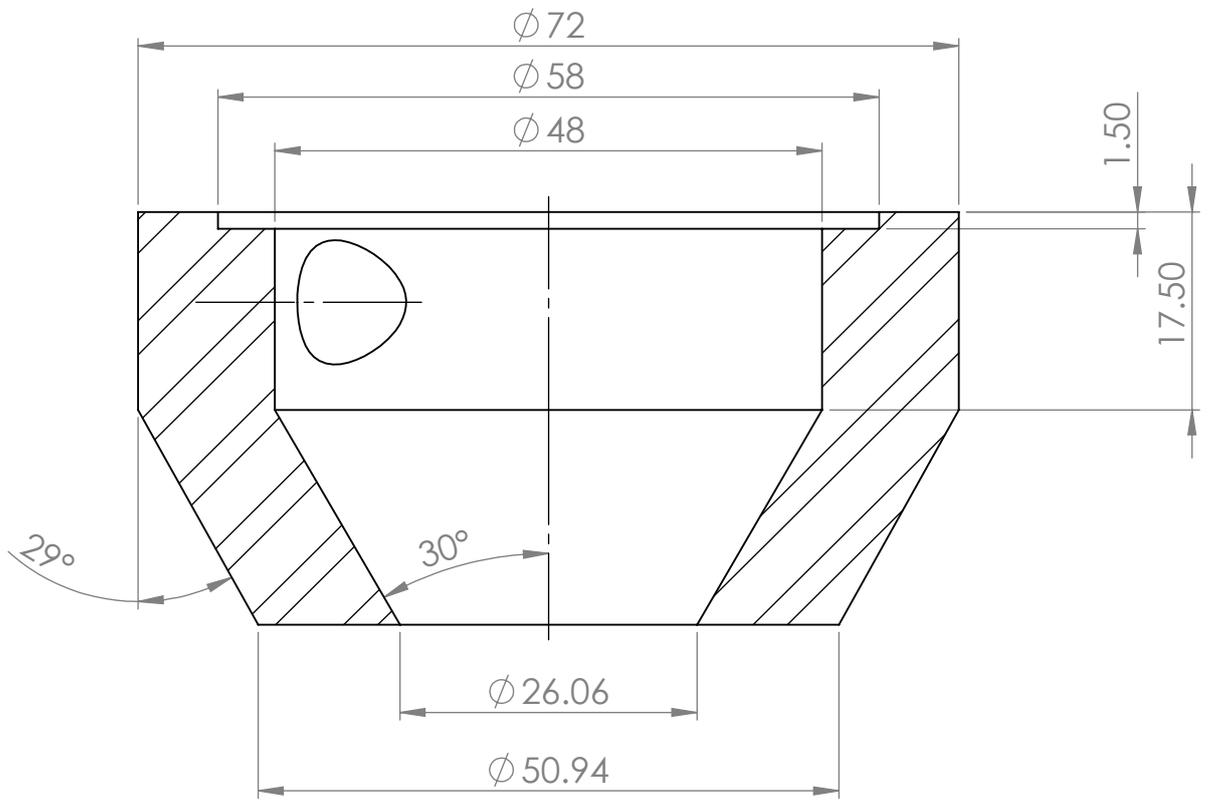
TITRE:	
No. DE PLAN	
Echelle: 1:1	
FEUILLE 1 SUR 1	

Cone intérieur de la buse 30

A4



COUPE A-A
ECHELLE 2 : 3



COUPE B-B
ECHELLE 3 : 2

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES:
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

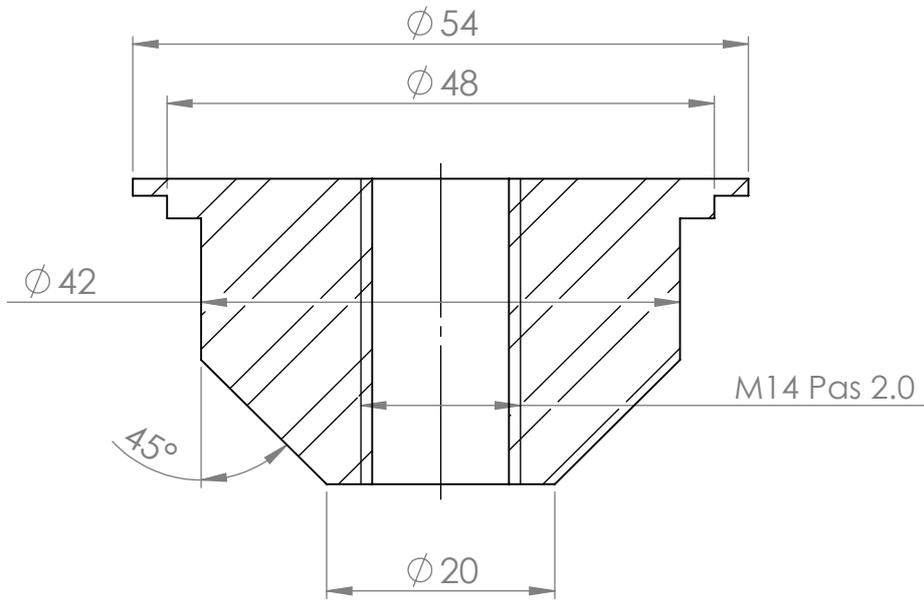
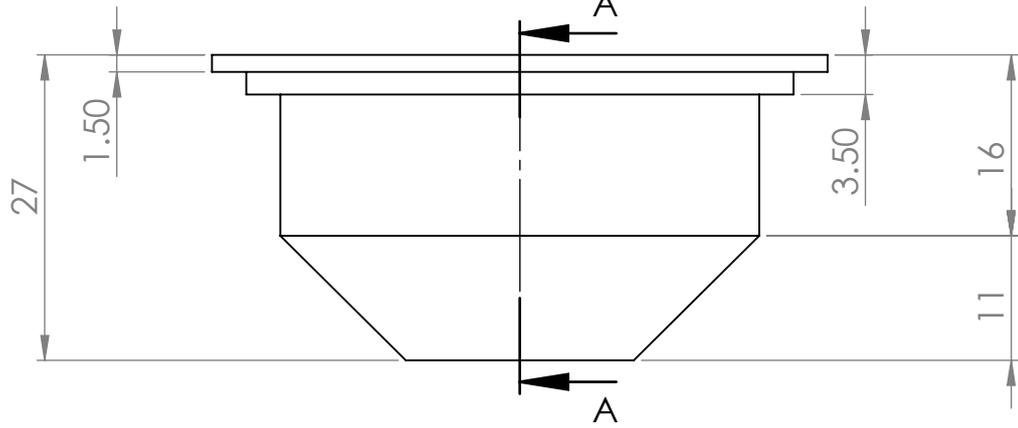
NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

NOM	SIGNATURE	DATE		
AUTEUR				
VERIF.				
APPR.				
FAB.				
QUAL.				
		MATERIAU:		
		MASSE:		

TITRE:	No. DE PLAN	
Cone extérieur de la buse 30		
ECHELLE:1:2		FEUILLE 1 SUR 1

A4



COUPE A-A
ECHELLE 3 : 2

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES:
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

	NOM	SIGNATURE	DATE
AUTEUR			
VERIF.			
APPR.			
FAB.			
QUAL.			

TITRE:

MATERIAU:

No. DE PLAN

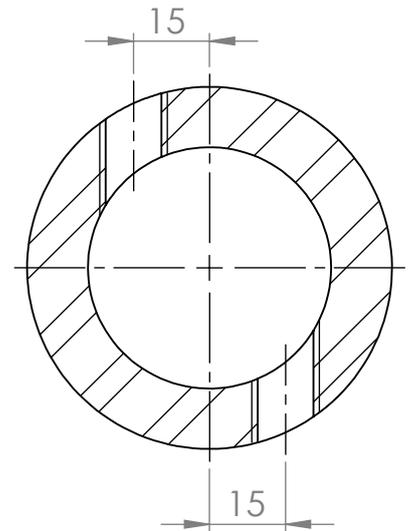
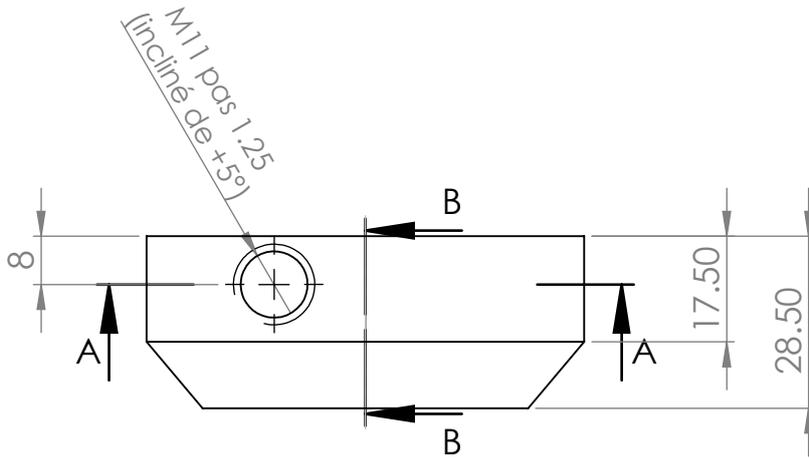
MASSE:

ECHELLE:1:1

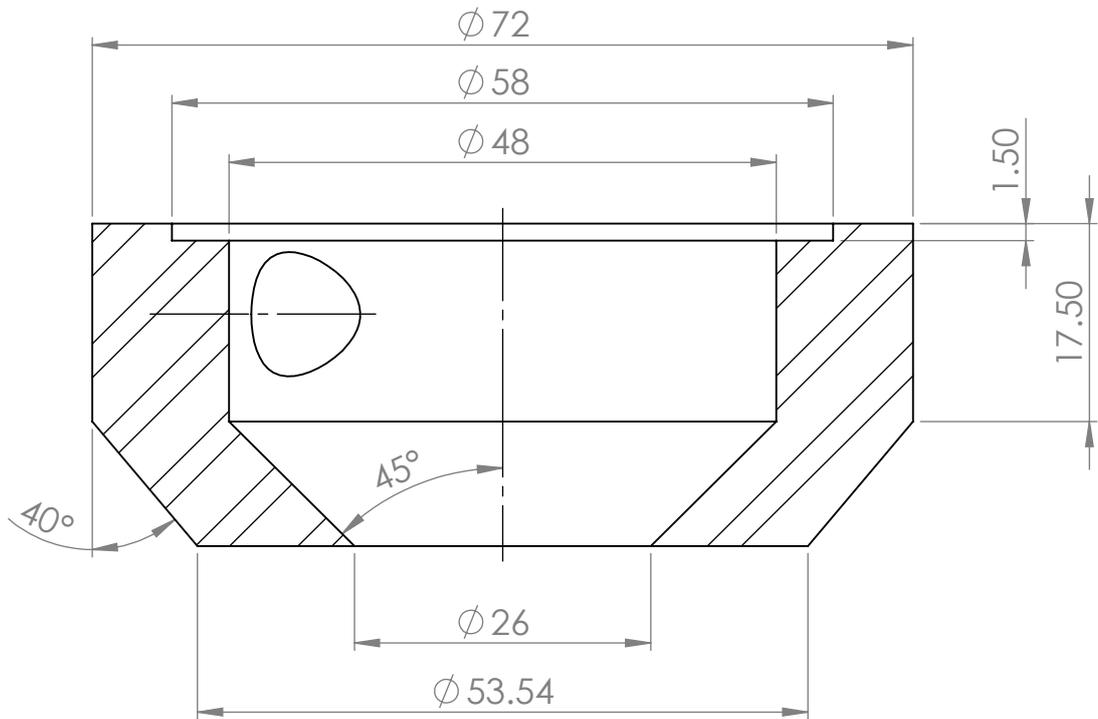
FEUILLE 1 SUR 1

Cone intérieur de la buse 45

A4



COUPE A-A
ECHELLE 2 : 3



COUPE B-B
ECHELLE 3 : 2

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES:
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

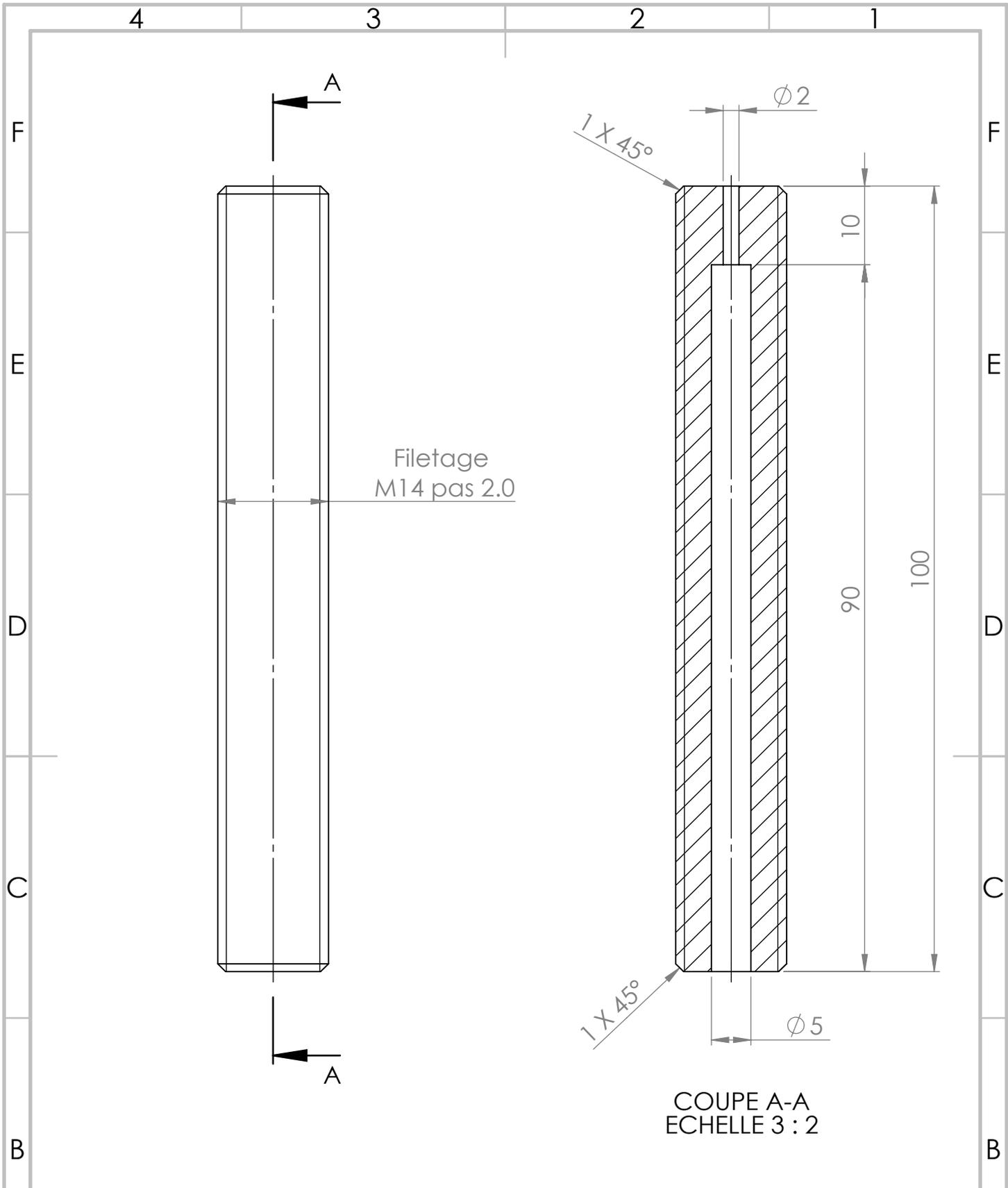
REVISION

NOM	SIGNATURE	DATE
AUTEUR		
VERIF.		
APPR.		
FAB.		
QUAL.		
MATERIAU:		
MASSE:		

TITRE:
No. DE PLAN
ECHELLE:1:2
FEUILLE 1 SUR 1

Cone extérieur de la buse 4.5

A4



Filetage
M14 pas 2.0

COUPE A-A
ECHELLE 3 : 2

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES:
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

	NOM	SIGNATURE	DATE	
AUTEUR				
VERIF.				
APPR.				
FAB.				
QUAL.				

TITRE:	
No. DE PLAN	A4
Tige percée 2	
MASSE:	ECHELLE:1:1
FEUILLE 1 SUR 1	

A

A

4 3 2 1

F

F

E

E

D

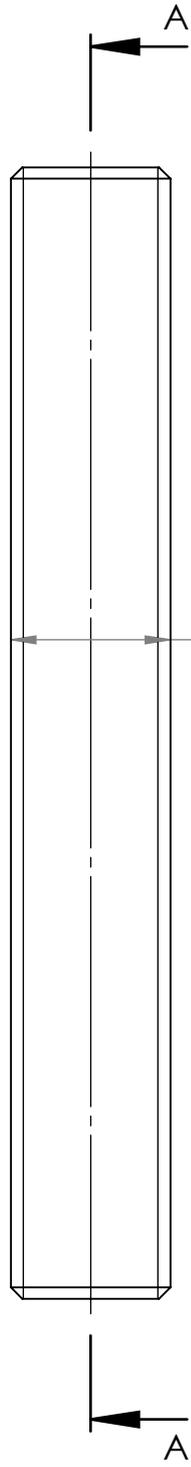
D

C

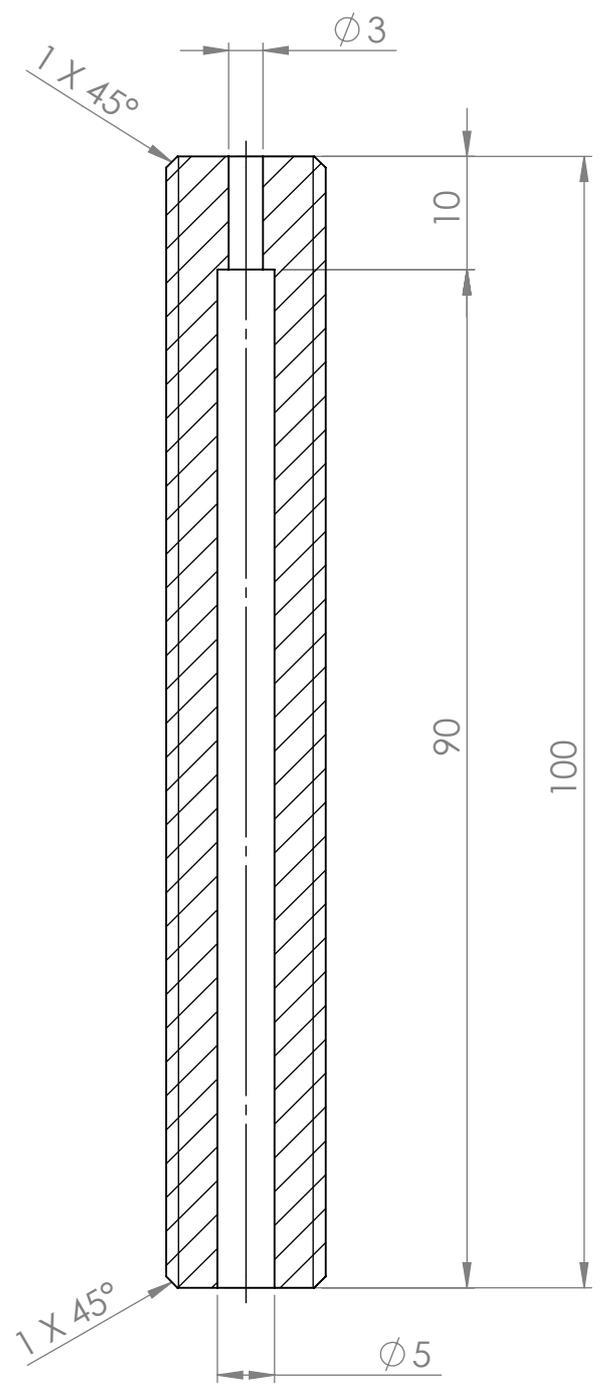
C

B

B



Filetage
M14 pas 2.0



COUPE A-A
ECHELLE 3 : 2

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES:
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

	NOM	SIGNATURE	DATE		
AUTEUR					
VERIF.					
APPR.					
FAB.					
QUAL.					
				MATERIAU:	
				MASSE:	

TITRE:			
No. DE PLAN		A4	
Tige percée 3			
ECHELLE:1:1		FEUILLE 1 SUR 1	

4 3 2 1

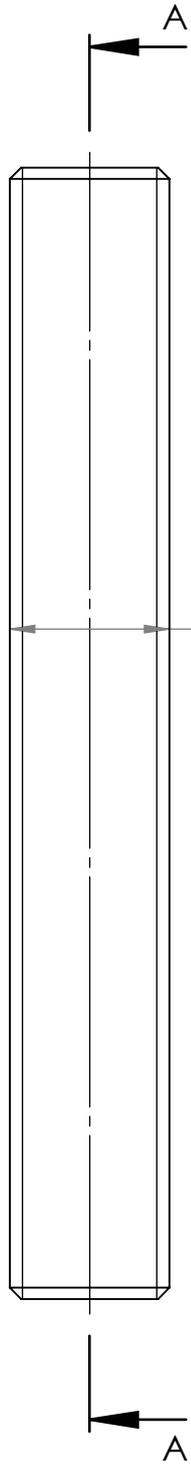
A

A

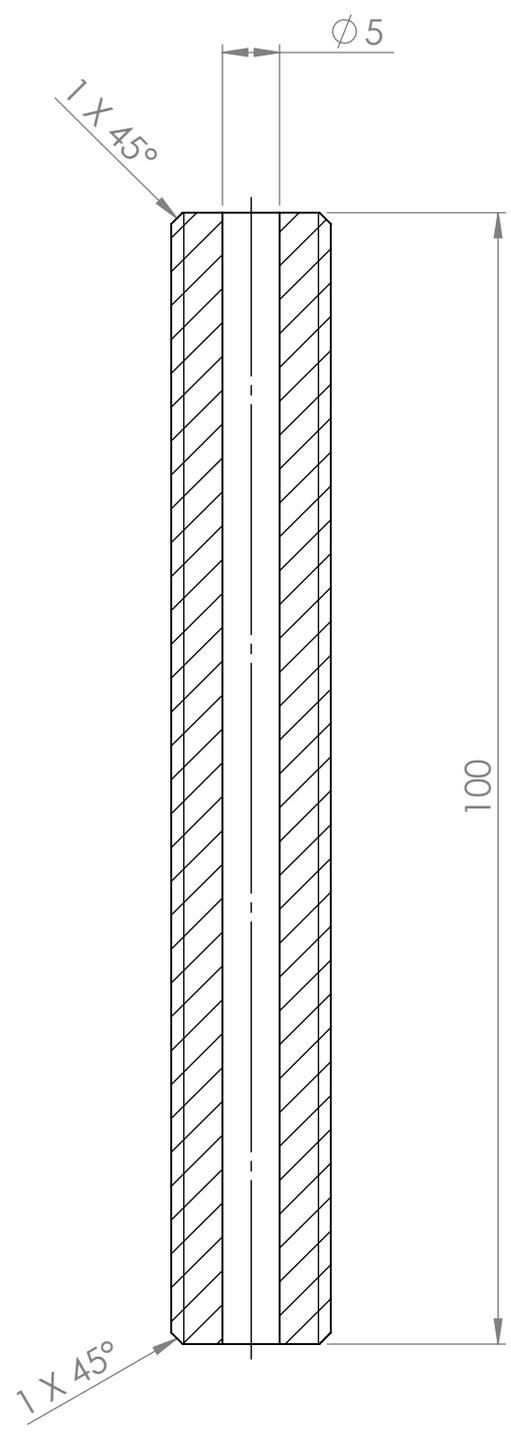
4 3 2 1

F
E
D
C
B

F
E
D
C
B



Filetage
M14 pas 2.0



COUPE A-A
ECHELLE 3 : 2

SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES:
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

CASSER LES
ANGLES VIFS

NE PAS CHANGER L'ECHELLE

REVISION

	NOM	SIGNATURE	DATE
AUTEUR			
VERIF.			
APPR.			
FAB.			
QUAL.			

TITRE:	
No. DE PLAN	
Tige percée 5	
MASSE:	
ECHELLE:1:1	
FEUILLE 1 SUR 1	

A

A

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

2

3

1

E

E

4

D

D

5

C

C

B

B

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

CYCLONE

VUE GENERALE DU CYCLONE

ATOMISEUR

A4

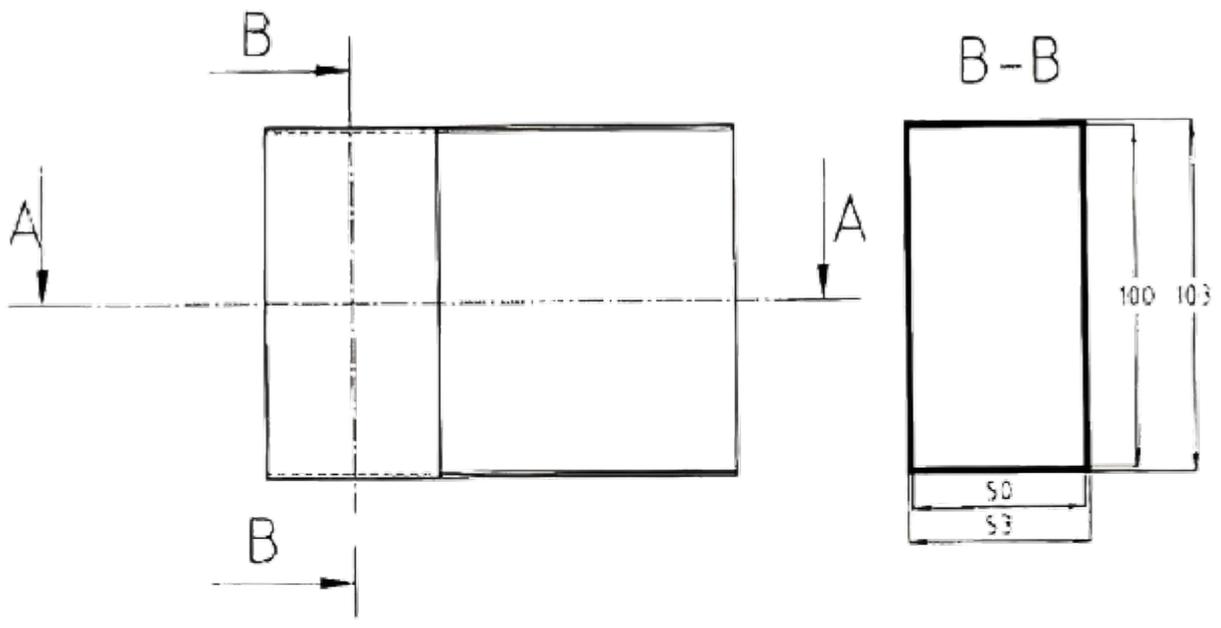
	NAME	SIGNATURE	DATE	
DRAWN	HANED WALID			
CHK'D				
APPV'D				
MFG				
Q.A				

TITLE:	VUE GENERALE DU CYCLONE		
DWG NO.	ATOMISEUR		A4
SCALE:1:6	SHEET 1 OF 1		

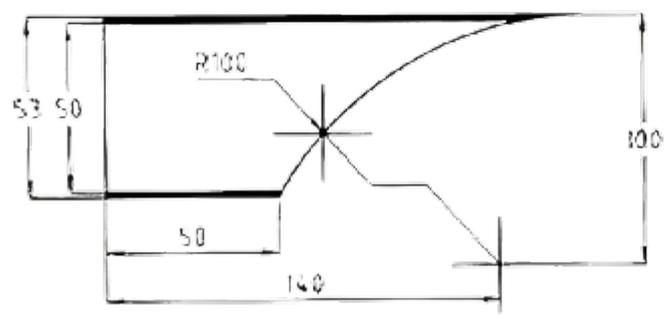
4 3 2 1

A

A



A-A



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
SURFACE FINISH:					CYCLONE Rep. 01	
TOLERANCES:					TITLE: CONDUITE D'ENTREE DU GAZ DANS LE CYCLONE	
LINEAR:					DWG NO.	
ANGULAR:					ATOMISEUR	
				MATERIAL:	A4	
				WEIGHT:	SCALE: 1:2	
					SHEET 1 OF 1	

F
E
D
C
B
A

F
E
D
C
B
A

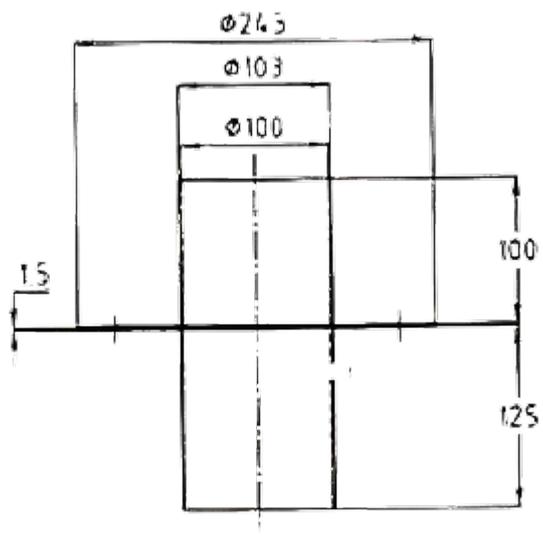
4 3 2 1

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

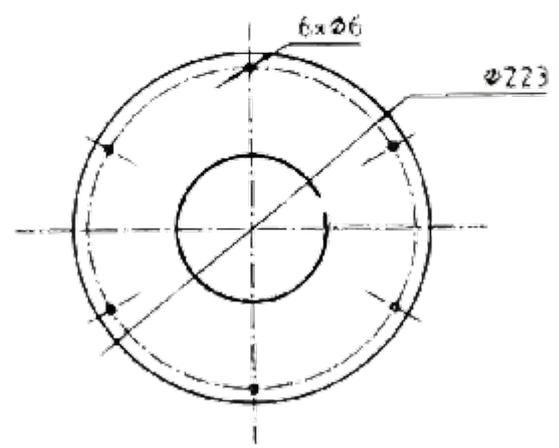


E

E

D

D



C

C

B

B

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

CYCLONE Rep. 02 et 03

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	HANED WALID		
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
Q.A			

TITLE:
**CHAPEAU D'ECHAPPEMENT DU
 GAZ**

MATERIAL:

DWG NO.

ATOMISEUR

A4

WEIGHT:

SCALE: 1:5

SHEET 1 OF 1

4 3 2 1

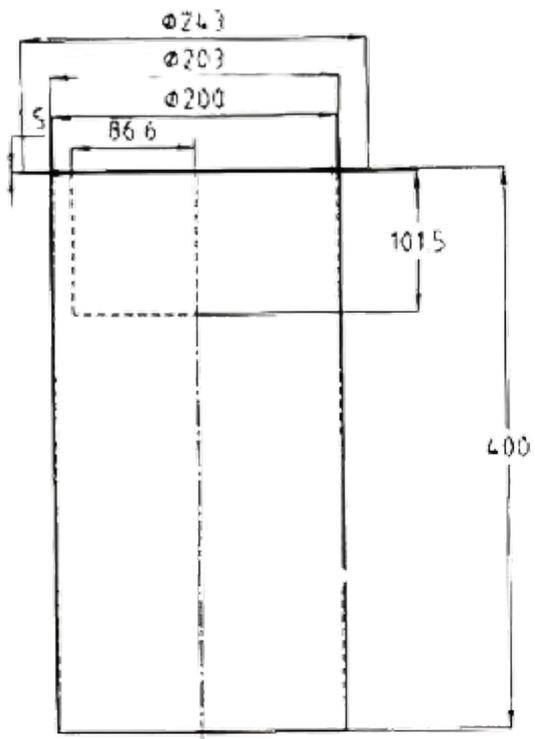
A

A

4 3 2 1

F

F

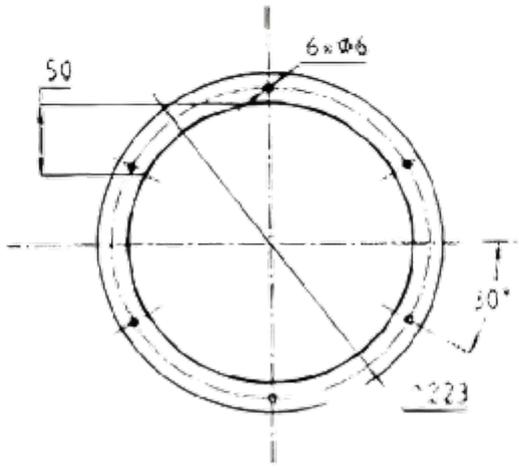


E

E

D

D



C

C

B

B

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEBURR AND BREAK SHARP EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

CYCLONE Rep. 04

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	HANED WALID		
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
Q.A			

TITLE:	PARTIE CYCLINDRIQUE DU CYCLONE	
DWG NO.	ATOMISEUR	A4
SCALE:	1:5	SHEET 1 OF 1

A

A

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

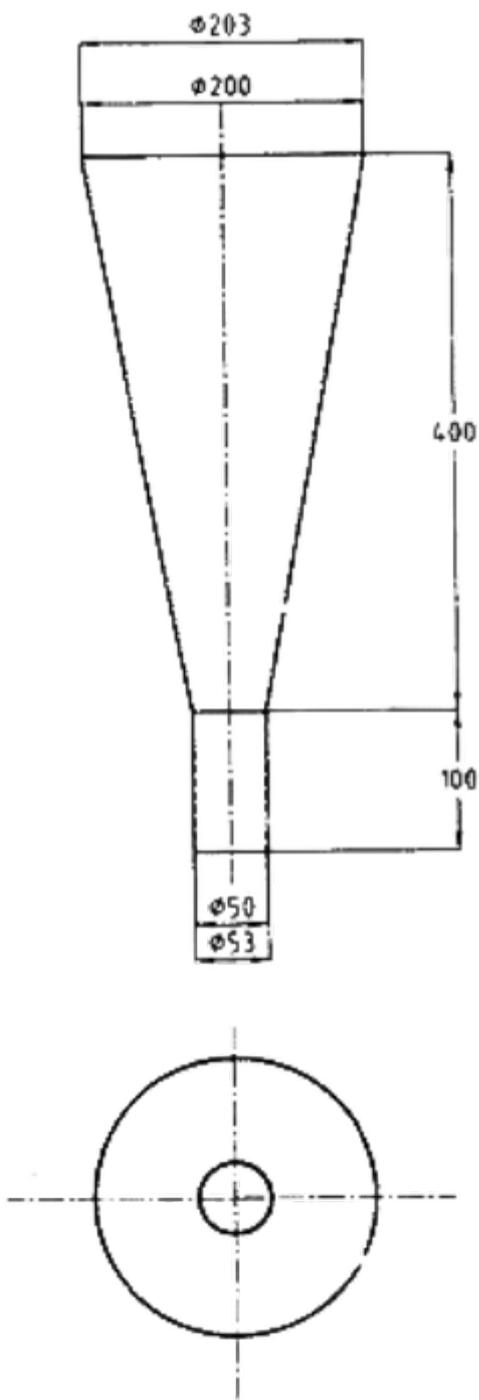
D

C

C

B

B



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
 DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
 SURFACE FINISH:
 TOLERANCES:
 LINEAR:
 ANGULAR:

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEBURR AND
 BREAK SHARP
 EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

CYCLONE Rep. 04

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	HANED WALID		
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
Q.A			

TITLE:

PARTIE CONIQUE DU CYCLONE

MATERIAL:

DWG NO.

ATOMISEUR

A4

WEIGHT:

SCALE: 1:5

SHEET 1 OF 1

4 3 2 1

A

A