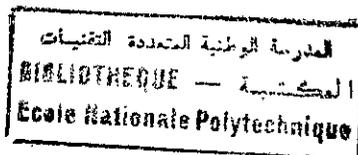


RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique
Département de Métallurgie



Thèse de Magister

Présentée par : A. BRITAH
Directeur de Thèse : A. KASSER

Thème

**ATOMISATION DE POUDRES MÉTALLIQUES :
ÉLABORATION ET CARACTÉRISATION**

Présentée le, 05 Juin 1999 devant le jury composé de:

Mr N. MESRATI	Maitre de Conférences	E.N.P	(Président)
Mr M. BOUABDELLAH	Maitre de Conférences	E.N.P	(Examineur)
Mr A. DAIMLLAH	Chargé de cours	E.N.P	(Examineur)
Mr M.L. DJEGHLAL	Chargé de cours	E.N.P	(Examineur)
Mr A. KASSER	Chargé de cours	E.N.P	(Rapporteur)
Mr M.A. BELOUHRANI	Chargé de cours	E.M.P	(Invité)

Remerciement

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire Génie des Matériaux – École Militaire Polytechnique sous la responsabilité de Monsieur A. KASSER, Chargé de cours à l'École Nationale Polytechnique, à qui j'exprime mes remerciements pour avoir accepté de diriger et de suivre cette étude avec bienveillance.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur K. NECIB, Chef du Laboratoire Génie des Matériaux – École Militaire Polytechnique, d'avoir contribué à l'aboutissement de cette étude; ses conseils, suggestions et critiques m'ont été très bénéfiques.

Que Monsieur N. MESRATI, Maître de conférences à l'École Nationale Polytechnique trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant ce Jury.

Que Messieurs M. BOUABDELLAH, M.L. DJEGHLAL, A. DAIMELLAH, respectivement Maître de conférences, Chargés de cours à l'École Nationale Polytechnique ainsi que M.A. BELOUHRANI, Chargé de cours à l'École Militaire Polytechnique trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude pour avoir accepté de participer à ce Jury de thèse.

J'exprime toute ma reconnaissance à Monsieur R. LAMARA Enseignant à L'U.E.R.-CFM/E.M.P pour sa contribution à la partie conception et à la disponibilité dont il a fait preuve à mon égard.

Un merci doit aussi être également adressé à mes collègues Enseignants-Chercheurs à l'École Militaire Polytechnique ; en particulier Messieurs A. GHENAIET, R. CHERIF, M. MEDJAOUI, A. LABED et A. BOUDOUKHA pour l'aide amicale qu'ils m'ont apporté tout le long de cette étude.

Mes remerciements vont également à Messieurs A. BELHADJ, Directeur de l'École Militaire Polytechnique, M. DAMOU, Directeur de la Recherche et de la Formation Post-Graduée/E.M.P, A YOUSNADJ Chef de l'U.E.R-MA/E.M.P et M.T. FARES Chef de l'U.E.R.-CFM/E.M.P.

Enfin, je ne saurais oublier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué grandement à l'aboutissement de cette étude ; en particulier Monsieur O. LOUATI.

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : MÉTHODES D'ÉLABORATION DES POUDRES MÉTALLIQUES	
I.1. Aperçu historique	2
I.2. Procédés d'élaboration des poudres métalliques	2
I.2.1. Procédés mécaniques	2
I.2.1.1. Broyage.....	2
I.2.1.2. Pulvérisation mécanique.....	3
I.2.2. Procédés Physico-chimiques	5
I.2.2.1. Réduction d'oxydes.....	5
I.2.2.2. Electrolyse.....	6
I.2.2.3. Dissociation des métaux carbonyle.....	6
I.3. Atomisation	6
I.3.1. Introduction.....	6
I.3.2. Atomisation à l'eau et à gaz.....	7
I.3.3. Application de l'atomisation.....	7
I.3.4. Avantages et inconvénients de l'atomisation.....	9
I.3.4.1. Avantages.....	10
I.3.4.2. Inconvénients.....	10
CHAPITRE II : THÉORIE DU PROCÉDÉ D'ATOMISATION	
II.1. Introduction	12
II.2. Formes des buses	12
II.2.1. Les buses fermées.....	12
II.2.2. Les buses ouvertes.....	13
II.3. Mécanismes de l'atomisation	15
II.4. Paramètres d'atomisation	16
II.4.1. Influence de la température de surchauffe.....	16
II.4.1.1. La viscosité.....	16
II.4.1.2. Energie superficielle.....	17
II.4.2. Influence de la vitesse du gaz (pression) et débit du métal liquide.....	18
II.5. Taille des particules	19
II.6. Forme des particules	20
II.7. Microstructure des poudres	22
II.7.1. Influence de la taille de la particule sur sa microstructure.....	22
II.7.2. Théorie de la germination appliquée à l'atomisation.....	23
II.8. Influence des éléments d'addition	26
II.9. Influence des collisions sur la forme des particules	26
CHAPITRE III : CONCEPTION DE L'ATOMISEUR	
III.1. Description de l'atomiseur	27
III.2. Organes constitutifs de l'atomiseur	28
III.2.1. Four à résistances.....	28
III.2.1.1. Principe.....	29
III.2.1.2. Transfert de chaleur dans le four.....	29
III.2.1.3. Réalisation des parois.....	32
III.2.1.4. Calcul de la puissance d'un four à résistance.....	33
III.2.2. Eléments chauffants.....	34
III.2.2.1. Caractéristiques des éléments chauffants.....	35

III.2.2.2. *Choix de l'élément chauffant*.....35
 III.2.2.3. *Les raisons d'endommagements des éléments chauffants*.....36
 III.2.3. *Organigramme de calcul de la température et de la puissance du four*.....36
 III.2.4. *Les couples thermoélectriques*.....37
 III.2.4.1. *Principe physique de l'effet thermoélectrique*.....37
 III.2.4.2. *Différents types de couples thermoélectriques*.....37
 III.2.4.3. *Choix du thermocouple*.....38
 III.2.5 *Schéma électrique du four*.....38
 III.3. *Conception de la buse*.....39
 III.3.1. *Calcul de la vitesse d'écoulement du métal liquide*.....39
 III.3.2. *Calcul des paramètres de la chambre d'atomisation*.....40
 III.3.2.1. *Calcul de la vitesse des gouttelettes*.....40
 III.3.2.2. *Calcul des dimensions de la chambre d'atomisation*.....42
 III.3.2.3. *Calcul de la température du mélange gaz-gouttelettes*.....42
 III.4. *Conception du cyclone*.....42

CHAPITRE IV : MISE EN SERVICE DE L'ATOMISEUR, ÉLABORATION ET CARACTÉRISATION DE LA POUDRE OBTENUE

IV.1. *Introduction*.....45
 IV.2. *Mise en service et exploitation du four*.....45
 IV.2.1. *Mise en service*.....45
 IV.2.2. *Chauffage et refroidissement du four*.....45
 IV.2.3. *Maintien de la température*.....46
 IV.3. *Elaboration des poudres*47
 IV.3.1. *Le matériau utilisé*.....47
 IV.3.2. *Déroulement des essais*.....47
 IV.4. *caractérisation de la poudre obtenue*48
 IV.4.1. *Introduction*.....48
 IV.4.2. *Méthodes de caractérisation*.....48
 IV-4.2.1. *Analyse granulométrique*.....48
 IV.4.1.1.1. *Tamissage*.....48
 IV.4.1.1.2. *Analyse microscopique*.....49
 IV.5. *Etude de l'influence des différents paramètres d'atomisation sur la taille et la forme des particules*.....50
 IV.5.1. *Influence de la température du métal liquide sur la taille des particules*.....50
 IV.5.2. *Influence de l'angle de pulvérisation sur la taille des particules*.....52
 IV.5.3. *Influence de la pression de pulvérisation sur la taille des particules*.....54
 IV.5.4. *Influence du diamètre du jet liquide sur la taille des particules*55
 IV.5.5. *Influence de la hauteur du jet sur la taille des particules*.....57
 IV.5.6. *Influence de la température de chauffage sur la forme des particules*.....58
 IV.5.7. *Influence de la taille des particules sur la microstructure de la poudre*.....59
 IV.5.8. *Influence des collisions sur la forme des particules*.....60

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES61
BIBLIOGRAPHIE.....62

ANNEXE I : *Sous-ensembles de l'Atomiseur*
 ANNEXE II : *Résultats de l'analyse granulométrique*

ملخص :

انطلاقا من تقسيم منظومات إلى أجزاء دقيقة، نستطيع بواسطة التقنية المسماة بالتعدين التجزيئي الحصول على مواد إما عادية بأقل تكلفة إما فائقة النوعية يتعدى الحصول عليها بواسطة الطرق التقليدية. تتضمن هذه الأطروحة دراسة موسعة لنظرية التجزئة للمعادن إلى رذاذ عن طريق تصميم لجهاز التذرية. أخذنا في الاعتبار عدة عوامل منها ضغط الهواء - درجة الحرارة - زاوية الانطلاق - قطر وارتفاع القذف. تمت معاينة وإظهار الجزيئات المعدنية بواسطة المجهر الإلكتروني.

Abstract :

Atomization is the breakup of bulk liquid into droplets to form a spray. In melt atomization the liquid consists of a heated substance, which is a solid at room temperature. The spraying of molten metals is the most common form of melt atomization and it is carried out for the production of metal powders, spray deposition and for coating or spray forming of shapes such as billets or tubes. The purpose of this study is to describe a specially powders atomizer designed in our laboratory and to establish the influence of the atomization parameters (pressure of the gas, temperature of the liquid metal, flow rates of liquids and gas) on the shape and the size of the particles.

Résumé :

La métallurgie des poudres permet d'élaborer, à partir de systèmes très divisés, des matériaux, soit assez classiques en minimisant les prix de revient, soit tout à fait spécifiques car impossibles à obtenir par métallurgie conventionnelle. Elle regroupe un ensemble de techniques permettant d'obtenir des matériaux très divers à partir de leurs constituants élémentaires sous forme très divisée. Le présent travail porte sur l'atomisation des poudres métalliques, en particulier, la description de l'installation mise au point au sein du Laboratoire en vue d'élaborer diverses poudres métalliques en tenant compte de différents paramètres d'atomisation tels que la pression de l'air injecté sur le métal liquide, la température du métal, l'angle de pulvérisation, les diamètres et hauteur du jet,.... L'influence de ces paramètres a fait, par ailleurs, l'objet d'une caractérisation structurale au moyen de la microscopie électronique notamment.

MOTS CLÉ : Métallurgie des poudres - Atomisation - Pression injectée - Angle de pulvérisation - Température - Caractérisation structurale - Microscopie électronique.

La métallurgie des poudres regroupe un ensemble de techniques permettant d'obtenir des matériaux divers à partir de leurs constituants élémentaires sous forme pulvérisée. Ce qui n'était à l'origine que procédés empiriques relevant plus de l'artisanat que d'une démarche réfléchie, s'est progressivement transformé, principalement durant le XX^e siècle, en une discipline scientifique structurée. Les domaines d'application se sont diversifiés avec deux optiques principales : l'une consistant à développer des méthodes de fabrication économiques de pièces à usage mécanique antérieurement obtenues par métallurgie conventionnelle ; réduction des étapes de production et absence quasi absolue de chutes ou de pertes (on utilise que la quantité de poudre dont le poids est celui de la pièce à réaliser), l'autre à façonner plus aisément des matériaux à très haut point de fusion, voire à élaborer des matériaux difficiles à obtenir par les méthodes classiques.

Différentes techniques peuvent être mises en œuvre en vue de réaliser les poudres métalliques. On citera :

- les méthodes mécaniques impliquant des processus de morcellement par choc et abrasion ; les appareils utilisés sont essentiellement des broyeurs à mâchoires, à marteaux, à billes... convenant aux matières fragiles telles que (Mn, Sb, Bi, Fe-Al, Ni-Al, Fe-Si,...),
- les méthodes chimiques basées sur la précipitation du métal à partir des solutions de sulfates (Fe, Ni, Co,...) ou par précipitation en solution ammoniacale d'hydroxydes, lesquels, après calcination à l'air, sont convertis en oxydes anhydres (ZrO_2 , Al_2O_3 ,...),
- les méthodes électrolytiques relevant de l'électrolyse de solutions aqueuses avec des densités de courant de l'ordre de $9A/dm^2$ convenant aux métaux purs tels que (Cu, Ag, Fe, Zn, Sn, Ni).

Une dernière technique doit également être mentionnée : l'atomisation. Dans ce cas le matériau (élément pur ou alliage) est préalablement fondu dans une poche (four) ; le liquide résultant est ensuite évacué au travers d'une buse. Le jet formé est soumis à un flux de gaz (air, azote, gaz rare) ou d'eau, sous pression. Les gouttelettes résultant de la fragmentation du jet métallique liquide prennent souvent une forme quasi sphérique avant de se solidifier avec des vitesses élevées (500 à 3000°C/s). Les particules de poudre récupérées dans la partie basse de l'installation, doivent satisfaire à de multiples conditions : morphologie adaptée des granules, faible taille des particules (généralement entre 1 et 500 μm), un degré de pureté suffisant en utilisant une atmosphère inerte (en particulier sur les surfaces), une aptitude à la déformation plastique de sorte que l'imbrication des particules soit optimale.

Le présent travail porte sur cette dernière technique ; en particulier sur la description de l'installation spécialement conçue dans le laboratoire en vue d'élaborer dans une première étape, des poudres de plomb. En fonction des paramètres d'atomisation adoptés (pression d'air comprimé, hauteur du jet, angle de pulvérisation, température, ...), les poudres obtenues font l'objet, d'une caractérisation structurale au moyen de la microscopie électronique notamment.

Ce document présente au chapitre I un aperçu sur les diverses techniques d'élaboration des poudres métalliques. Ensuite, il traite au chapitre II de la théorie d'atomisation ; en particulier, le mécanisme d'atomisation ainsi que les relations entre les paramètres influents sur les caractéristiques de la poudre produite.

Le chapitre III traite de la conception et la réalisation de l'atomiseur tandis que le chapitre IV décrit la mise en exploitation de l'atomiseur, l'élaboration de la poudre de plomb et sa caractérisation.

CHAPITRE I

MÉTHODES D'ÉLABORATION DES POUDRES MÉTALLIQUES

1.1. Aperçu historique

L'histoire de l'atomisation des matériaux fondus et ceux normalement liquides est très courte. Avec des travaux très réduits, effectués avant le vingtième siècle comme dans tous les autres domaines de la métallurgie, le développement des techniques pour la manipulation des métaux fondus était la contrainte principale.

Les premières poudres produites par atomisation étaient en majorité de l'étain et du plomb utilisées dans les soudures comme de la pâte. On avait utilisé alors, l'atomisation à air où à vapeur d'eau dans des installations informes dont certaines n'ont subi que de petites modifications jusqu'ici.

Entre les deux guerres mondiales, des poudres d'aluminium et de zinc ont été fabriquées en utilisant des techniques similaires ; l'aluminium était utilisé dans le développement des explosifs et le zinc dans la purification des boissons.

Avant la deuxième guerre mondiale, l'utilisation de la métallurgie des poudres pour la fabrication d'organes mécaniques était restreinte aux paliers de précision et aux coussinets autolubrifiants.

Des observations faites sur la technique des granulations à l'eau ont conduit à une atomisation à très haute pression de l'eau, d'abord sur le cuivre et ses alliages (1930-1940), ensuite sur l'acier (1950). En Allemagne, durant les années de guerre, et à cause d'un manque remarquable en fer, deux procédés ont été développés pour la production des chaînes d'entraînement en utilisant la poudre de fer atomisée [1].

En 1960, des efforts considérables ont été déployés dans le développement du procédé d'atomisation à gaz inerte ; la pulvérisation a concerné une large gamme de métaux destinés aux programmes de recherche sur les matériaux dans le domaine aérospatial.

Depuis ce temps, le domaine a attiré un certain nombre de spécialistes dans la conception des installations. Les technologies sont devenues accessibles et le développement dans le domaine est très loin d'être achevé.

1.2. Procédés d'élaboration des poudres métalliques

Les procédés de fabrication des poudres métalliques doivent permettre d'obtenir, à des prix acceptables, des quantités importantes de poudres de métaux et alliages ayant des caractéristiques physiques et chimiques répondant à des spécifications précises de façon à garantir la qualité des produits frittés. On distingue deux groupes de procédés d'élaboration des poudres : les procédés mécaniques et les procédés physico-chimiques.

1.2.1. Procédés mécaniques

1.2.1.1. Broyage

Ce procédé s'applique aux métaux fragiles tels que le manganèse ou le chrome qui peuvent être réduits en poudre dans des broyeurs à billes ou à marteaux. Il peut être également utilisé pour réduire les métaux ductiles en poudre après les avoir rendu fragiles et cassants, soit par chargement en hydrogène, soit en utilisant des préalliages fragiles (Fe-Si, Fe-Cr, Fe-Al). Pour cela, plusieurs types de broyeurs peuvent être utilisés soit pour le broyage grossier : broyeurs à mâchoires, à marteaux ou à cylindres, soit pour le broyage fin. Ce dernier suit généralement le concassage préliminaire du fait qu'il ne donne que rarement une poudre immédiatement utilisable [2].

Les machines les plus utilisées sont le broyeur à boulets, à secousses (figure I.1) [3], à marteaux, à cylindres, les tubes broyeurs, les broyeurs tourbillonnaires ainsi que divers désintégrateurs à chocs.

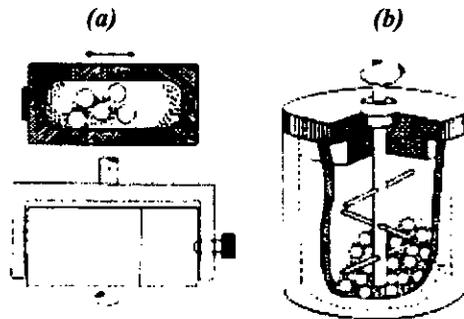


Figure I.1. Exemples de broyeurs.

- a) broyeur vibrant ($300 < V < 900$ tr/mn)
- b) broyeur attriteur ($100 < V < 300$ tr/mn)

Les deux principaux procédés de broyage sont :

a/ Poudre Macro-Mesh

Cette poudre est obtenue par le broyage des copeaux d'usinage d'acier ou de fonte malléable. L'utilisation de broyeurs à marteaux permet d'obtenir des poudres d'acier assez grossières (0.2 à 0.7 mm) pouvant servir à fabriquer des pièces de grandes dimensions.

b/ Procédé Coldstream

Ce procédé utilise le principe du broyage à jet. Les particules de poudre ou les fragments à broyer sont entraînés à une vitesse supersonique par un courant de gaz (air ou azote) dans la chambre de broyage où ils rencontrent une enclume fixe en métal dur. La détente adiabatique du gaz abaisse fortement sa température dans la chambre, ce qui fragilise le produit. La poudre obtenue a une taille de grain de l'ordre de 10 μm et une forme irrégulière [4].

I.2.1.2. Pulvérisation mécanique

*** Procédé D.P.G**

Le métal liquide est pulvérisé mécaniquement à la sortie d'un orifice étroit. Dans le procédé Allemand D.P.G, le métal liquide subit une première désintégration en traversant une nappe d'eau se présentant sous la forme d'un double cône de révolution. Les gouttes obtenues sont par la suite pulvérisées par chocs successifs sur des couteaux portés par un disque tournant à environ 3000tr/mn (fig. I.2) [5].

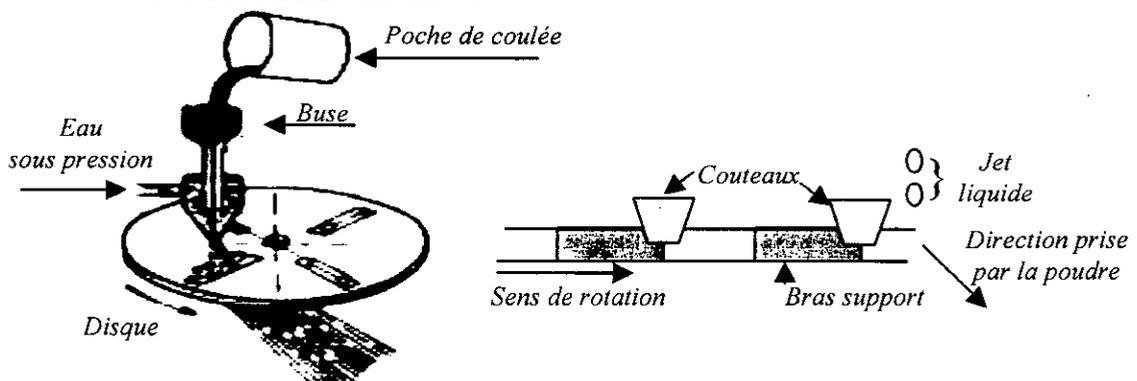


Figure I.2. Schéma d'un pulvérisateur mécanique (Procédé D.P.G).

* Atomisation

L'atomisation des métaux fondus est très employée pour l'aluminium, le cuivre et peut être appliquée à la plupart des métaux et alliages dont le point de fusion est inférieur à 1600°C. Le métal s'écoule sous forme d'un jet liquide de plusieurs millimètres de diamètre sur lequel est appliqué un fluide atomiseur (liquide ou gazeux) sortant d'une buse annulaire sous une forte pression. Le métal est ainsi pulvérisé dans une chambre d'atomisation. La forme des particules et leur granulométrie dépendent de la nature du métal pulvérisé, des paramètres d'atomisation et du fluide atomiseur (fig.I.3).

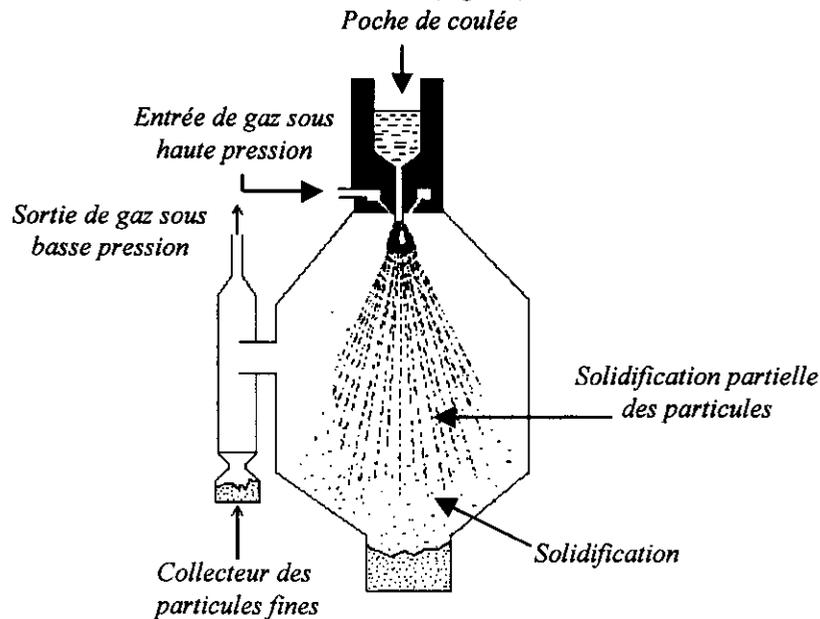


Figure I.3. Vue schématique d'un atomiseur.

* Pulvérisation sous vide

Le procédé consiste à fondre le métal dans un creuset au moyen d'un four à induction. Le métal liquide est mis sous une surpression d'hydrogène qui se dissout en grande quantité dans le métal liquide. Le creuset est ensuite remonté jusqu'à ce qu'un tube de transfert, relié à une chambre supérieure, plonge au fond du métal liquide. La chambre supérieure maintenue sous vide est enfin mise en communication avec le tube à l'aide d'une vanne ; ainsi, le métal liquide afflue en explosant dans la chambre supérieure sous la forme de gouttelettes fines pulvérisées par l'hydrogène quittant le métal (fig.I.4).

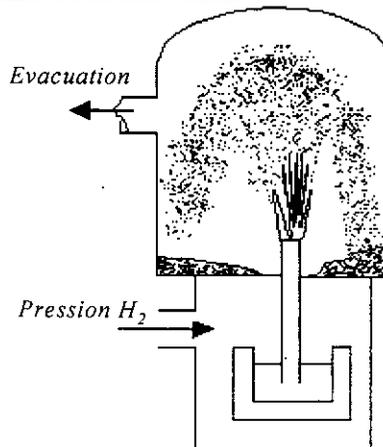


Figure I.4. Pulvérisateur sous vide.

* Atomisation centrifuge (électrode tournante)

Le matériau à réduire en poudre est mis sous la forme d'une électrode que l'on fait tourner à une vitesse de l'ordre de 200 tr/s [1]. Celle-ci est fondue localement par un arc électrique (procédé R.E.P, figure I.5) ou par un arc plasma (procédé P.R.E.P) ou par bombardement électronique.

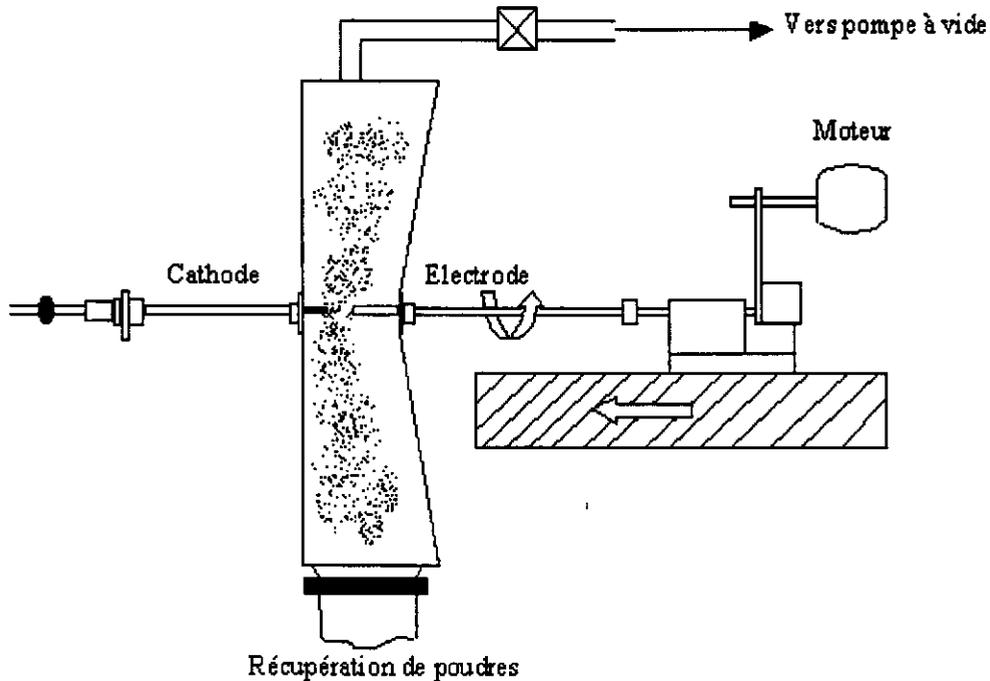


Figure I.5. Pulvérisateur à électrode tournante.

Si on utilise le procédé R.E.P la poudre peut être contaminée par le tungstène de la cathode. Le liquide forme une couche s'étendant au delà du bord de l'électrode tournante. Des protubérances et des ligaments se forment ; ils sont dus au cisaillement et à la tension superficielle. Durant la chute libre après éjection, les ligaments se transforment en gouttelettes et éventuellement en sphères. La forme des poudres est sphérique alors que la taille moyenne est de l'ordre de $250\mu\text{m}$ [6]. La taille des particules est donnée par la relation suivante :

$$d = \frac{3,464}{\omega} \left(\frac{\gamma_s}{D\rho_m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.1)$$

avec :

- 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.

I.2.2. Procédés Physico-chimiques

I.2.2.1. Réduction d'oxydes

Cette réduction s'opère à une température inférieure à la température de fusion du métal. On utilise l'hydrogène pour réduire les oxydes de (W, Mo, Co), l'ammoniac craqué ou l'oxyde de carbone pour (Ni, Cu, Fe, Pb). Les oxydes sont purifiés au préalable.

Les poudres obtenues sont d'autant plus fines que le broyage des oxydes a été plus poussé et que la réduction a été effectuée à plus basse température et la teneur en humidité du gaz réducteur est plus faible.

Le procédé Högånäs (Suédois) qui produit la plus grande quantité de poudre de fer, consiste à réduire un minerai très pur par du charbon dans un creuset chauffé vers 1200°C en présence de chaux. On obtient l'éponge de fer qui, après broyage, purification par triage magnétique et recuit réducteur fournit une poudre de taille allant de 10 à 150 μ m. [2]

1.2.2.2. Electrolyse

L'électrolyse de solutions aqueuses de sels (avec anode soluble ou insoluble) est utilisée pour la production de poudre de fer, de cuivre, de plomb, d'étain, de chrome, de manganèse. En la contre partie des conditions nécessaires à l'obtention d'un dépôt électrolytique adhérent et continu, c'est à dire en utilisant de fortes densités de courant, une forte concentration en acide et une faible concentration en ions métalliques, une circulation rapide du bain, une température modérée de l'électrolyte, en ajoutant des colloïdes au bain, on obtient directement un dépôt spongieux ou pulvérulent qui, après lavage et séchage, se broie facilement en poudre fine.

Les poudres électrolytiques se présentent souvent sous forme de grains à structure dendritique caractéristique. Leur densité apparente est faible, leur facteur d'écoulement assez médiocre. Elles s'agglomèrent facilement par imbrication de leur rameaux dendritiques.

Le plus souvent, ces poudres sont broyées, recuites à moyenne température et tamisées pour leur donner la granulométrie désirée et, en même temps, pour les rendre plus denses et plus plastiques, donc plus compressibles.

1.2.2.3. Dissociation des métaux carbonyles

Ce procédé est utilisé pour la préparation du fer et du nickel très purs. Ces carbonyles liquides à bas point d'ébullition (43 °C pour Ni(CO)₄ et 107 °C pour Fe(CO)₅), se forment en faisant passer de l'oxyde de carbone sous une pression de 200 bars à une température allant de 200 et 250°C sur le métal.

La décomposition du carbonyle à la pression atmosphérique entre 200 et 300°C, fournit une poudre sphéroïdale dont la taille des particules varie entre 1 et 50 μ m [5].

1.3. Atomisation

1.3.1. Introduction

La technologie de l'atomisation s'est développée progressivement et est devenue plus sophistiquée depuis que la production à grande échelle de la poudre de fer a commencé pendant la deuxième guerre mondiale. La recherche de la haute qualité de poudre (de l'aluminium, du fer, du bronze, des aciers inoxydables, des aciers à outils et des superalliages), en combinaison avec de nouvelles techniques de consolidation, a conduit à l'apparition de matériaux ayant des propriétés parfois supérieures à celles de ceux élaborés par des techniques classiques.

L'atomisation peut être définie comme étant la pulvérisation d'un liquide sous forme de gouttelettes fines de taille généralement inférieure à 150 μ m. Par conséquent, tout métal existant à l'état liquide peut être atomisé. La pulvérisation du métal liquide est faite sous l'action d'un jet d'eau ou de gaz sous une très haute pression. L'utilisation de la force centrifuge pour pulvériser un jet liquide est appelée atomisation centrifuge. L'utilisation de l'énergie ultrasonique pour effectuer la pulvérisation nous donne ce que l'on appelle l'atomisation ultrasonique.

Les propriétés les plus importantes des poudres obtenues par atomisation sont : La taille moyenne des particules, la distribution de taille, la forme des particules, la composition chimique (surtout la surface) et la microstructure.

Ces propriétés fondamentales déterminent les propriétés technologiques (la densité apparente, la coulabilité, la compressibilité, la forgeabilité...), les applications des poudres et celles des matériaux obtenus.

1.3.2. Atomisation à l'eau et à gaz

Le choix de la méthode de production des poudres est basé sur les propriétés désirées de la poudre. Les poudres atomisées à l'eau donnent généralement des particules de forme irrégulière avec une surface oxydée. Par contre les poudres atomisées par le gaz ont généralement des formes sphériques ou arrondies et si de plus cette atomisation est faite par un gaz inerte la poudre présente peu de parties oxydées. Le métal liquide est versé soit directement, soit à travers les conduites dans une poche ou réservoir. La buse située à la base du "tundish" contrôle la forme et la taille du jet du métal et le dirige vers la buse d'atomisation dans laquelle le jet de métal est désintégré en gouttelettes fines. Les gouttelettes se refroidissent et se solidifient dès qu'elles atteignent le fond de la chambre de récolte. On injecte du gaz inerte dans la chambre pour éviter l'oxydation de la poudre.

Dans l'atomisation à gaz, la poudre peut être récupérée sous forme de particules sèches ou refroidies à l'eau au fond de la chambre. Dans le cas de particules sèches, la chambre d'atomisation doit être assez longue [7] ; généralement supérieure à 6 m pour assurer la solidification de la poudre avant d'atteindre le fond de la chambre de récolte. Pour atomiser de grandes quantités de poudre ou assurer des opérations continues, un refroidissement externe du fond de la chambre d'atomisation peut être effectué à l'aide d'une nappe d'eau pour éviter le soudage des particules entre elles.

1.3.3. Application de l'atomisation

L'atomisation est la pulvérisation d'un liquide en gouttelettes. Elle peut être réalisée de plusieurs façons ; par pulvérisation à travers une buse à très haute pression, par la coulée d'un métal sur un disque en rotation, ou par les méthodes électrostatique ou à ultrason.

En général, l'atomisation en pratique et dans la recherche concerne les matériaux qui sont naturellement liquides à la température ambiante ou avoisinante (combustion, pulvérisateur (aérosol), projection de peinture, combats du feu). Les métaux fondus destinés à l'atomisation doivent être portés à des températures élevées pour obtenir des liquides à faible viscosité mais, souvent avec une tension superficielle élevée. Ainsi la viscosité cinétique de l'acier fondu, par exemple, est trop proche de celle de l'eau, ce qui permet d'utiliser l'eau pour modéliser certains aspects du comportement de l'écoulement de l'acier. Certains autres matériaux non métalliques tel que la céramique, sont aussi atomisés comme matériaux fondus, bien que leurs viscosités restent toujours élevées et très dépendantes de la température.

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

- élaboration de poudre,
- projection métallique.

Il existe d'autres techniques d'obtention de la poudre métallique telles que les procédés mécaniques et physico-chimiques. L'atomiseur doit faire la concurrence à toutes ces techniques. La projection métallique peut être utilisée sous plusieurs formes avec la particularité qui fait qu'une proportion du matériau, fondu et pulvérisé, doit arriver à l'état liquide au moment de l'impact avec la cible.

Quelques aspects de conception de base des atomiseurs sont similaires dans les deux applications dont les exigences sont la taille et la forme des particules.

Le domaine d'atomisation est très vaste du point de vue matériaux à pulvériser et leur utilisation ultérieure. Dans ce qui suit, nous présenterons avec différentes considérations, les applications les plus importantes. Pour certaines, la poudre est le produit fini ; pour d'autres, elle n'est pas l'objectif principal.

*** Application de la poudre atomisée**

Les poudres obtenues par le procédé d'atomisation peuvent atteindre des quantités allant de quelques kilogrammes à un million de tonnes par an respectivement pour une installation de production d'amalgame dentaire et celle des projectiles en acier ou en fer. La taille des particules varie de moins de 10 μm pour la poudre utilisée dans la peinture à environ le millimètre pour les grains utilisés dans les sableuses [1].

Les exigences sur la forme des particules varient selon la nature des applications. Pratiquement toute forme possible des poudres peut être obtenue par une conception adéquate de l'atomiseur. De même, toute taille particulière moyenne peut être obtenue. Cependant, les difficultés résident dans l'obtention des formes et des tailles d'une manière efficace (grand rendement) et à un flux bien déterminé. Un bon rendement ne signifie pas seulement l'utilisation d'un minimum d'énergie, mais également une production de poudre dans une gamme voulue de taille.

*** Poudre métallique**

La fabrication des organes mécaniques est la principale utilisation de la poudre atomisée. Plusieurs procédés ont été développés et continuent à être raffinés. La poudre atomisée est utilisée dans beaucoup d'autres domaines et de nouvelles applications sont régulièrement avancées.

Pour illustrer le domaine d'application, on peut citer les combustibles solides des roquettes, peintures métallisées, filtres à poudre métallique, synthèse de diamant, explosifs, additif d'aliment (Fe) [1], accumulateurs (Pb),.... La majorité de ces applications nécessite des particules de taille inférieure à 250 μm .

*** Atomisation des matériaux non métalliques**

En dehors du domaine des métaux, l'atomisation d'autres matériaux est largement pratiquée, bien qu'elle ne soit pas reconnue comme telle. Ainsi, "prilling of chemicals" est une forme d'atomisation utilisée pour les matériaux tels que les sels.

De par leurs caractéristiques spécifiques (viscosité élevée), les matériaux en verre sont atomisés sous forme de particules en fibres. Ainsi la laine de verre, le coton minéral et la fibre de céramique sont des produits atomisés bien qu'ils ne constituent pas strictement une poudre.

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

*** Projection thermique des métaux liquides**

L'atomisation peut être utilisée sans que le but final soit la formation de la poudre elle-même. Dans la projection thermique proposée à l'origine par Singer [8] et comme usage courant, on cite le procédé "Osprey"; le métal fondu est pulvérisé par un jet de gaz (fig.I.6). Il se solidifie partiellement en l'air de telle sorte qu'à l'impact avec la cible, il reste en partie liquide. Ceci résulte en la formation d'un solide à partir du métal fondu. Ce dernier est refroidi au fur et à mesure par extraction de la chaleur permettant ainsi d'avoir des formes bien définies avec une très bonne microstructure due au refroidissement rapide mieux que celle obtenue par coulée en lingot.

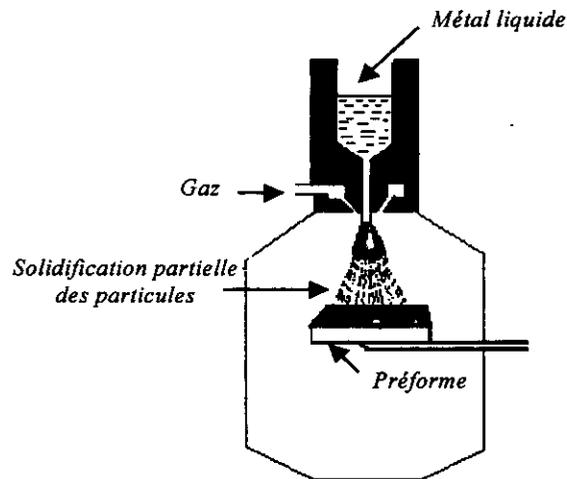


Figure I.6. Le procédé "Osprey".

Une autre application importante et en croissance continue est celle qui utilise la pulvérisation avec flamme. Dans ce cas, la pulvérisation se fait en injectant un matériau solide sous forme de poudre, fibre ou toute autre forme, dans une flamme. Les particules fondues sont projetées à une très grande vitesse en direction de la cible (fig.I.7).

Cependant, l'alimentation en poudre est généralement obtenue à travers un procédé d'atomisation. Il y a également des applications potentielles qui dépendent des résultats de recherche où l'atomisation des matériaux fondus à hautes températures est appliquée pour d'autres objectifs.

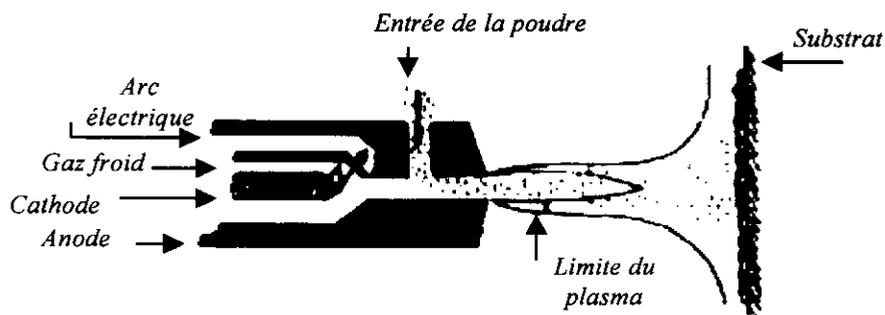


Figure I.7. Revêtement par projection thermique.

1.3.4. Avantages et inconvénients de l'atomisation

Le choix d'une technique de production de la poudre dépend d'un certain nombre de facteurs tels que :

- le volume du matériau à traiter,
- les propriétés physico-chimiques du matériau,
- les propriétés requises de la poudre.

Cependant, il est rarement évident de faire un choix à priori des détails d'un atomiseur en se basant seulement sur ces caractéristiques.

De plus, compte tenu de leur ductilité, la pulvérisation mécanique des métaux est difficile ; leur atomisation est, alors, considérée comme étant une alternative.

1.3.4.1. Avantages

La poudre obtenue par atomisation peut couvrir une large gamme de production (1 à 10⁵ t/an) et une grande variété de granulométrie (10µm à 10mm). Il est souvent possible de contrôler la distribution des tailles des particules, parfois même dans des limites très étroites. La forme des particules obtenues est souvent préférée à celle obtenue par les différents procédés mécaniques.

Par exemple, on peut obtenir des particules de forme presque sphérique, en utilisant l'atomisation à gaz ce qui donne des propriétés d'écoulement meilleures que celles obtenues par broyage. D'autre part, l'atomisation à l'eau produit des formes irrégulières idéales pour la compaction-éjection.

**** Homogénéité structurale due à la solidification rapide***

La fabrication des pièces mécaniques par la poudre atomisée ainsi que le revêtement métallique assurent une amélioration des propriétés mécaniques et physiques du produit obtenu. Cela est largement attribué à l'élimination des hétérogénéités métallurgiques. La solidification rapide qui apparaît dans presque tous les procédés d'atomisation est intéressante dans la mesure où elle permet de donner une homogénéité à travers toutes les particules et une régularité dans la distribution et les grandeurs des dendrites. Cette homogénéité n'est pas présente dans les particules obtenues par broyage, puisqu'elles préservent l'hétérogénéité du lingot.

**** Obtention des formes finies***

L'utilisation des poudres obtenues par atomisation offre des avantages certains lorsqu'on fait la comparaison avec les techniques conventionnelles. Par exemple, on peut comparer le compactage de la poudre et le frittage pour l'obtention des pièces mécaniques à l'usinage conventionnel à partir des barres métalliques ou tout autre matière. Cet avantage réside dans le fait qu'on peut obtenir des pièces finies ou semi-finies à partir d'une poudre sans passer par la fusion. Ceci permet de réduire considérablement les étapes de fabrication et par conséquent les coûts de production.

Le revêtement métallique est aussi utilisé pour l'obtention des formes presque parfaites et les avantages potentiels de cette techniques sont évidents.

Les pièces obtenues par emboutissage de la poudre présentent des meilleures propriétés et des dimensions précises que celles des pièces fabriquées traditionnellement.

**** Autres avantages***

Des avantages moins apparents de l'atomisation sont très dépendant de la technique d'atomisation, des quantités produites, et des matériaux. Ainsi par exemple, une installation d'atomisation de poudre bien conçu nécessite une maintenance et un coût de nettoyage très réduits par rapport à la méthode de broyage mécanique où le remplacement des outils de broyage est inévitable. Il est généralement établi que la fabrication d'un organe par la voie de la poudre métallique atomisée nécessite moins d'énergie qu'une fabrication conventionnelle.

1.3.4.2 Inconvénients

Presque toute caractéristique d'un procédé peut être un avantage dans une application et un inconvénient dans une autre. Ainsi le coût de la fusion peut être un problème des procédés d'atomisation dans certains cas.

Ce n'est que récemment que la technologie d'atomisation a suffisamment progressé par l'installation des systèmes de contrôle continu des paramètres d'atomisation de telle sorte que l'on peut être sûr d'obtenir une bonne production sur une période prolongée d'opération d'une installation.

L'atomisation est un procédé extrêmement complexe qu'on ne peut pas jusqu'ici prédire théoriquement le lien entre la qualité du produit et les caractéristiques d'entrée de l'atomiseur et du métal fondu. Il est souvent nécessaire de faire des recherches et des développements préliminaires et de procéder à des modifications de l'atomiseur, et les propriétés du métal fondu. Les nouveaux instruments de mesure des tailles des particules permettent actuellement de réaliser un contrôle en ligne de la qualité du produit obtenu sous forme de poudre. Il reste vrai, cependant que le contrôle sophistiqué des débits, de la collecte de la poudre, ainsi que les aspects équivalents des procédés de revêtements métalliques lorsqu'ils sont combinés aux complexités d'atomisation exigent un engagement financier conséquent.

CHAPITRE II

THÉORIE DU PROCÉDÉ D'ATOMISATION

II.1. Introduction

L'atomisation est la transformation d'un jet liquide en fines gouttelettes dans un milieu gazeux, dans l'eau ou dans le vide. Le produit final après l'étape de pulvérisation et le transfert de chaleur qui s'en suit, est un solide qui soit une poudre, un revêtement ou une préforme (ébauche). L'atomisation est utilisée dans beaucoup d'autres applications différentes. La plupart des processus d'atomisation sont similaires dans le principe physique de désintégration. Parmi les domaines d'importances particulières on cite :

- la pulvérisation pour la combustion : Elle concerne l'atomisation et la brûlure des combustibles,
- la pulvérisation sèche : Elle concerne la pulvérisation d'une solution ou d'une suspension à gaz chaud pour la production d'une poudre du liquide. Ce procédé présente des similarités avec l'atomisation des matériaux fondus,
- la pulvérisation agricole : Pour les insecticides et les engrais chimiques.

Il existe beaucoup d'autres domaines importants tels que, la pulvérisation médicale, les aérosols et la pulvérisation des peintures.

Le terme atomiseur est utilisé pour indiquer la machine utilisée pour la pulvérisation. L'organe principal est constitué par les buses qui projettent le liquide et les gaz à grandes vitesses. Cependant une utilisation industrielle courante du terme atomiseur représente le système d'atomisation complet. Le terme peut inclure l'organe de pulvérisation, le système d'alimentation en matériaux fondus, la chambre d'atomisation et le système de collection de la poudre.

II.2. Formes des buses

Il existe deux variantes de buses communément utilisées en pratique et auxquelles on fait souvent référence. Les buses ouvertes à chute libre et les buses fermées ou confinées. Dans les atomiseurs fermés, le métal fondu passe par la buse à travers un tube d'alimentation souvent en céramique. Celle-ci est insérée dans la buse à gaz (normalement métallique) de telle manière qu'il n'y a aucune communication entre les deux buses. Le gaz attaque le métal fondu à sa sortie de la buse. Dans les buses ouvertes ou à chute libre, le jet du liquide tombe d'une certaine distance entre la buse du liquide et le point d'impact (liquide-gaz). Ces buses ne sont pas en contact avec les buses du liquide.

II.2.1. Les buses fermées

Ces buses présentent un avantage dans la mesure où les pertes en énergie cinétique et en vitesse du gaz à la sortie de la buse sont minimisées. Donc on obtient des vitesses du gaz très élevées dans la zone d'impact et cela est favorable dans le cas où une poudre très fine serait recherchée (diamètre inférieur à 20 ou à 100 μm selon le métal à atomiser). La figure II.1.a. montre la conception des buses fermées. Leur inconvénient réside dans le refroidissement rapide de la buse du métal (sauf cas où on utilise un gaz chaud, comme il est courant avec l'aluminium). Cela impose des contraintes thermiques très sévères sur le matériau de la buse du métal. Un autre inconvénient est que le jet de gaz autour des extrémités de la buse du métal crée des changements de pression importants à la sortie de la buse. Ainsi, si on veut utiliser un grand angle d'attaque (90°), ce qui réduit le problème de refroidissement, il y aura une pression de retour importante nécessitant l'utilisation d'une grande pression sur le liquide (jusqu'à 100KPa) afin d'avoir une coulée du métal sans retour (sans bouchage de la buse) [1].

Très souvent, on utilise des angles d'attaque inférieure à 50° , ce qui crée une aspiration du métal, donc une augmentation du débit métallique, parfois par facteur de deux à trois. Cela résulte en un changement important dans le rapport des débits gaz/métal et par conséquent une grande variation de la taille des particules de la poudre.

II.2.2. Les buses ouvertes

Les buses à jet libre (fig.II.1.b), similaire à celle présentée dans la figure II.1.a présentent les caractéristiques suivantes :

La buse du métal n'est pas refroidie souvent par le jet de gaz, donc les chocs thermiques de la buse du métal sont loin d'être un problème par rapport aux buses fermées. L'inconvénient de ce type de buse est le jet de gaz, qui suit un chemin relativement long (en moyenne 50 à 200mm) avant d'arriver au point d'impact. Ainsi la vitesse et le rendement pour l'obtention de la poudre fine sont réduits.

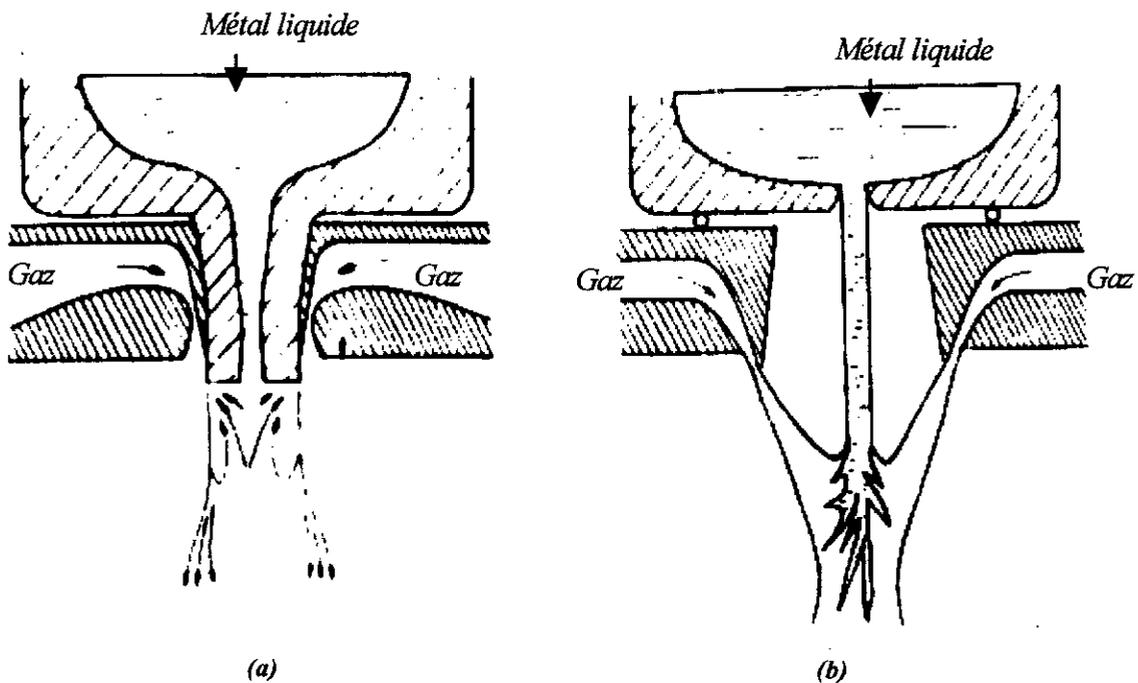


Figure II.1. Exemples de buses.

(a) Buse fermée

(b) Buse ouverte

Dans les buses à conception ouverte, le jet du métal tombe dans le jet de gaz. Ce procédé a été utilisé avec le zinc et l'aluminium durant une cinquantaine d'années ou plus. La figure II.2 montre un dispositif à jet horizontal utilisé pour les matériaux à bas point de fusion dans lequel le métal est aspiré par le jet de gaz horizontal.

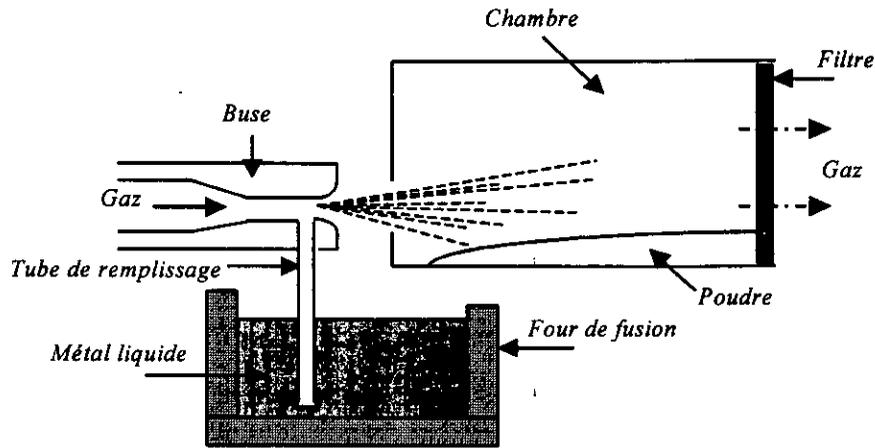


Figure II.2. Dispositif d'atomisation à jet horizontal.

Les systèmes à jet de métal vertical sont plus efficaces du moment qu'ils peuvent opérer avec moins de risque de faire projeter le métal contre les parois de la chambre. Il y a plusieurs producteurs qui utilisent ce système avec succès pour produire des poudres de grande taille avec une excellente régularité et un bon rendement [9].

*** Dynamique du fluide dans une buse fermée**

Il existe une différence de pression ΔP entre la pression à la sortie du tube d'alimentation P_2 et la pression ambiante P_1 ; $\Delta P = P_2 - P_1$, (figure II.3). Une ΔP négative engendre une aspiration du métal liquide. Une ΔP positive représente une condition à pression de retour.

Le débit du métal dans le creuset et le tube peut être considéré comme étant un débit en régime permanent dans lequel aucun changement ne se produit dans l'énergie totale et qui est exprimé par l'équation de Bernoulli comme suit [10] :

$$dU + d\left(\frac{P}{\rho_m}\right) + d\left(\frac{V^2}{2\beta}\right) - gdh - dQ^* = 0 \quad (2.1)$$

où :

U : énergie interne du système.

V : la vitesse du métal au niveau h.

ρ_m : densité du métal (supposé indépendante de la pression).

g : accélération de la pesanteur.

Q^* : la quantité de chaleur interne.

β : facteur de corrélation entre V et l'énergie cinétique du métal.

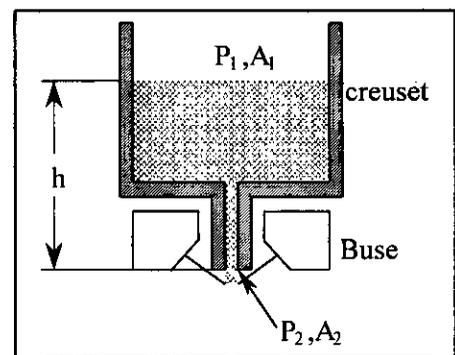


Figure II.3. Ecoulement du métal liquide

A partir de la 1^{ère} loi de la thermodynamique, $dU = dQ^*$ l'équation (2.1) peut être écrite dans la forme intégrale

$$\frac{\Delta P}{\rho_m} + \frac{V_2^2}{2\beta_2} - gh + E_f = 0 \quad (2.2)$$

Où : E_f est l'énergie mécanique par unité de masse du liquide métallique perdu sous forme de chaleur (frottement).

$E_f = e_f V_2^2 / 2$ avec e_f le coefficient des pertes par frottement.

$$\frac{1}{\beta_2} = \frac{1}{A_2} \int_0^{A_2} \left(\frac{v_2}{V_2} \right)^3 dA_2$$

Où A_2 : est la section du tube.

V_2, v_2 sont respectivement les vitesses moyenne et locale du métal à la sortie de tube.

Il est à noter que:

$$V_2 = - \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \frac{dh}{dt}$$

Où A_1 est la section du creuset (surface du bain liquide)

L'équation (2.2) peut être résolue pour donner ΔP :

$$\Delta P = \left(\frac{\rho}{2} \right) \left[2gh - \left[\left(\frac{dh}{dt} \right) \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \left(\frac{1}{C_D} \right) \right]^2 \right] \quad (2.3)$$

C_D est le coefficient de perte de charge du métal défini par :

$$C_D = \left(\frac{1}{\beta_2} + e_f \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

L'équation (2.3) relie ΔP à h et t à condition que C_D soit connue. Par définition, C_D dépend de β_2 et e_f . Ces dernières dépendent du nombre de Reynolds à la sortie du tube et de la géométrie de l'ensemble du creuset. Le terme de viscosité dans le nombre de Reynolds peut être considéré presque indépendant de h .

Pour une géométrie et un métal donné, C_D peut être considéré pour une première approximation, dépendent seulement de dh/dt , et par conséquent peut être déterminé expérimentalement à partir des mesures de h et de t effectué sans jet de gaz (chute libre), dans la quelle $\Delta P = 0$. Une fois C_D déterminé en fonction de dh/dt il peut être utilisé pour évaluer ΔP dans des conditions de chute non libre.

II.3. Mécanismes de l'atomisation

Il existe plusieurs modes de désintégration du métal liquide en gouttelettes, justifiables en théorie, avec des hypothèses simplificatrices tels que les faibles vitesses, et que les gouttelettes s'obtiennent à la plus grande longueur d'onde théoriquement instable comme présenté dans la figure II.4.

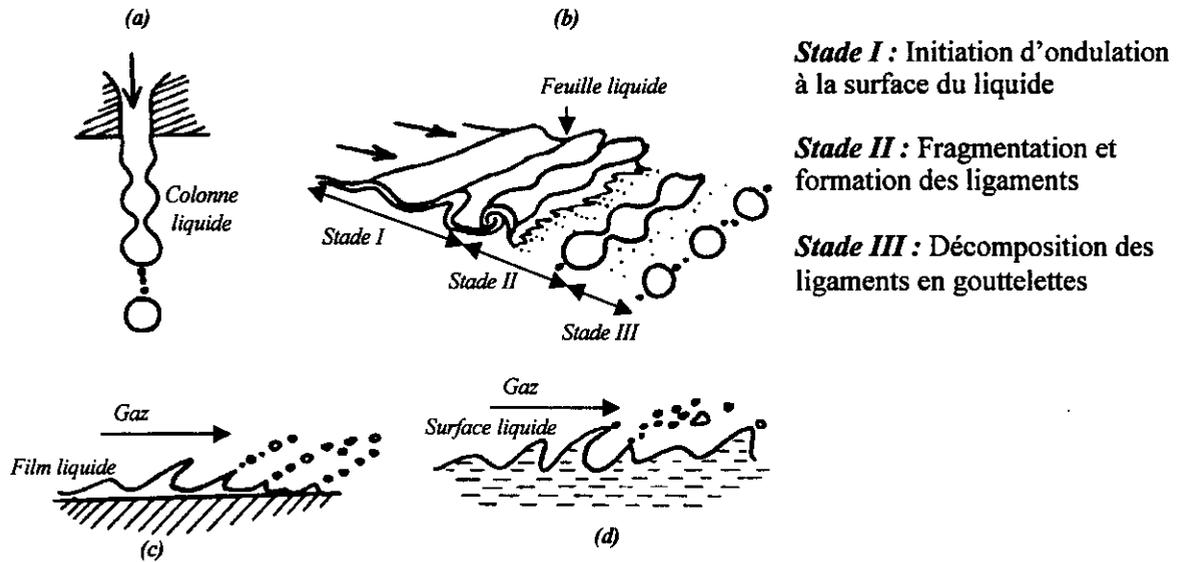


Figure II.4. Les différents modes d'atomisation.

Ces modes incluent la désintégration d'un liquide sortant d'un orifice (a), la désintégration d'une mince couche du liquide (b), la désintégration d'un film du liquide mince sur une surface solide (c) et la formation de gouttelettes à partir de la surface d'un liquide libre (d).

Le mécanisme d'atomisation est expliqué par un modèle de désintégration d'une feuille de liquide (fig. II.4b) par un jet de gaz [11]. L'initiation d'ondulation sinusoïdale ou d'autres perturbations dont l'amplitude augmente rapidement au stade I, est suivi d'une fragmentation formant des ligaments au stade II. Ces ligaments se brisent en gouttelettes au stade III.

II.4. Paramètres d'atomisation

II.4.1. Influence de la température de surchauffe

Plus la température augmente, plus les particules deviennent plus fines et sphériques. Cela est dû à la diminution de la viscosité du métal liquide et sa tension superficielle. La finesse des particules est fonction de la température du liquide. La surchauffe diminue la viscosité, la tension superficielle et augmente le temps de solidification, ce qui permet à la particule de prendre une forme sphérique sous l'effet de cette tension superficielle.

II.4.1.1. La viscosité

Les viscosités de tous les fluides dépendent fortement de la température. Les résultats pour la plupart des métaux liquides sur un domaine de température de quelques centaines de degrés sont correctement représentés par l'équation d'Arrhénius [12] :

$$\mu = C \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.5)$$

avec : C constante

Q : Energie d'activation du flux visqueux (en kJ/mole)

R : Constante des gaz parfait (R = 8.31441 kJ.mole)

T : Température absolue en K.

Pour déterminer l'énergie d'activation du flux visqueux des métaux liquide [12], on utilise la relation linéaire entre $\lg Q$ et $\lg T_f$ donnée par l'équation suivante :

$$\lg Q = 1,348 \lg T_f - 2,744 \quad (2.6)$$

La relation qui relie μ_{Tf} à la masse atomique A, à la température de fusion T_f et au volume molaire V_m est donnée par la formule suivante :

$$\mu_{Tf} = 5,7 \cdot 10^{-9} (A T_f)^{\frac{1}{2}} (V_m)^{\frac{2}{3}} \quad (2.7)$$

Une quantité que l'on rencontre fréquemment dans les mesures hydrodynamiques est la viscosité cinématique ν , définie comme étant le rapport de la viscosité dynamique μ à la masse volumique ρ , ν est la viscosité cinématique exprimée en m^2/s . Ces deux formules sont utiles pour avoir une estimation des valeurs de la viscosité des métaux.

II.4.1.2. Energie superficielle

La propriété fondamentale de la surface des liquides est sa tendance à se contracter de façon à avoir la plus faible surface possible. Cela est mis en évidence par la forme ronde des petites gouttes de liquides. Le fait que la surface liquide se contracte spontanément montre que l'on peut lui associer une énergie libre E_s , et que du travail doit être effectué pour augmenter cette surface. Pour faire passer une certaine quantité d'atomes de l'intérieur du liquide à sa surface, le travail γ qu'il faut dépenser lors de la formation d'une unité de surface est [13]:

$$\gamma = \frac{E_s}{S} \quad (2.8)$$

$$E_s = \gamma \cdot S = \gamma \sum_{i=1}^{i=N} \pi (D_i)^2$$

où S : est la surface totale des gouttelettes.
 N : le nombre total des gouttelettes produite par une masse M
 D_i : est le diamètre de la $i^{ème}$ gouttelette .

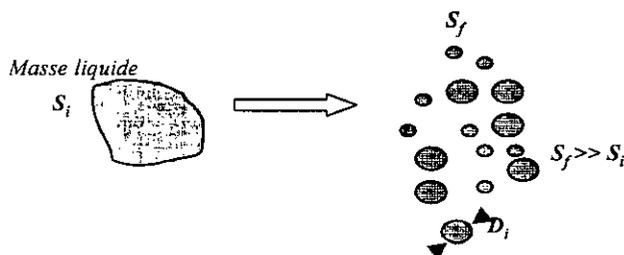


Figure II.5. Surface spécifique après atomisation.

La surface spécifique des gouttelettes après atomisation est supérieure à celle de la masse du liquide avant atomisation.

La tension superficielle d'un liquide pur doit normalement diminuer avec l'élévation de la température. Ainsi, le coefficient thermique $\frac{d\gamma}{dT}$ est négatif et généralement petit.

L'expérimentation sur des métaux de pureté définie n'a jamais révélé des coefficients positifs [14].

Le tableau II.1 rassemble les valeurs de γ au voisinage du point de fusion pour quelques métaux [14].

Eléments	Température de fusion (°C)	Tension superficielle à la température de fusion (mJ/m ²)	Variation de la tension superficielle en fonction de la température $-d\gamma/dT$ (mJ/m ² °C)
Al	660	865	0,15
Cu	1084,5	1286 ± 20	0,056
Fe	1536	1806	0,42
Mg	650	544 ± 2	0,142
Ni	1455	1782	0,31
Pb	327,4	460	0,118
Sn	232	560	0,095

Tableau II.1. Evolution de la tension superficielle en fonction de la température de fusion

II-4.2 Influence de la vitesse du gaz (pression) et débit du métal liquide

Un facteur important qui influe sur la distribution de la taille de la poudre, 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 uniforme. Ces poudres peuvent être produites lorsque G/A est maintenu constant durant toute la période d'atomisation. Le débit massique du gaz pour une première approximation est maintenu constant, en maintenant la pression du gaz constante pour une conception d'un atomiseur donné. 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 essentiellement de la pression métallostatique à la surface du bain liquide qui se trouve à une hauteur h du trou de coulée ; $A = f(h)$, et est proportionnel à $(h)^{1/2}$ [éq. 3.26]. Donc A peut être contrôlé à travers un contrôle de h .

Un débit métallique variable peut causer non seulement des vitesses de refroidissement et de solidification des gouttelettes atomisées non constantes mais aussi des dimensions des particules non uniformes et un changement de la forme désirée.

Dans l'atomisation confinée à gaz, dans laquelle le tube d'alimentation en métal liquide est situé très proche de la grande vitesse du jet de gaz, les interactions aérodynamiques entre le jet de gaz et le tube d'alimentation en métal induisent une chute non libre du métal liquide. Dans ce cas le débit dépend de la hauteur h et 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 en utilisant un atomiseur à gaz circulaire sans jet de métal, ont montré que des variations positives ou négatives de la pression 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 II.6 montre les résultats d'un travail déjà fait par Teïchi Ando [10]. Ces variations de la pression ralentissent ou accélèrent d'une manière significative le débit du métal.

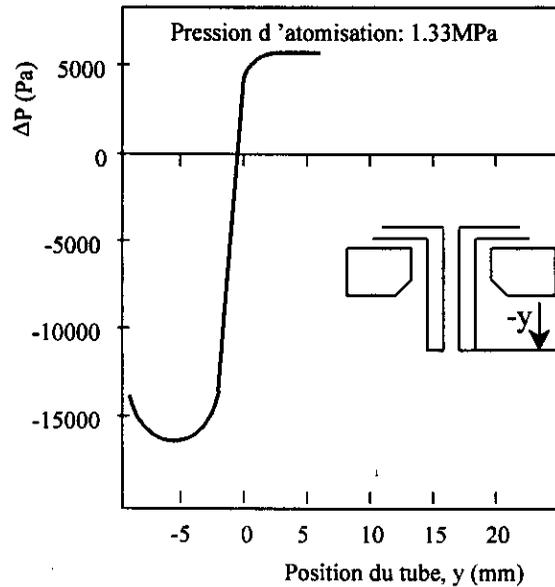


Figure II.6. Variation de la différence de pression en fonction de la position du tube par rapport au jet du gaz.

Des variations excessives positives peuvent forcer le gaz d'atomisation à entrer dans le creuset à travers le tube d'alimentation en causant un barbotage du liquide ou même une solidification dans le tube.

Des variations excessives négatives (aspiration) peuvent décroître le rapport G/A à des valeurs indésirables où une désintégration insuffisante du métal liquide peut survenir.

Les mesures de pression directe ne peuvent pas être prise en présence d'une coulée du métal et donc on ne peut pas avoir les valeurs de la pression durant l'atomisation à gaz, sauf si la forme mathématique de $A = f(\Delta P, h)$ est connue. Les pressions mesurées à la sortie ne peuvent pas être reliées au débit du métal et par conséquent elle ne donne aucun moyen pour contrôler la vitesse d'atomisation dans une atomisation confinée à gaz.

II.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 [15] qui est de la forme:

$$d_0 = \frac{585}{V_{\text{mél}}} \left(\frac{\gamma_s}{\rho_m} \right)^{\frac{1}{2}} + 597 \left(\frac{\mu}{\gamma \rho_m} \right)^{0,225} \left(\frac{1000 Q_l}{Q_a} \right)^{1,5} \quad (2.9)$$

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 : la viscosité dynamique du liquide (dyne.s/cm^2).
- $V_{\text{mél}}$: 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 d'une série d'expériences d'atomisation à température constante en faisant varier la viscosité et la pression et en utilisant l'air comme fluide d'atomisation.

Lubanska [16] a proposé la relation empirique donnant la taille moyenne d_m des particules de la poudre atomisée au gaz. Celle ci est de la forme:

$$\frac{d_m}{d_{mét}} = C_m \left[\frac{v_m}{v_g w} \left(1 + \frac{A_l}{A_a} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

Où :

w : nombre de Weber $w = \frac{V_a^2 \rho_m d_{mét}}{\gamma_s}$

d_m : diamètre moyen des particules.

$d_{mét}$: diamètre de flux de métal.

v_m : viscosité cinématique du métal liquide.

v_g : viscosité cinématique du fluide atomiseur.

A_l : 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 équations (2.9) et (2.10) montrent que la taille des particules diminue avec l'augmentation de la tension superficielle du métal liquide et la vitesse du gaz atomiseur.

II.6. Forme 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 suffit d'utiliser ces dernières propriétés pour déterminer la forme des particules.

La compréhension de la forme des particules atomisées nécessite la connaissance des facteurs qui déterminent les vitesses de refroidissement relatives 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). Sachant que les forces du fluide atomiseur diminuent lorsque la distance augmente dans la zone d'atomisation propre, les tensions superficielles ont tendance à sphéroïdiser les gouttelettes de formes irrégulières [17].

Ainsi, une fois la gouttelette quitte la zone de haute turbulence, les tensions superficielles deviennent opérationnelles pourvu que cette gouttelette ne soit pas refroidie à un point où sa viscosité devient importante. Si le temps de sphéroïdisation (τ_{sph}) de la gouttelette est court comparativement au temps de solidification (τ_{sol}), la particule a tendance à prendre une forme sphérique. Si par contre le temps de sphéroïdisation est long, la particule a tendance à prendre une forme irrégulière.

En se basant sur cette hypothèse Nichiporenko et Naida [18], ont donné des expressions permettant d'évaluer le temps de sphéroïdisation τ_{sph} et de solidification τ_{sol} .

$$\tau_{sph} = \frac{3\pi^2 \mu}{4v_p \gamma_s} (r_2^4 - r_1^4) \quad (2.11)$$

où :

- r_1 : rayon de la particule avant la transformation en forme sphérique
- r_2 : rayon de la particule après la transformation ($r_2/r_1 \approx 10$)
- v_p : volume de la particule

μ et γ_s : sont respectivement la viscosité dynamique et la 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 avec le temps nécessaire au dégagement de la chaleur latente de fusion est donné par :

$$\tau_{\text{sol}} = \frac{d_p \rho_m}{6h_c} \left[(C_p)_m \ln \left(\frac{T_i - T_g}{T_m - T_g} \right) + \frac{\Delta H}{T_m - T_g} \right] \quad (2.12)$$

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.

Malgré la nature simplifiée des équations (2.11) et (2.12), celles ci sont très utiles pour l'estimation de l'influence des différents paramètres sur la forme des particules.

Le coefficient de transfert de chaleur h_c de l'équation (2.12) est donné par :

$$h_c = \frac{\lambda}{d_p} (2 + 0,6Re^{0,5} Pr^{0,33}) \quad (2.13)$$

Où :

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

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

$$Re = \frac{\rho_a V_a d_p}{\mu_d} \quad (2.14)$$

$$Pr = \frac{\mu_d (C_p)_a}{\lambda} \quad (2.15)$$

Où :

- ρ_a : 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.

Le coefficient de transfert de chaleur h_c est plus important pour les liquides que pour les gaz. C'est pourquoi la forme des particules de poudres atomisées à l'eau est plus irrégulière que celle atomisée au gaz. Car d'après l'équation (2.12) le temps de solidification est plus court.

II.7. Microstructure des poudres

Dans la technologie conventionnelle de la coulée, les vitesses de refroidissement sont inférieures à 100°C/s . Par contre, la poudre atomisée présente une grande surface par unité de volume et le refroidissement se fait à des vitesses entre 10^3 et 10^4 $^\circ\text{C/s}$. Plus la taille de la particule diminue, plus la vitesse de refroidissement augmente. Dans certains cas, elle peut atteindre une valeur extrême de 10^8 $^\circ\text{C/s}$. L'augmentation de la vitesse de refroidissement induit une diminution dans le degré de ségrégation. Le produit de coulée est caractérisé par une structure dendritique. La taille du grain et la distance interdendritique entre les branches secondaires sont utilisées pour caractériser la structure dendritique et la ségrégation.

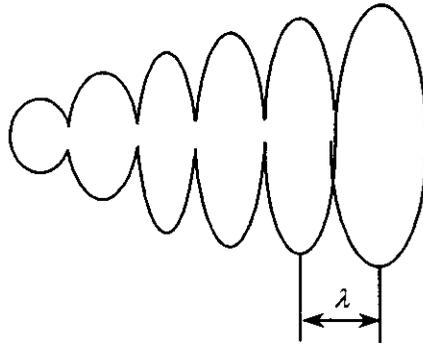


Figure II.7. Dendrites secondaires.

L'atomisation des poudres peut produire des microstructures avec une distance interdendritique λ (figure II.7) inférieure à $1\ \mu\text{m}$. Le cas extrême correspond à une poudre amorphe où le refroidissement est tellement rapide que la cristallisation est évitée.

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

II.7.1. Influence de taille de la particule sur sa microstructure

L'atomisation à gaz est une méthode attirante pour l'obtention des microstructures contrôlées à cause du refroidissement par convection rapide. Pour une première approximation, la vitesse de refroidissement $\frac{dT}{dt}$ peut être calculée en utilisant l'approche newtonienne [9]:

$$\frac{dT}{dt} = -KS(T-T_0) \quad (2.16)$$

Avec :

T : température absolue de la particule,

S : surface de la particule,
 T₀ : température ambiante,
 K : vitesse du transfert de chaleur par unité de surface.

En conséquence, durant l'atomisation, la température de la particule suit une décroissance en exponentielle en fonction du temps. Durant le refroidissement par convection, la distance entre deux branches de dendrites secondaires d'un solide obtenu par germination et croissance à partir du liquide pour une particule de diamètre d_p, varie comme suit:

$$\lambda_d = C d_p^n \quad (2.17)$$

Où

C : est une constante qui dépend du matériau et du processus d'atomisation
 n : est 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 des deux modes de refroidissement dépend de la conductivité thermique du gaz, la température d'atomisation, la température du gaz, la vitesse de la particule et la pression du gaz. Pour l'atomisation sous vide, la perte de chaleur se fait par rayonnement, ce qui donne une vitesse de refroidissement plus faible que celle par convection.

Dans le cas de l'atomisation à gaz, c'est le refroidissement par convection qui prédomine. La vitesse de refroidissement est donnée par:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{6}{d_p \rho_m (C_p)_m} [h_c (T_m - T_0) + S_t \varepsilon (T^4 - T_0^4)] \quad (2.18)$$

Avec :

ρ_m : densité du métal
 (C_p)_m : capacité calorifique du métal
 T_m : température absolue du métal
 T₀ : température ambiante
 h_c : la constante du refroidissement par convection
 ε : l'émissivité
 S_t : la constante de Stefan-Boltzmann

II.7.2. Théorie de la germination appliquée à l'atomisation

La transformation d'un liquide en un solide cristallin passe par deux étapes. La première est la germination qui commence par l'organisation d'un groupe d'atomes dans une structure solide dans le liquide. Une fois qu'un germe solide existe dans le liquide, les atomes s'unissent à lui, donnant un accroissement du volume solide. La croissance des germes réduit l'énergie du système. La croissance ne peut se faire qu'après la germination. La suppression de la germination est un moyen pour obtenir un solide amorphe. Dans la germination homogène, un petit germe se forme spontanément dans le liquide pour initier la transformation. Ce germe grandit pour transformer la gouttelette en un solide cristallin. Au-dessous de la température d'équilibre de fusion, l'énergie libre du solide stable est inférieure à celle du liquide.

Ainsi, il y a une différence d'énergie libre par unité de volume ΔG_v (négative) qui varie linéairement avec ΔT (ΔT : différence de température entre la température d'équilibre et le solidus réel).

$$\Delta G_v = \Delta G_0 \Delta T \quad (2.19)$$

Où ΔG_0 représente la variation de l'énergie libre avec la température au-dessous de la température de solidification d'équilibre T_M .

L'énergie libre totale ΔG_T nécessaire pour former un germe de rayon r dans le liquide en refroidissement est :

$$\Delta G_T = 4\pi r^2 \gamma_s + 4\pi r^3 \frac{\Delta G_v}{3} \quad (2.20)$$

Un aspect de l'équilibre d'après l'équation (2.20) est que l'énergie totale du système croit avec la formation d'un petit germe. Par conséquent, la transformation n'est pas favorable sauf si un germe atteint une taille critique.

Le rayon critique r_c du germe est obtenu par la dérivée de l'équation (2.20) par rapport au rayon r de la particule.

$$r_c = \frac{-2\gamma_s}{\Delta G_v} \quad (2.21)$$

Puisque l'énergie libre volumique ΔG_v est négative et décroissante avec ΔT , donc d'après l'équation (2.21) il devient plus facile d'obtenir un germe solide avec l'augmentation de ΔT . La vitesse de formation des germes est appelée la vitesse de germination et a pour unité le nombre de germes par unité de volume par unité de temps. La vitesse de germination varie en fonction de beaucoup de paramètres, y compris la viscosité du liquide et la température. Pour une première approximation [9], la vitesse de germination I peut être exprimée comme suit :

$$I = I_0 d_p^2 \exp\left(\frac{-Q_i}{kT}\right) \exp\left(\frac{-W_M}{T \cdot \Delta T^2}\right) \quad (2.22)$$

Où :

- I_0 : est 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.

A cause de la complexité de la dépendance avec la température, la vitesse de germination subit des variations considérables durant le refroidissement comme présenté dans la figure II.8.

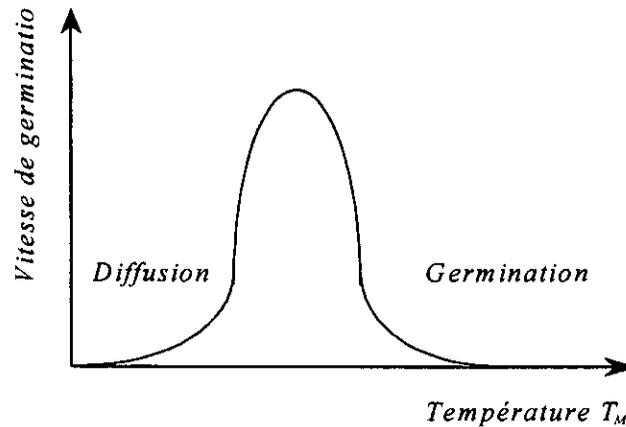


Figure II.8. Variation de la vitesse de germination en fonction de la température.

Avec la diminution de la température, la vitesse de germination augmente, passe par un maximum ensuite décroît. Aux températures élevées, la faible force motrice et la taille importante des germes entrave la germination ce qui est reflété par un ΔT faible. Aux températures basses (ΔT large), la vitesse de déplacement des atomes dans le liquide empêche la germination. Ainsi, si une gouttelette en fusion peut être refroidie à travers le domaine de température correspondant au sommet de la vitesse de germination, alors il est possible d'éviter la cristallisation. Le liquide devient tellement visqueux qu'il ne peut pas se cristalliser et par conséquent, on obtient un solide amorphe. Avec des vitesses de solidification rapides telle que l'atomisation à gaz, la solidification peut se faire plus vite que la vitesse de diffusion atomique dans le liquide; ce qui élimine la ségrégation et donne une structure solidifiée plus homogène. Lors de la transformation du liquide en solide, la chaleur est libérée à l'interface solide-liquide par conséquent le liquide se réchauffe proportionnellement à la chaleur calorifique C_p .

$$\Delta T_R = \frac{\Delta H_s}{C_p} \quad (2.23)$$

Où ΔT_R est l'augmentation de la température et ΔH_s est l'enthalpie de solidification.

Le temps de solidification d'une particule atomisée est une variable très importante qui peut être estimée par l'équation (2.12). Dans cette équation, le coefficient de transfert de chaleur h_c croît avec la conductivité thermique du gaz et le nombre de Reynolds du système. Ainsi l'équation précédente n'est qu'une approximation du calcul complexe du temps de solidification qui détermine la taille de la chambre d'atomisation.

Pour les atomiseurs centrifuge, la hauteur de la chambre est d'environ 4 m, pour l'atomisation à l'argon la chambre est de l'ordre de 8 m de hauteur. Dans le cas de l'atomisation à explosion sous vide partiel, le coefficient de refroidissement par convection est faible et la taille de la chambre est de l'ordre de 15 m de hauteur. Dans le cas de l'atomisation à deux fluides utilisant le gaz et l'eau la chambre est de l'ordre de 0.5 m de diamètre.

*** Applications des poudres obtenues par la solidification rapide**

L'utilisation de la solidification rapide est justifiée par l'amélioration qu'elle apporte aux propriétés magnétiques, électriques, mécaniques, de corrosion et de rayonnement. Dans les phases amorphes, les températures de curie sont élevées et les pertes magnétiques par hystérésis sont réduites. Aussi, l'absence des joints de grains améliore la résistance à la corrosion par un facteur de 100 environ [9].

Le refroidissement rapide des poudres d'aluminium atomisées, améliore la limite de solubilité des éléments d'addition en utilisant la trempe.

Exemples : la solubilité du Chrome, du cuivre et du silicium dans l'aluminium passe respectivement de 0,4 à 6 %, de 2,5 à 18 % et de 1,6 à 16 % [9].

Les limites de solubilité ont augmenté à cause de l'extraction rapide de la chaleur et par conséquent les atomes n'auront pas le temps de se réarranger. Par application de la solidification rapide à des alliages d'Aluminium - Lithium, la résistance et la limite élastique sont améliorées par le lithium, bien que la ductilité soit dégradée.

La plus impressionnante est l'amélioration de la limite à la fatigue. Les alliages d'Aluminium et du lithium (Al-Li) récents présentent une densité réduite et un module d'Elasticité élevé.

La résistance mécanique est plus élevée par rapport aux alliages d'Aluminium conventionnels.

II.8. Influence des éléments d'addition

La forme des particules de poudre de cuivre atomisée à l'eau devient plus irrégulière si on ajoute de petites quantités de certains éléments (Mg, Ti, Li ou Ca), qui ont tendance à diminuer la tension superficielle du cuivre. D'après l'équation (2.11) cette diminution de la tension superficielle du métal en fusion augmente le temps de sphéroïdisation des particules, ce qui donne plus de particules ayant une forme irrégulière. Dans le cas de plusieurs poudres atomisées, une grande fraction de poudres fines prennent une forme sphérique.

II.9. Influence des collisions sur la forme des particules

La possibilité de collision des particules entre elles pendant l'atomisation surtout dans l'atomisation à gaz peut avoir une influence significative sur la forme des particules. Cependant, ce phénomène a été négligé dans plusieurs travaux de recherche sur l'atomisation des poudres métalliques et les modèles mathématiques.

CHAPITRE III

CONCEPTION DE L'ATOMISEUR

III.1. Description de l'atomiseur

L'atomiseur est constitué essentiellement par un four de fusion à creuset (Annexe I, Four) qui est à son tour constitué d'une enceinte réfractaire (Four, Rep.5) équipée sur son pourtour interne, de résistances rayonnantes (Four, Rep.4). Celles-ci assurent un chauffage de l'enceinte qui est isolée de l'ambiance par des réfractaires et un calorifugeage (Four, Rep.2) de telle manière à avoir une température modérée sur la surface extérieure de l'enveloppe métallique (Four, Rep.7). Un creuset (Four, Rep.2) disposé au centre de cette enceinte contient le métal en fusion et couvert par une voûte (Four, Rep.15) percée au centre qui permet de couvrir le four, de l'isoler et de contrôler la température du bain en introduisant un thermocouple à travers ce trou. L'extraction du creuset se fait à l'aide de pinces. Le métal liquide coulé dans un entonnoir (de diamètre d , Moule, Rep.5) en basculant le creuset passe par l'axe de la buse (Buse, Rep.1) jusqu'au point d'impact où il sera pulvérisé sous forme de fines gouttelettes par un fluide (gaz ou eau) amené à une grande vitesse. Ces gouttelettes doivent être suffisamment refroidies avant d'arriver sur les parois de la chambre d'atomisation (Chambre, Rep.1). Ceci pour éviter le collage sur les parois et arriver au fond de la chambre de récolte (Chambre, Rep.8) à l'état solide. Les particules fines entraînées par le gaz sont récupérées à l'aide d'un cyclone (Annexe, Cyclone) à la sortie de la chambre d'atomisation. Pour récupérer le maximum de poudre et avoir un gaz purifier, on peut placer une série de cyclones l'un après l'autre.

Le gaz d'atomisation arrive à la buse sous une haute pression fournie par un compresseur de capacité suffisante assurant l'amenée du gaz sous une pression constante durant toute la période d'atomisation. Le réglage de la pression est assuré par un régulateur de pression placé avant la vanne (Chambre, Rep.15) d'ouverture et fermeture du gaz.

Pour permettre de varier la distance entre la sortie du métal liquide et le point d'impact avec le gaz, la buse est animée d'un mouvement de translation verticale grâce à une crémaillère (Ensemble de déplacement, Rep.5). La lecture de la distance est indiquée sur un cadran (Atomiseur, Rep.10) par une aiguille fixée sur l'axe de la roue dentée (Ensemble de déplacement, Rep.7) qui entraîne la crémaillère. Le déplacement s'effectue manuellement à l'aide d'une manette montée sur l'axe du pignon (Ensemble de déplacement, Rep.8). La rotation de la manette dans le sens horaire fait déplacer la buse vers le haut et la rotation antihoraire vers le bas. Une deuxième crémaillère placée symétriquement à la crémaillère d'entraînement par rapport à l'axe de la buse, assure un déplacement facile de la buse sur l'axe de coulée. Pour permettre de varier le débit du métal liquide, on utilise des entonnoirs avec des diamètres différents (Moule, Rep.4). Le débit varie en fonction de la section du jet.

La taille des particules dépend de l'angle de pulvérisation, pour cela on utilise des buses (Ensemble de déplacement, Rep.4) avec différents angles de pulvérisation.

La température de l'enceinte du four est contrôlée à l'aide d'un thermocouple de type N lié à un indicateur régulateur de température (Atomiseur, Rep.3) fonctionnant en tout ou rien à comportement PID. Cet appareil permet la montée en chauffage libre du four jusqu'à la température de consigne où elle sera maintenue constante jusqu'à l'homogénéisation de la température à travers toute la masse du liquide.

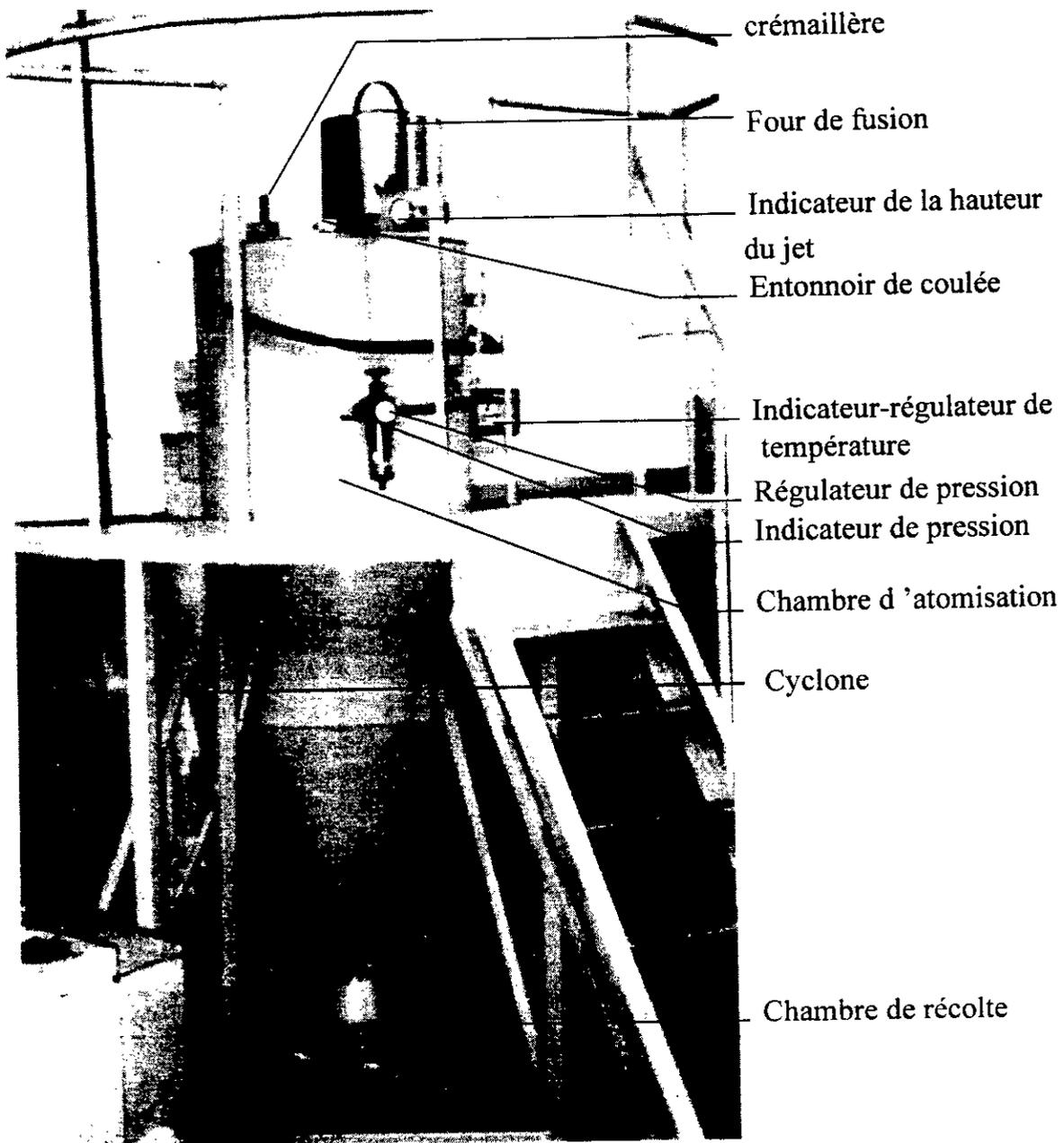


Figure III.1. Vue générale de l'atomiseur.

III.2. Organes constitutifs de l'atomiseur

III.2.1. Four à résistances

Dès 1890, le four électrique fut utilisé en laboratoire. L'absence de flamme, l'utilisation d'une calorie propre conduisant à une atmosphère intéressante, constituait un fait nouveau sur le plan technique [19]. Le four à résistances est sans doute le plus connu et le plus répandu des appareils électrothermiques. Son utilisation industrielle remonte en effet au début des années vingt.

Dans un four à résistances, on peut distinguer les parties suivantes :

- l'élément chauffant solidaire le plus souvent d'un support réfractaire,
- le système de calorifugeage constitué par un produit réfractaire placé dans une enveloppe métallique externe,
- la gaine d'étanchéité éventuelle destinée à placer l'élément chauffant dans une atmosphère convenable et à l'isoler des produits chauffés,
- l'élément sensible de la régulation de la température.

III.2.1.1. Principe

L'alimentation des résistances est assurée soit directement par le réseau, soit par l'intermédiaire d'un ou plusieurs transformateurs. Cette alimentation est associée à un système de modulation de puissance, piloté par une régulation de la température [20].

La puissance électrique P dissipée dans l'élément chauffant de résistance $\mathcal{R}(\Omega)$ et transformée en chaleur s'exprime par la loi de Joule:

$$P = v \cdot \mathcal{I} = \mathcal{R} \cdot \mathcal{I}^2 = \frac{v^2}{\mathcal{R}} \quad (3.1)$$

avec v (V) et \mathcal{I} (A) respectivement valeurs efficaces de la tension et du courant.

III.2.1.2. Transfert de chaleur dans le four

Les liens entre la température et la quantité de chaleur se traduisent par deux types de phénomènes :

- lorsqu'un corps reçoit une certaine quantité de chaleur, sa température s'élève,
- lorsque deux corps sont à deux températures différentes, le plus chaud cède de la chaleur au moins chaud, de sorte que les températures tendent à s'uniformiser ; ce transfert de chaleur peut s'effectuer suivant trois mécanismes :

- la conduction,
- la convection,
- le rayonnement.

Le processus de transfert de la chaleur des résistances à la charge s'effectue par convection et rayonnement. A partir de 700 °C environ la majeure partie de l'échange s'effectue par rayonnement, cela dans le cas des fours à convection naturelle (Fig. III.2) [21].

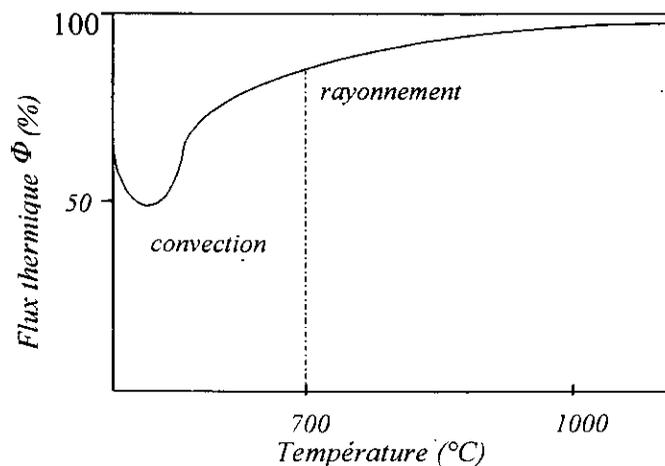


Figure III.2. Répartition (%) du flux thermique ϕ entre rayonnement et convection naturelle en fonction de la température.

a/ Chaleur transmise par rayonnement

La valeur du flux thermique Φ transmise de la résistance à la charge par rayonnement obéit à la loi de Stefan Boltzman.

$$\Phi = \xi \cdot F_{R \rightarrow C} S_R \sigma (T_R^4 - T_C^4) \quad (3.2)$$

Où :

$F_{R \rightarrow C}$: facteur de forme entre la résistance et la charge

S_R : aire de la surface émettrice (m^2)

T_R et T_C : températures absolues de la résistance et de la surface de la charge (K)

ξ : coefficient tenant compte des émissivités de la résistance et de la charge

σ : constante de Stefan [= $5.67 \cdot 10^{-08} \text{ W}/(m^2 \text{ K}^4)$]

*** Conduction de la chaleur à travers les murs**

- cas d'un mur simple (voûte) :

L'analyse de la conduction est basée sur la loi de Fourier qui traduit la relation existante entre le flux de chaleur et le gradient de température, en chaque point d'un corps [22].

$$\mathbf{F} = \lambda \nabla T \quad (3.3)$$

Où :

\mathbf{F} : flux de chaleur par unité de surface,

∇T : gradient de température,

λ : conductivité thermique.

Dans le cas unidimensionnel l'équation (3.3) devient :

$$F = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.4)$$

Avec $F = \frac{\Phi}{S}$, on obtient :

$$\Phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.5)$$

Où :

Φ : flux de chaleur,

S : surface d'échange.

Pour un flux de chaleur constant : $\frac{\partial T}{\partial x} = \text{constante}$, on a :

$$\Phi = \frac{-\lambda S (T_1 - T_2)}{e} \quad (3.6)$$

Avec :

T_1 : température de la surface chaude,

T_2 : température de la surface froide,

e : épaisseur de la paroi.

- Distribution de la température

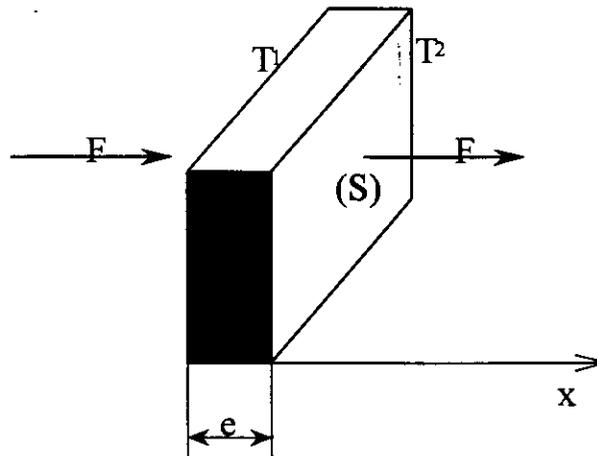


Figure III.3. Distribution de la température

L'équation de la chaleur en coordonnées cartésiennes s'écrit:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \left(\frac{1}{S}\right) \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{P}{\lambda} = 0 \quad (3.7)$$

Dans le cas du régime permanent et unidimensionnel l'expression (3.7) devient:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \Rightarrow \frac{dT}{dx} = \text{Constante}$$

$$\frac{dT}{dx} = C_1 \Rightarrow T = C_1 x + C_2 \quad (3.8)$$

Conditions aux limites :

* en $x = 0$; $T = T_1 \Rightarrow C_2 = T_1$

* en $x = e$; $T = T_2 \Rightarrow T_2 = C_1 e + T_1 \Rightarrow C_1 = \frac{T_2 - T_1}{e}$ (3.9)

Par conséquent :

$$T = x \frac{T_2 - T_1}{e} + T_1 \quad (3.10)$$

- Résistance thermique

$$\Phi = \frac{\lambda S}{e} (T_2 - T_1)$$

Donc par analogie électrique : $I = \frac{U_1 - U_2}{R}$ (3.11)

$$R = \frac{e}{\lambda S} \quad (3.12)$$

- Cas d'une paroi cylindrique composite

De nombreuses enceintes thermiques ont une forme cylindrique, dans le cas de deux surfaces cylindriques concentriques de rayons r_1 et r_2 maintenues respectivement aux températures T_1 et T_2 , le flux de chaleur par unité de longueur s'exprime par :

$$\Phi = 2 \pi \lambda \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (3.13)$$

La résistance thermique par unité de longueur est donc :

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi\lambda} \quad (3.14)$$

Elle peut être exprimée sous forme analogue à celle trouvée pour la paroi plane ; soit :

$$R = \frac{r_2 - r_1}{\lambda S} \quad (3.15)$$

En considérant que:
$$S = \frac{2\pi(r_2 - r_1)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \frac{S_2 - S_1}{\ln S_2 - \ln S_1} \quad (3.15)$$

C'est à dire de prendre pour S la moyenne logarithmique de la surface intérieure et la surface extérieure.

Pour un tube cylindrique composite comprenant n couches ; l'expression du flux thermique par unité de longueur devient alors :

$$\Phi = \frac{T_1 - T_{n+1}}{R} \quad (3.16)$$

avec :

$$R = \sum \frac{\ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)}{2\pi\lambda_i} \quad (3.17)$$

Tel que :

T_1 : la température à l'intérieur de la première couche.

T_{n+1} : la température à l'extérieur de la $n^{\text{ème}}$ couche.

III.2.1.3. Réalisation des parois

Les parois du four sont composées d'un support pour résistance obtenu par moulage de la poudre du kaolin mélangée avec le silicate de soude. La pâte obtenue est appliquée sur un moule en carton imbibé avec de l'huile pour faciliter le décollage après séchage dans une étuve portée à 80°C pendant 12 heures. Le logement des résistances est obtenu par enroulement d'un fil en caoutchouc, dont le diamètre est légèrement supérieur à celui de la spirale(ou de la résistance boudinée). Ceci pour que les résistances puissent se déplacer librement sous l'effet de la dilatation thermique lors du chauffage et de la rétraction lors du refroidissement.

Ce fil est retiré à chaud juste après le séchage, ainsi on obtient le support de la résistance. L'isolation thermique est assurée par une isolation intermédiaire en réfractaire placée entre le support et le calorifugeage en laine de roche.

Pour déterminer les dimensions de l'enceinte et les épaisseurs des parois du four nous devons avoir les données suivantes :

- le flux de chaleur à travers les parois (déperditions thermiques),
- les dimensions du creuset (diamètre et hauteur),
- les conductivités thermiques et les températures maximales d'utilisation (t_0 , t_1 et t_2 présentées sur la figure III.4) des matériaux employés pour la construction des parois.

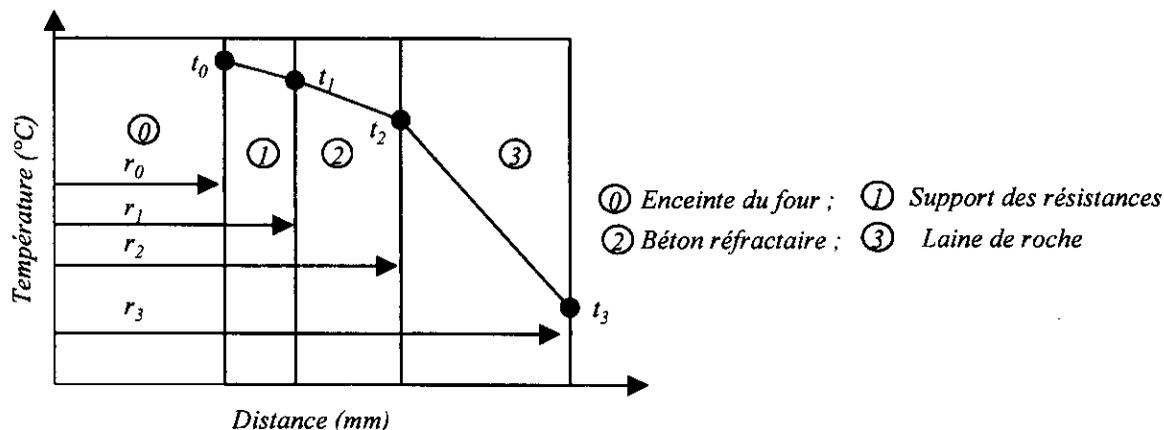


Figure III.4. Répartition de la température dans les parois.

III.2.1.4. Calcul de la puissance d'un four à résistance

L'énergie émise par les éléments chauffants sert à :

- élever la température de la charge à la température désirée,
- chauffer les matériaux constituant l'enceinte,
- compenser les déperditions thermiques du four.

* Energie absorbée par la charge

La quantité de chaleur à fournir à un produit est généralement égale à la somme de la chaleur Q^1 nécessaire pour porter le corps de la température T_1 à une température T_2 sans changement d'état ; cette énergie est de la forme [21] :

$$Q^1 = m c (T_2 - T_1) \quad (3.18)$$

Où :

c: chaleur spécifique.

m: masse de la charge.

T_2 , T_1 : températures finale et initiale du corps à chauffer.

La chaleur latente Q^2 nécessaire au changement d'état :

$$Q^2 = m L \quad (3.19)$$

L étant la chaleur latente de changement d'état.

Si plusieurs changements d'état se produisent, il faut en tenir compte et évaluer la somme des chaleurs sensibles sur les différents intervalles sans changement d'état et des chaleurs latentes.

Lorsqu'il se produit dans le four des réactions chimiques exothermique ou endothermique, l'énergie correspondante vient se retrancher ou s'ajouter aux valeurs calculées précédemment

* *Energie absorbée par les parois*

Cette énergie peut être calculée à partir de la capacité calorifique de chacun des matériaux constituant les parois :

$$Q_p = \sum m_i c_i \Delta T \quad (3.20)$$

m_i et c_i : sont respectivement la masse et la chaleur spécifique du matériau i constituant la paroi.

* *Déperditions thermiques*

L'existence d'un gradient de température entre l'enceinte du four et l'ambiance donne des pertes par conduction thermique à travers les parois, puis par convection à partir des parois extérieures du four. Le calcul de ces pertes se fait en utilisant les lois usuelles de la transmission de la chaleur. L'amélioration de l'isolation thermique permet de ramener ces déperditions à des valeurs très faibles.

* *Rendement des fours*

Bien définir la notion de rendement est absolument indispensable pour évaluer correctement les performances thermiques et économiques des fours à résistances.

* *Rendement électrique* : C'est le rapport $\gamma_1 = \frac{Q_1}{Q}$; l'énergie électrique Q_1 transformée en énergie thermique dans la chambre de chauffage, à l'énergie électrique fournie au four Q . La différence $Q - Q_1$ est égale à la somme des pertes électriques dans les lignes d'amenée de courant ainsi que dans les appareils de transformation de la tension et de réglage (transformateurs, régulateurs...etc).

* *Rendement thermique* : C'est le rapport $\gamma_2 = \frac{Q_2}{Q_1}$ de l'énergie thermique Q_2 emmagasinée en fin de l'opération thermique dans la charge traitée, à l'énergie électrique Q_1 transformée en chaleur dans la chambre de chauffe. La différence $Q_1 - Q_2$ représente les pertes dans le four. γ_2 est un rendement opératoire car il est essentiellement fonction de la constitution et l'utilisation du four. Ce rendement thermique est très élevé dans les fours industriels. Il est environ de 95%.

III.2.2. Eléments chauffants

Pour pouvoir être utilisé comme élément chauffant, un matériau doit répondre à plusieurs conditions dont [20] :

- la résistivité doit être élevée pour limiter l'intensité du courant,
- le coefficient de température α (variation relative de la résistance électrique en fonction de la température) doit être faible,
- la température du solidus doit être très supérieure à la température d'utilisation,
- la résistance mécanique de l'élément doit être suffisante,
- le coefficient de dilatation doit être faible,

- la conductivité thermique et la capacité thermique doivent être faibles pour éviter les pertes de chaleur aux extrémités,
- la substance doit résister aux agents extérieurs,
- l'élément doit avoir une longue durée de vie.

III.2.2.1. Caractéristiques des éléments chauffants

Les principales caractéristiques des éléments chauffants sont données dans le Tableau III.1 ci-après[20]:

Famille	Nature des résistances	Composition	Température maximale d'emploi (°C)	Résistivité ($\mu \Omega\text{-cm}$)
Résistances Métalliques	Nickel - Chrome à faible teneur	18% Ni 12% Cr 70% Fe	600	70 à 80
	Nickel - Chrome teneur intermédiaire	60 % Ni 25 % Cr 15%Fe	1100	100 à 110
	Nickel - Chrome à forte teneur	70 à 80% Ni 30 à 20%Cr	1150 à 1200	110 à 120
	Fe - Cr - Al	20 à 35% Cr 2 à 6% Al le reste Fe	jusqu'à 1350	135 à 145
	Molybdène	100% Mo	1900	50
	Tantale	100% Ta	2200	70
	Tungstène	100% W	2400	50
	Bisiliciure de molybdène	95% Mo Si ₂	1800	35 à 40
Cermets	Chromite de lanthane	La Cr ₂ O ₃	1850	10 ⁶
Résistances non métalliques	Carbure de silicium	CSi 99%	1600	10 ⁵
	Graphite	C 99%	2900	800 à 8000

Tableau III.1. Principales caractéristiques des éléments chauffants.

III.2.2.2. Choix de l'élément chauffant

Parmi les métaux satisfaisants aux conditions précédentes, on choisit naturellement le moins coûteux et le plus disponible. Dans le cas de notre étude, nous choisissons les alliages Fe-Cr-Al contenant 20 à 30% de Cr, 2 à 6% Al ; le reste étant constitué de Fer et des éléments d'addition en faibles proportions. Par ailleurs, les caractéristiques d'une gamme de résistances Fe-Cr-Al sont présentées dans le tableau III.2 ci-après:

Caractéristiques	Composition		
	Cr 22 - Al 5.5 - Fe	Cr 22 - Al 5 - Fe	Cr 22 - Al 4.5 - Fe
Densité	7,1	7,15	7,25
Température maximale en régime permanent (°C)	1375	1330	1280
Résistivité à 20 °C ($\mu \Omega\text{-cm}$)	145	139	135
Coefficient moyen 10 ⁻⁶ /°c	40	60	70
Point de fusion	1500 environ		
Chaleur spécifique à 20 °C (Wh/Kg.°C)	0.13		

Tableau III.2. Caractéristiques des résistances Fe-Cr-Al.

La protection des résistances Fe-Cr-Al est assurée par une couche superficielle d'oxydes se formant par réaction entre les métaux composant ces alliages et l'oxygène de l'air (oxyde de Cr et d'Al). Cette couche adhère fortement à la surface des éléments chauffants et empêche une oxydation ultérieure.

A température élevée, (>1100°C), la protection est essentiellement due à la pellicule d'alumine ; les éléments chauffants sont susceptibles donc de résister à la corrosion dans les atmosphères oxydantes.

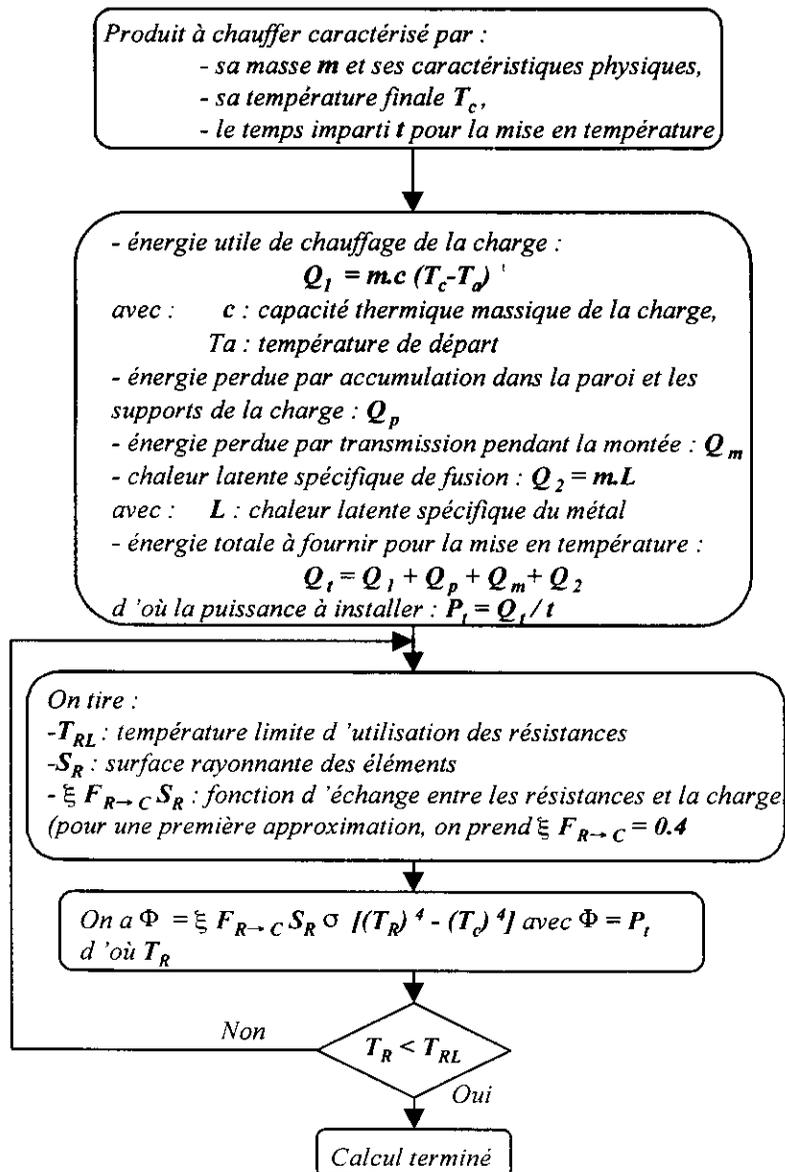
III.2.2.3. Les raisons d'endommagements des éléments chauffants

L'examen des éléments chauffants détériorés a amené les constatations suivantes [23] :

- les ruptures de résistors se produisent fréquemment aux endroits où l'enroulement du fil a un pas faible (tendance à la surchauffe),
- de nombreuses ruptures résultent de l'alternance dilatation – rétraction,
- certains types de logements (ou certaines dispositions des éléments) facilitent la détérioration (un enroulement des spires suffisant, espacé et régulier a un rôle bénéfique),
- le dépôt des poussières conductrices sur le fil peut causer des microfissures locales ou fusion totale avec coupure du fil,
- la corrosion locale d'élément chauffant peut provenir de composants chimiques des réfractaires incompatibles avec la nature du fil,
- l'affaissement d'un élément chauffant sur une longueur notable est révélateur de surchauffe.

III.2.3. Organigramme de calcul de la température et de la puissance du four

On peut schématiser le déroulement du calcul par l'organigramme suivant :



III.2.4. Les couples thermoélectriques

III.2.4.1. Principe physique de l'effet thermoélectrique

Lorsque deux métaux ou alliages différents sont reliés entre eux à une extrémité, et que cette dernière est chauffée (ou refroidie), il apparaît entre les bornes du couple ainsi constitué, une force électromotrice (f.e.m) ; celle-ci est mise en évidence lorsqu'on relie le couple à un appareil de mesure. Elle dépend de la différence de température existante entre la jonction des deux métaux appelée communément soudure chaude et les bornes du couple constituant la soudure froide (ou soudure de référence).

III.2.4.2. Différents types des couples thermoélectriques

Un grand nombre de combinaisons de deux éléments instrumentaux ; sous la forme de métaux purs, d'alliages métalliques ou semi-conducteurs, de composés non métalliques, a été envisagé en vue d'obtenir des couples thermoélectriques. La nécessité de mesure soit des températures voisines du zéro absolu, soit des températures élevées (jusqu'aux environ de 3000°C) [24] a orienté les recherches vers des matériaux spéciaux.

a- Couple Chromel-Alumel (type K)

Son domaine d'utilisation est assez étendu de 160 à 1375°C. leur courbe f.e.m en fonction de la température est presque une droite.

Ce couple résiste bien à l'oxydation et constitue l'un des meilleurs capteurs usuels de température. Il permet des mesures continues vers 1200°C. Il se détériore rapidement à chaud en présence d'atmosphère contenant de l'hydrogène, du soufre ou du monoxyde de carbone.

b- Couple Chromel-Constantan (type E)

Il montre une très grande stabilité surtout aux moyennes températures de -30°C à 316°C. Sa précision est de $\pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à 870°C.

c- Couple Platine 10% Rhodium - Platine (Type S)

Appelé couple de "LE CHATELIER", il est le plus important et le plus utilisé pour les atmosphères inertes. Sa stabilité en atmosphère en fait de lui le meilleur instrument de mesure. Il convient parfaitement pour les mesures précises de température entre 900 et 1200°C dans l'air ; sous vide ou sous atmosphère contrôlée.

d- Couple platine 13% Rhodium - Platine (Type R)

Ce couple tend à remplacer le couple de type S. Il fut introduit dès 1922 aux U.S.A, où la qualité du couple de Le Chatelier était controversée. Actuellement les couples de type R équipent de nombreux appareils dans les pays anglo-saxon. Les domaines de température d'utilisation restent les mêmes que ceux de type S, mais plus de teneur en rhodium dont l'élément positif conduit à une augmentation sensible du pouvoir thermoélectrique.

e- Couple Nicrol - Nisil (Type N)

Nicrol (+) : 14.2%Cr ; 1.4%Si et le reste du Ni

Nisil (-) : 4.4%Si ; 0.1%Mg et le reste du Ni

Ce nouveau thermocouple possède une remarquable stabilité thermoélectrique qui est comparable à celle des thermocouples à base de platine. Il est en effet peu sensible aux phénomènes d'oxydation à haute température. Il convient parfaitement pour les mesures précises de température entre 900 et 1200 °C dans l'air ; sous vide ou sous atmosphère contrôlée. Il peut atteindre 1300°C sans dégradation. Sa sensibilité de 39 $\mu\text{v}/^\circ\text{C}$ à 900°C est très voisine de celle du couple K (41 $\mu\text{v}/^\circ\text{C}$) [10].

III.2.4.3. Choix du thermocouple

Le choix du thermocouple doit s'effectuer en fonction de plusieurs facteurs : la zone de température, la nature de l'atmosphère environnante (inerte, oxydante, réductrice), le pouvoir thermoélectrique, la linéarité de la courbe température - force électromotrice dans le domaine de travail... etc.

Un second choix est ensuite nécessaire, il porte sur la sélection du fil. Les fils doivent en général présenter des diamètres inférieurs à 1 mm (0,5 mm est couramment utilisé). L'emploi de fils nus limite l'encombrement du capteur de température et diminue la température maximale d'utilisation. Par contre les fils de gros diamètre présentent un avantage mécanique mais introduisent des pertes par conductivité thermique et atténuent l'importance des phénomènes thermiques enregistrés.

Vue les caractéristiques du four conçu ; température d'utilisation maximale des résistors 1350°C, l'atmosphère environnante (inerte, oxydante, réductrice), le thermocouple N répond à ces exigences et disponible. Alors notre choix est porté sur ce dernier.

III.2.5 Schéma électrique du four

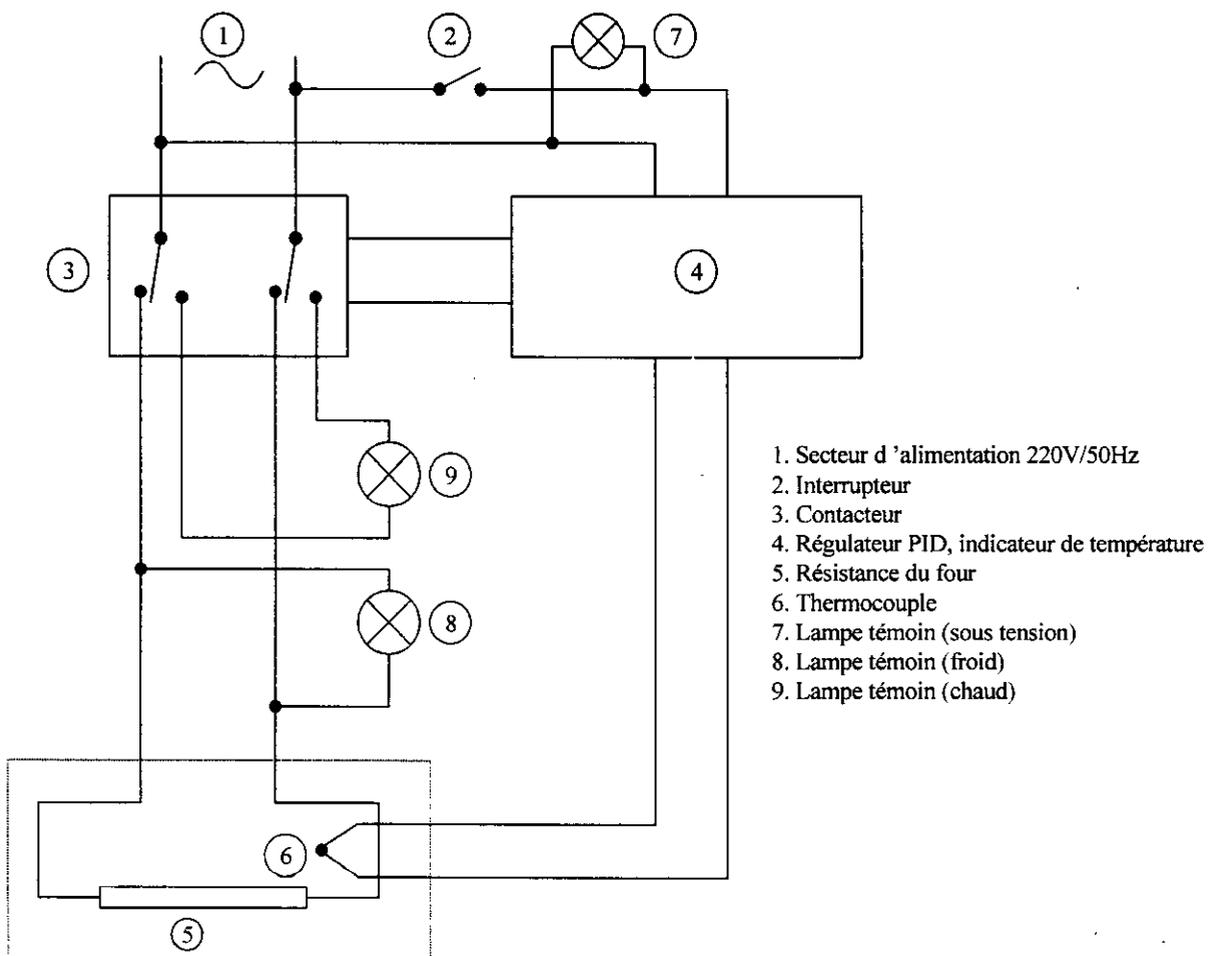


Figure III.5. Schéma électrique du four.

III.3. Conception de la buse

III.3.1. 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 [25]. Dans ce cas on peut écrire :

$$\frac{V^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho} = \text{Cte} \quad (3.21)$$

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.

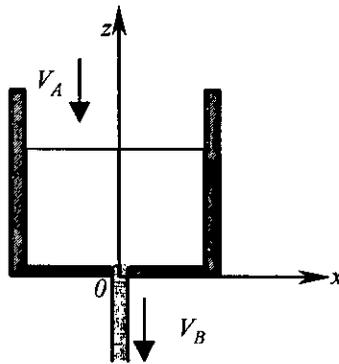


Figure III.5. Jet libre d'un métal liquide.

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 :

$$\rho B V_B = \rho A V_A \Rightarrow V_B = V_A \frac{A}{B} \quad (3.22)$$

Avec :

- 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

$$\frac{P_A}{\rho} + \frac{V_A^2}{2} + gH_A = \frac{P_B}{\rho} + \frac{V_B^2}{2} + gH_B \quad (3.23)$$

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

$$V_A = \left(\frac{2gH}{\left(\frac{A}{B}\right)^2 - 1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.24)$$

et

$$V_B = \left(\frac{2gH}{1 - \left(\frac{B}{A}\right)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.25)$$

Avec la variation de la masse : $dm = -dh \rho A$, il vient que : $A dV_A \rho = -dh A \rho = \rho B dV_B$.

$$-A \frac{dh}{dt} = BV_B \Rightarrow -\frac{dh}{dt} = \frac{B}{A} \left(\frac{2gH}{1 - \left(\frac{B}{A}\right)^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{dh}{dt} = - \left(\frac{2gh}{\left(\frac{A}{B}\right)^2 - 1} \right)^{\frac{1}{2}} \Rightarrow dh(h)^{-\frac{1}{2}} = -dt \left(\frac{2g}{\left(\frac{A}{B}\right)^2 - 1} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Après intégration on obtient :

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

à $t = 0$; $h = H \Rightarrow C = H^{\frac{1}{2}}$

$$h(t) = \frac{1}{4} \left[- \left(\frac{2g}{\left(\frac{A}{B}\right)^2 - 1} \right)^{\frac{1}{2}} t + H^{\frac{1}{2}} \right]^2 \quad (3.26)$$

Si la vitesse $V_A = 0$ on applique la formule de Toricelli : $V_B = (2gH)^{\frac{1}{2}}$

III.3.2. Calcul des paramètres de la chambre d'atomisation

III.3.2.1. 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 III.6 montre la désintégration du liquide par l'air et les composantes des vitesses du métal, de l'air et du mélange.

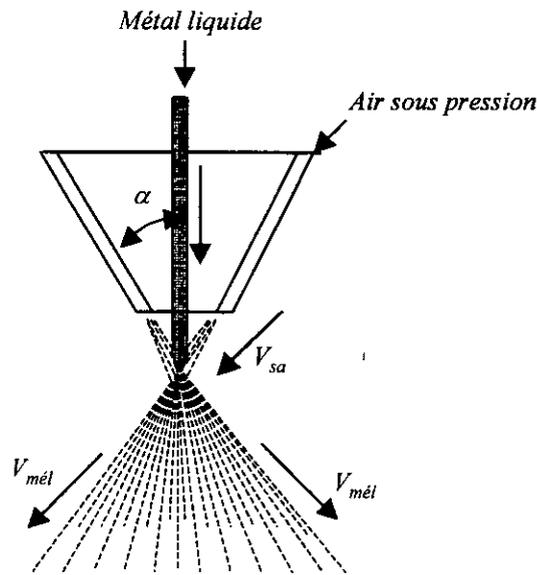


Figure III.6. Pulvérisation du métal liquide par l'air.

Pour cela on applique le principe de conservation de la quantité de mouvement qui donne aux points d'impact [26] :

Impulsion initiale (métal liquide) + Impulsion du gaz = Impulsion finale.

La vitesse du mélange selon l'axe vertical z:

$$A_a V_{sa} \cos \alpha + A_l V_l = (A_a + A_l) (V_{mel})_z \quad (3.27)$$

d'où

$$(V_{mel})_z = \frac{A_a V_{sa} \cos \alpha + A_l V_l}{A_a + A_l} \quad (3.28)$$

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 x on a : $A_a V_{sa} \sin \alpha = (A_a + A_l) (V_{mel})_x$

D'où :

$$(V_{mel})_x = \frac{A_a V_{sa} \sin \alpha}{A_a + A_l} \quad (3.29)$$

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_{mel} :

$$V_{mel} = \left[(V_{mel})_x^2 + (V_{mel})_z^2 \right]^{1/2}$$

$$V_{\text{mél}} = \left(\frac{(A_a V_{sa} \cos \alpha + A_l V_l)^2 + (A_a V_{sa} \sin \alpha)^2}{(A_a + A_l)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.30)$$

III.3.2.2. Calcul des dimensions de la chambre d'atomisation (rayon et hauteur)

Ces dimensions sont fonction du temps de solidification (équation 2.12), de la vitesse des gouttelettes (équation 3.30) 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 :

$$\text{Le rayon : } R = V_{\text{mél}} \tau_{\text{sol}} \sin \alpha \quad (3.31)$$

$$\text{La hauteur : } H = V_{\text{mél}} \tau_{\text{sol}} \cos \alpha \quad (3.32)$$

III.3.2.3. calcul de la température du mélange gaz-gouttelettes

au point d'impact, l'équation d'énergie donne :

$$A_a C_{p_a} T_0 + A_l C_{p_l} T = (A_a + A_l) C_{p_{\text{mél}}} T'$$

Avec :

- C_{p_a} : chaleur spécifique du gaz
- T_0 : température du gaz
- A_l : débit massique du métal liquide
- C_{p_l} : chaleur spécifique du métal liquide
- T : température du métal liquide
- $C_{p_{\text{mél}}}$: chaleur spécifique moyenne du mélange
- $C_{p_{\text{mél}}} = X_1 C_{p_l} + X_2 C_{p_a}$
- $X_1 = A_l / (A_a + A_l)$
- $X_2 = 1 - X_1$

On obtient la température des particules selon l'équation suivante :

$$T' = \frac{A_a C_{p_a} T_0 + A_l C_{p_l} T}{(A_a + A_l) C_{p_m}} \quad (3.33)$$

III.4. 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 [27].

*** Calcul du cyclone**

Les dimensions d'un cyclone standard sont représentées sur la figure III.7.

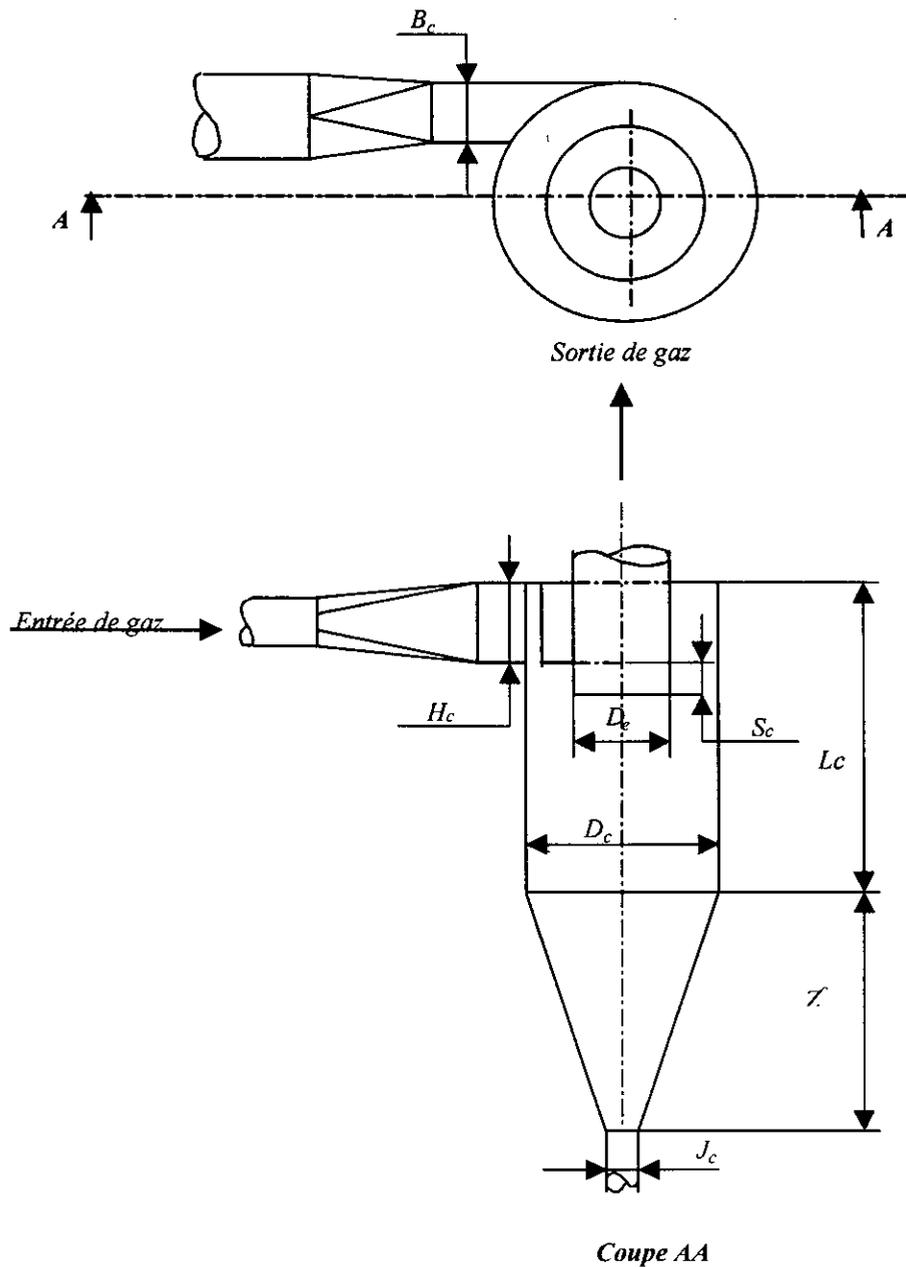


Figure III.7. Schéma d'un cyclone standard.

Soit Q_g le débit de gaz ; la vitesse à l'entrée du cyclone s'écrit [26]:

$$V_c = \frac{Q_g}{B_c H_c} \quad (3.33)$$

comme $H_c = 2B_c$, alors :

$$V_c = \frac{Q_g}{2B_c^2} \quad (3.35)$$

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

$$d_{pmin}^2 = \frac{9\mu_g B_c}{5\pi V_c (\rho_s - \rho_g)} \quad (3.36)$$

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

$$d_{pmin}^2 = \frac{9\mu_g D_c^3}{160\pi Q_g (\rho_s - \rho_g)} \quad (3.37)$$

$$D_c = \left(\frac{16\pi Q_g (\rho_s - \rho_g) d_{pmin}^2}{0,9\mu_g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.38)$$

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

$$B_c = \frac{D_c}{4}$$

$$D_e = H_c = \frac{D_c}{2}$$

$$L_c = Z_c = 2D_c$$

$$S_c = \frac{D_c}{8}$$

$$J_c \approx B_c$$

CHAPITRE IV

MISE EN SERVICE DE L'ATOMISEUR, ÉLABORATION ET CARACTÉRISATION DE LA POUDRE OBTENUE

IV.1. Introduction

La mise au point de l'atomiseur en vue d'un fonctionnement adéquat a consisté, d'une part, à vérifier les performances du four conçu (montée en température, refroidissement et maintien à des températures constantes); et d'autre part à étudier l'influence des paramètres d'atomisation, sur la microstructure, la taille et la forme des particules obtenues. ces paramètres sont : la pression d'air adoptée, la température du métal liquide, l'angle de pulvérisation, la hauteur du jet et le débit du métal liquide.

IV.2. Mise en service et exploitation du four

IV.2.1. Mise en service

Les parties réfractaires du four comportent :

- des éléments moulés constituant l'enceinte et assurant la rigidité du four (support des résistors, sole et couvert),
- des parois ayant un rôle de remplissage et d'isolement (constituée de béton réfractaire et de laine de roche); elles absorbent des quantités appréciables de vapeur d'eau, notamment quand l'état hygrométrique de l'air est élevé.

Afin de réaliser un bon séchage, nous avons opté pour un chauffage étagé : nous avons commencé par chauffer le four à une température maximale de 100 °C, (suffisante pour faire disparaître la vapeur d'eau), puis effectué une montée en température par paliers successifs de 200°C et 300°C.

Une fois le four bien sec, on élève progressivement la température à 500, 750 et 1000°C. En procédant ainsi, on assure à la fois :

- la mise en place des éléments réfractaires moulés,
- l'oxydation préalable des résistors Fe-Cr-Al,
- le séchage de l'ensemble des réfractaires.

En outre, le démarrage du four est effectué sous puissance réduite ; ce processus évacue l'humidité et évite aux résistors des ruptures aux démarrages à pleine puissance.

La courbe de montée en température (de l'ambiante à 1000°C) d'un four froid est une caractéristique importante qui sert à prédéterminer, selon les températures choisies, les temps d'utilisation. Ces données facilitent la préparation du travail et le calcul du prix de revient d'une fusion.

IV.2.2 Chauffage et refroidissement du four

La figure IV.1 montre la montée en température et le refroidissement, en fonction du temps, du four contenant une charge de 200g de plomb dans un creuset taré à 128g. La charge de plomb a été portée à une température de 700°C avec une puissance réduite du four.

Pendant le chauffage, nous avons enregistré le temps et la température correspondante : au début, étant données les faibles déperditions thermiques et la puissance constante, le chauffage est rapide, nous avons considéré un pas de temps d'une minute jusqu'à la température de 250°C à partir de laquelle, le chauffage devient relativement lent. Nous sommes passé, alors, à un pas de temps de cinq minutes jusqu'à une température de 700°C à partir de laquelle, on éteint le four et on enregistre son refroidissement jusqu'à la température ambiante.

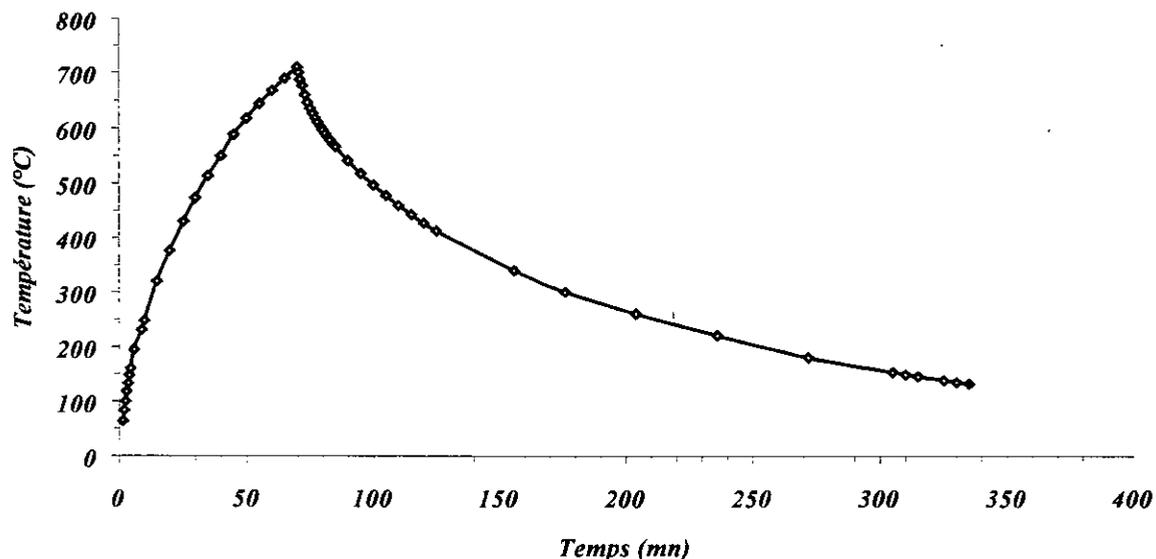


Figure IV.1. Montée en température et refroidissement, en fonction du temps, du four conçu.

Cette courbe permet de déterminer les temps de montée et de refroidissement du four quelle que soit la température.

IV.2.3. Maintien de la température

Le maintien de la température, (figure IV.2), a été effectué à différentes températures croissantes (100, 200, 300 et 700°C).

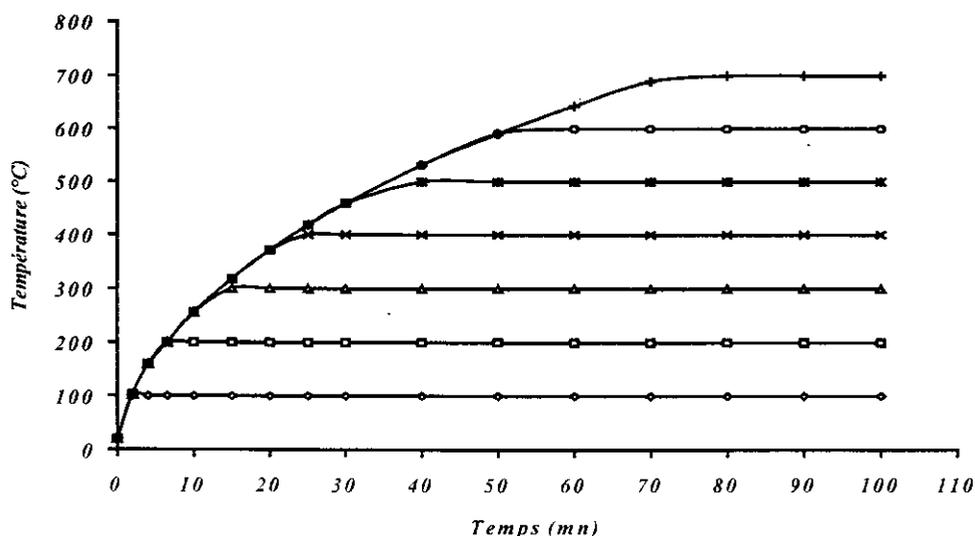


Figure IV.2. Paliers de maintien aux différentes températures.

Pendant le maintien, nous avons enregistré les températures maximale et minimale d'oscillation autour de la température de consigne ainsi que la période d'oscillation. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV.1.

Température de consigne (°C)	100	200	300	400	500	600	700
Température maximale (°C)	100.25	200.18	300.3	400.6	501	601	701
Température minimale (°C)	99.75	199.82	299.7	399.4	499	599	699
Période d'oscillation (s)	40	18	15	16	19	20	17

Tableau IV.1. Variation de la température lors du maintien.

Ces résultats permettent de déterminer :

- le temps de chauffage pour atteindre la température de consigne choisie,
- le temps de passage d'une température à une autre,
- l'énergie nécessaire pour effectuer cette opération.

IV.3. Elaboration des poudres

IV.3.1. Matériau utilisé

Le plomb présente des caractéristiques convenables pour effectuer des études sur l'atomisation (densité élevée, basse température de fusion, tableau IV.2). Aussi, avons-nous choisi un alliage de plomb - antimoine (tableau IV.3).

Caractéristiques	Masse volumique (g/cm ³)	Tension superficielle (N/m)	Viscosité (mPa.s)	Capacité thermique massique (J.g ⁻¹ .K ⁻¹)
Valeurs à 500°C	10.44	0.44	1.8	0.138

Tableau IV.2. Caractéristiques physiques du plomb à 500°C.

%Sb	%Sn	%Pb
3.17	0.6	Base

Tableau IV.3. Composition de l'alliage Pb-Sb utilisé dans les essais (%en masse).

IV.3.2. Déroulement des essais

Tous les essais présentés ci-après ont été effectués sous différentes conditions d'atomisation. Après avoir porté une charge de 200g de plomb à la température de chauffage choisie, avec une vitesse de chauffage libre, maintenue à cette température jusqu'à son homogénéisation à travers toute la masse de la charge, on procède à l'atomisation. La coulée du métal liquide se fait à travers un entonnoir de diamètre variable, (2, 3, 4, 5 ou 6mm), selon le débit métallique à étudier. L'entonnoir, en matériau réfractaire, est placé au dessus de la buse annulaire de pulvérisation selon un angle choisi, (20, 30 ou 45°), et centré sur l'axe de la buse afin que le jet passe par le point d'impact (métal liquide-gaz).

La désintégration du liquide est obtenue par air comprimé. Celui-ci arrive à partir d'un compresseur dont le réservoir de 2000 litres se trouve sous une pression de 8 bars, assurant l'alimentation en air durant toute la période d'atomisation. La pression dans le réservoir 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_p telle que $P_p < P_r$.

L'arrivée de l'air à la buse est assurée par une vanne placée entre le régulateur de pression et les conduites d'alimentation de la buse en air. Ce dernier arrive à la buse dans des conduites parallèles, tangentes à la paroi intérieure de la buse et au sens opposé formant, ainsi un couple de rotation de l'air à l'intérieur et à la sortie de la buse. La turbulence créée par ce mouvement au point d'impact donne une trajectoire hélicoïdale des gouttelettes après désintégration leur permettant de se solidifier avant d'arriver sur la paroi de la chambre.

Lors de l'atomisation, les particules relativement grosses tombent au fond de la chambre dite de récolte. Les plus fines sont entraînées par l'air et récupérées par le cyclone placé à la sortie de la chambre d'atomisation.

Une fois la coulée terminée, on ferme la vanne et on récupère la poudre obtenue dans la chambre de récolte.

La poudre obtenue doit, par la suite, être caractérisée par l'étude de la forme des particules, la microstructure, la détermination des diamètres moyens et la distribution de taille. Nous allons présenter, dans ce qui suit, les méthodes de caractérisation utilisées.

IV.4. Caractérisation de la poudre obtenue

IV.4.1. Introduction

La poudre produite doit être caractérisée par la détermination de la distribution des diamètres des particules. Souvent il y a une variation de la sphéricité des particules solides et on doit spécifier les paramètres liés à la forme afin de caractériser cette poudre.

Lorsque les particules sont sphériques, la définition de leur diamètre est précise. Cependant, dans la poudre, les particules sont rarement des sphères parfaites ; la variation de sphéricité est, dans de nombreuses applications, recherchée.

Plusieurs techniques fournissent des mesures entièrement différentes caractérisant les particules non sphériques. Elles donnent, également parfois, des diamètres moyens complètement différents.

IV.4.2. Méthodes de caractérisation

IV.4.2.1 Analyse granulométrique

IV.4.2.1.1 Tamisage

L'analyse granulométrique sert à déterminer la distribution, en poids, des particules de poudre selon leurs dimensions par tamisage. La poudre est séparée en fractions granulaires définies par le côté de la maille carré du tamis.

Les résultats de l'analyse granulométrique, traduits en courbe, permettent de prévoir certaines propriétés de la poudre (aptitude au comptage, utilisation en couche filtre, ...).

Le tamisage consiste à fractionner, au moyen d'une série de tamis, la poudre en plusieurs catégories décroissantes de grains. On appelle tamisât la poudre qui passe. Les poids des différents refus sont rapportés au poids initial de la poudre ; les pourcentages ainsi obtenus servent à l'établissement de la courbe granulométrique.

Cette courbe granulométrique est établie en portant sur un graphique semi-logarithmique :

- en ordonnées (échelle arithmétique) les pourcentages des refus (ou des tamisât) cumulés,
- en abscisses (échelle arithmétique) les dimensions des tamis.

Cette méthode est une technique courante pour une analyse rapide des tailles des particules, mais les tailles des mailles ne peuvent pas aller à des valeurs très faibles. Par conséquent le tamisage est souvent appliqué pour les particules de taille supérieure à 38 μm [9].

L'analyse par tamisage commence avec une pile de tamis d'ouvertures décroissantes. Le tamis dont les ouvertures sont plus petites se trouve en bas de la pile et la poudre est chargée dans le tamis le plus haut (figure IV.3). Une fois la colonne est chargée on actionne le vibrateur pendant 15 min. Un échantillon de 200g est suffisant quand on utilise des tamis de 20 cm de diamètre. Après vibration les quantités de poudre dans chaque tamis sont pesées et le pourcentage est calculé pour chaque fraction de la taille. Les résultats obtenus sont utilisés pour tracer les courbes de distribution des tailles des particules.

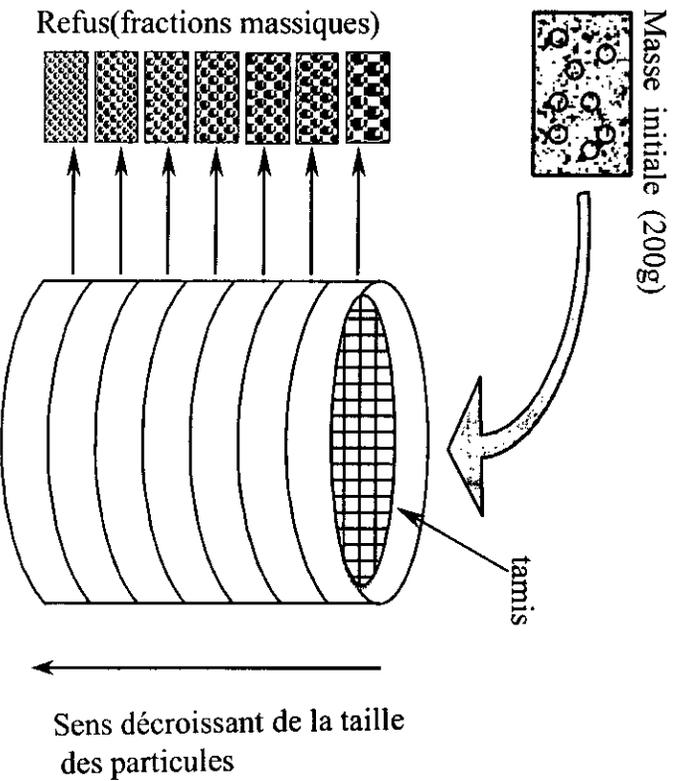


Figure IV.3. Schéma descriptif du tamisage.

IV.4.2.1.2. Analyse microscopique

Comme l'analyse par tamisage ne peut être utilisée pour des tailles de poudre inférieures à 38 μm , on peut utiliser la microscopie comme méthode d'analyse de ces particules en utilisant le microscope électronique à balayage (MEB). La profondeur large du champ dans le MEB est un avantage important surtout parce qu'il permet de visualiser la topographie en surface et la microstructure. En faisant le compte par microscopie du diamètre, de la longueur, de la hauteur ou de la surface des particules, on peut générer une distribution de taille.

Comme le tamis le plus fin de la tamiseuse que nous avons utilisée est de $50\mu\text{m}$, la méthode que nous allons présenter a été utilisée seulement pour les particules dont le diamètre maximal est inférieur à cette ouverture.

La taille de chaque particule de poudre est caractérisée par son diamètre D et sa géométrie (forme de la particule); elle dépend également de la technique utilisée pour sa mesure.

On postule que les particules sont homogènes et sphériques avec une densité ρ_m de métal solide. La technique de mesure est basée sur la mesure du diamètre de chacune des n particules obtenues à partir d'une image de l'échantillon à analyser. Lorsqu'on analyse les particules dans un échantillon, ce dernier doit être représentatif de toute la poudre.

Souvent, la masse ou le volume des particules exprimés en fonction du diamètre est beaucoup plus intéressant que le nombre de distribution. Pour notre supposition le volume v_i et la masse m_i de la $i^{\text{ème}}$ particule sont:

$$v_i = \frac{\pi}{6} d_i^3 \quad \text{et} \quad m_i = \rho_m v_i$$

Où d_i est le diamètre de la $i^{\text{ème}}$ particule mesurée

Dans une masse de poudre donnée contenant n particules, le volume total est :

$$v = \frac{\pi}{6} \sum_{i=1}^{i=n} d_i^3 \quad \text{et la masse} \quad m = \rho_m \frac{\pi}{6} \sum d_i^3$$

La relation qui lie la masse au nombre des particules est donnée par :

$$n = \frac{6m}{\pi d_{50}^3 \rho_m}$$

Le pourcentage d'une plage de taille donnée est le rapport de la masse des particules contenues dans cette plage à la masse totale.

Les résultats obtenus par cette technique sont rapportés à ceux obtenus par tamisage de manière à établir les distributions de taille des différents échantillons analysés.

IV.5 Etude de l'influence des différents paramètres d'atomisation sur la taille et la forme des particules

IV.5.1. Influence de la température du métal liquide sur la taille des particules

La figure IV.4 représente les courbes de distribution de taille cumulée de la poudre pulvérisée à des températures de 600, 550, 500 et 450°C. Les autres paramètres étant constants : pression d'air de 5bars ; angle de buse de 30° ; diamètre du jet de 3mm ; hauteur du jet de 30mm.

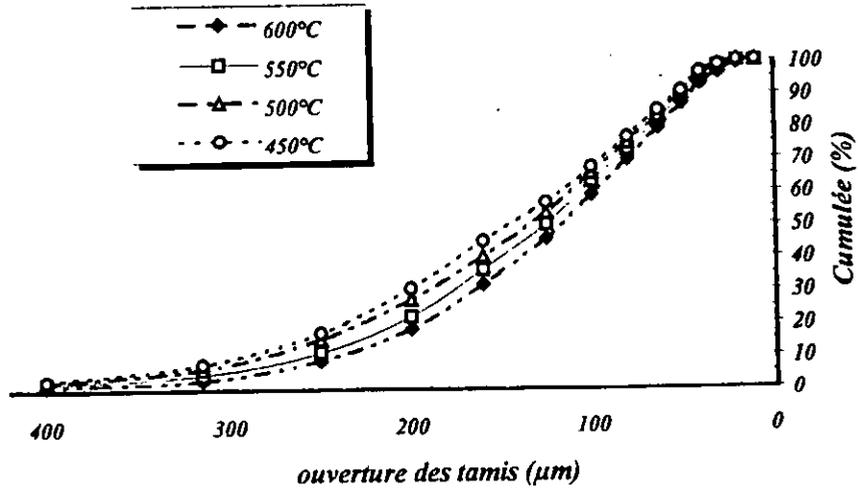
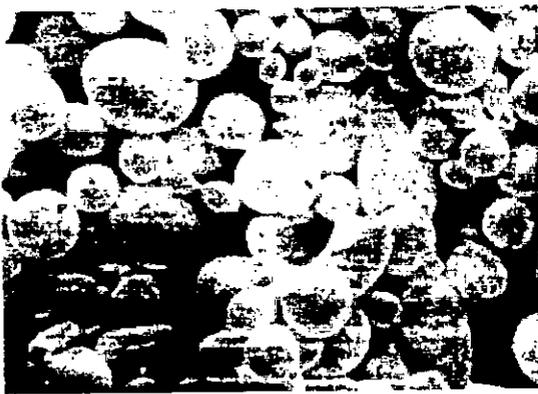
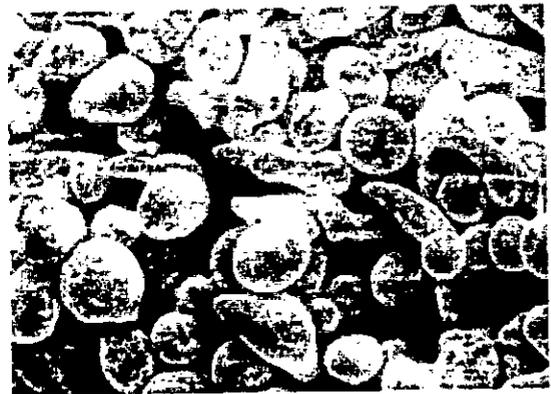


Figure IV.4. Influence de la température d'atomisation sur la distribution de taille des particules.



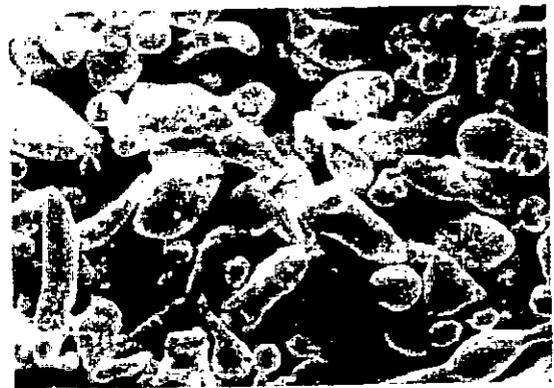
T = 600°C



T = 550°C



T = 500°C



T = 450°C

Figure IV.5. Images MEB des particules dont le diamètre maximal du ligament est inférieur à 50 μm . G : 170X

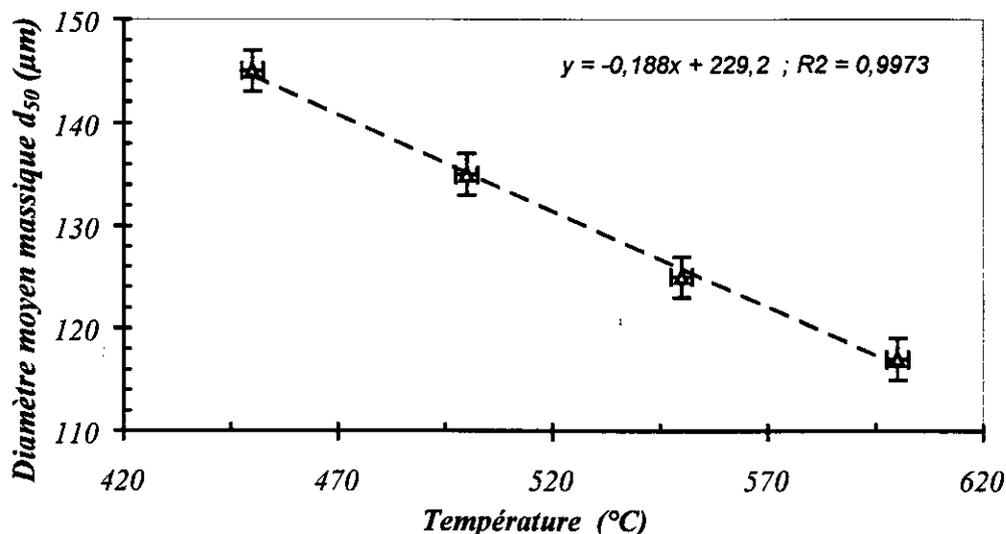


Figure IV.6. Variation du diamètre moyen des particules en fonction de la température d'atomisation.

IV.5.2. Influence de l'angle de pulvérisation sur la taille des particules

Les courbes de la figure IV.7 montrent la distribution de taille de la poudre pulvérisée sous des angles de 20, 30 et 45° avec les paramètres constants suivants : pression d'air de 5bars ; température du métal liquide de 500°C ; diamètre du jet de 3mm ; hauteur du jet de 30mm.

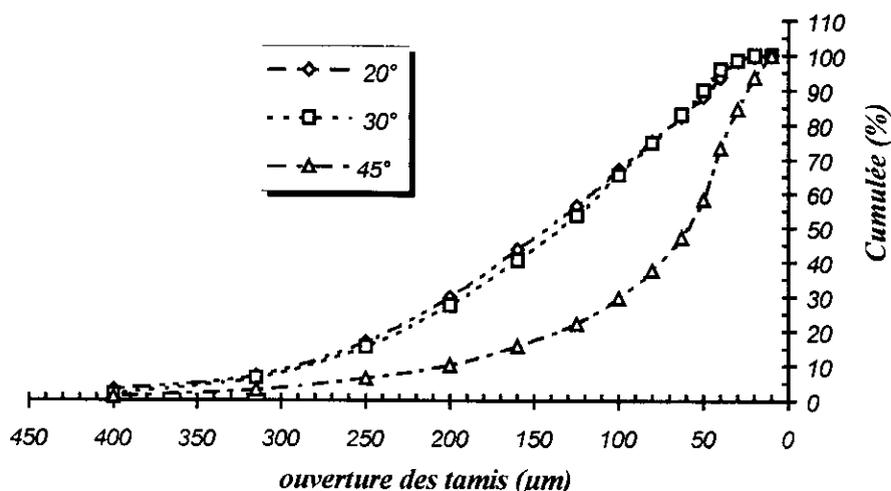


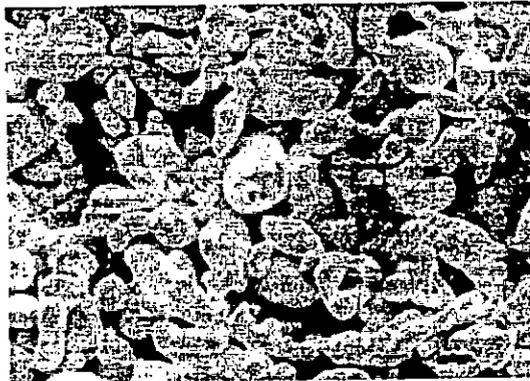
Figure IV.7. Influence de l'angle de pulvérisation sur la distribution de taille des particules.



$\alpha = 20^\circ$



$\alpha = 30^\circ$



$\alpha = 45^\circ$

Figure IV.8 : Images MEB des particules dont le diamètre maximal du ligament est inférieur à $50\mu\text{m}$. G : 170X

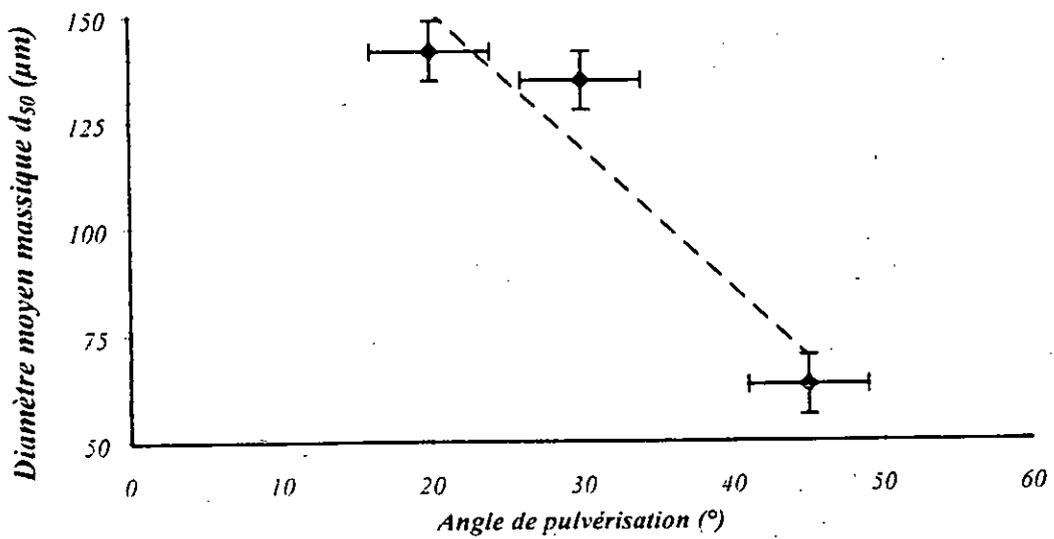


Figure IV.9. Variation de la taille des particules en fonction de l'angle de pulvérisation.

IV.5.3. Influence de la pression de pulvérisation sur la taille des particules

Les courbes ci-dessous représentent la distribution de taille de la poudre pulvérisée sous des pressions de 4.5, 4, 3.5 et 3bars avec les paramètres constants suivants : angle de buse de 30° ; température du métal liquide de 500°C ; diamètre du jet de 3mm ; hauteur du jet de 30mm.

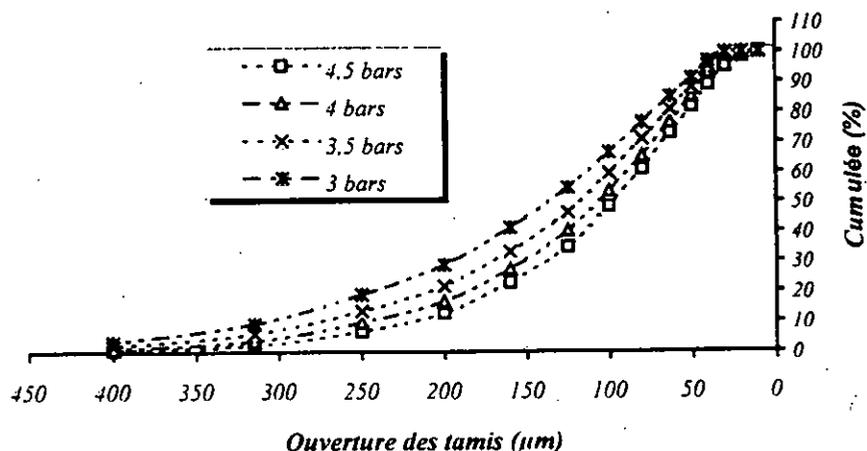


Figure IV.10. Distribution de taille des particules obtenues sous différentes pressions.



P = 4,5 bars



P = 4 bars



P = 3,5 bars



P = 3 bars

Figure IV.11. Images MEB des particules dont le diamètre maximal du ligament est inférieur à 50 µm (G : 170X).

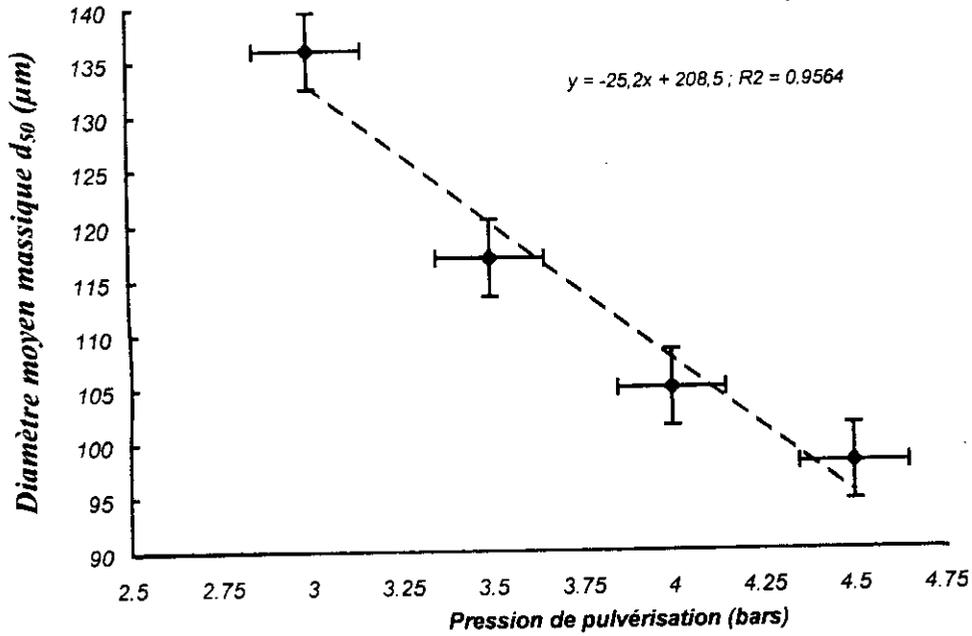


Figure IV.12. Variation du diamètre moyen en fonction de la pression de pulvérisation.

IV.5.4. Influence du diamètre du jet liquide sur la taille des particules

Ces courbes représentent la distribution de taille cumulée de la poudre pulvérisée avec un diamètre du jet liquide de 5, 4, 3, et 2mm avec les paramètres constants suivants : pression de l'air $P = 5\text{bars}$; température du métal liquide $T = 500^\circ\text{C}$; angle de la buse $\alpha = 30^\circ$; hauteur du jet $h = 30\text{mm}$.

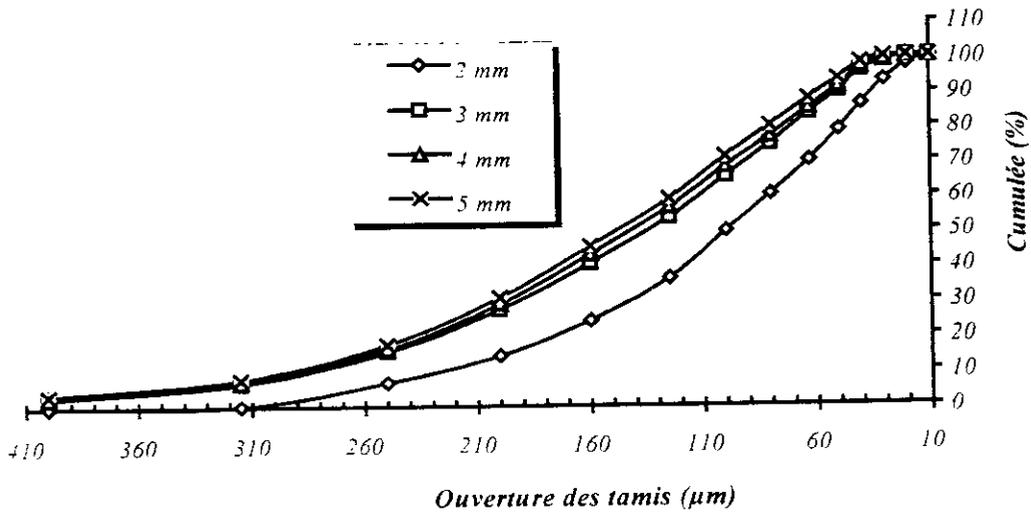
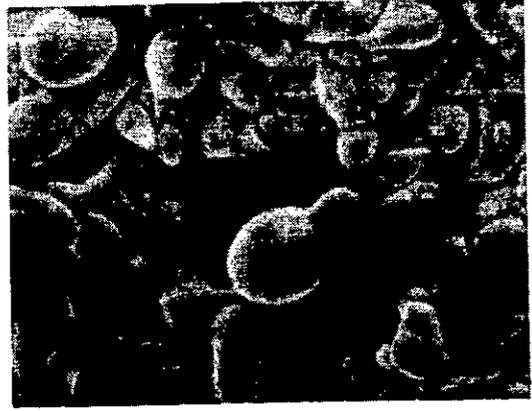


Figure IV.13. Distribution de taille avec différents diamètres du jet liquide.



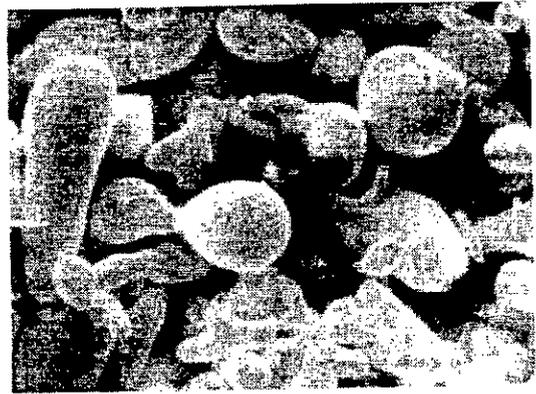
D = 2 mm



D = 3 mm



D = 4 mm



D = 5 mm

Figure IV.14. Images MEB des particules dont le diamètre maximal du ligament est inférieur à 50 μm . G : 170X

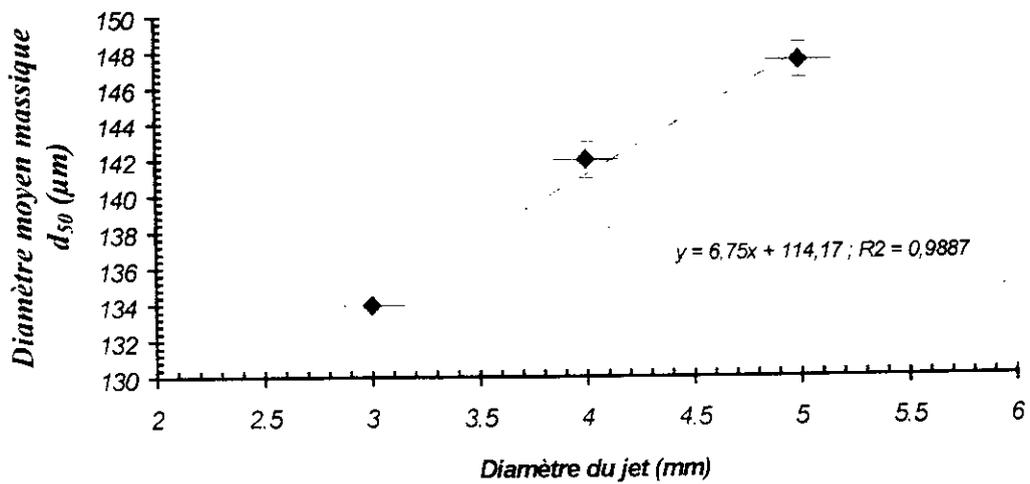


Figure IV.15. Variation du diamètre moyen massique d_{50} en fonction du diamètre du jet.

V.5.5. Influence de la hauteur du jet sur la taille des particules

Ces courbes représentent la distribution de taille cumulée de la poudre pulvérisée à des hauteurs (distance entre la sortie du métal liquide de la buse et le point d'impact liquide-gaz) de 150, 110, 70, et 30mm avec les paramètres constants suivants : pression de l'air $P = 5\text{bars}$; température du métal liquide $T = 500^\circ\text{C}$; diamètre du jet $d = 3\text{mm}$; angle de la buse $\alpha = 30^\circ$.

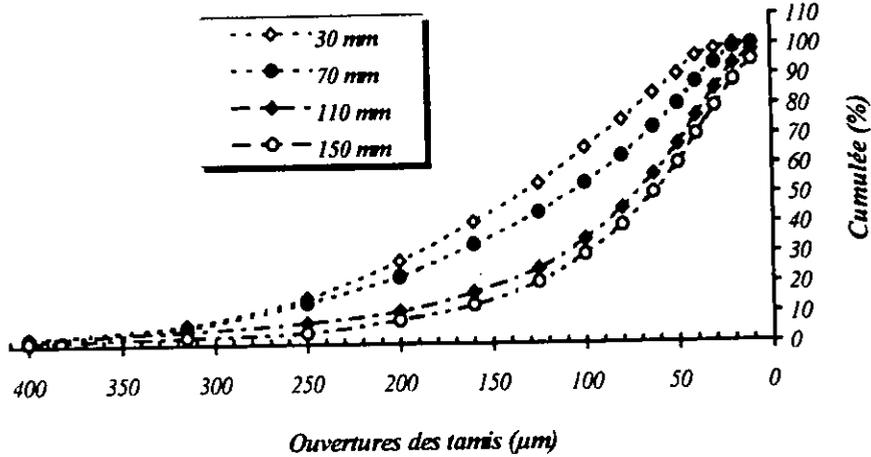


Figure IV.16. Influence de la hauteur du jet sur la distribution de taille des particules.



H = 30 mm



H = 70 mm



H = 110 mm



H = 150 mm

Figure IV.17. Images MEB des particules dont le diamètre maximal du ligament est inférieur à $50\ \mu\text{m}$. G : 170X

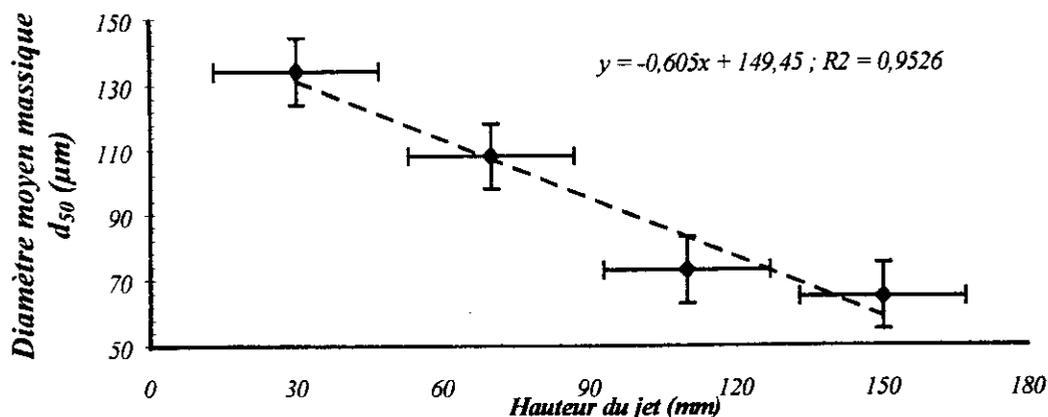


Figure IV.18. Variation du diamètre moyen massique en fonction de la hauteur du jet.

IV.5.6. Influence de la température de chauffage sur la forme des particules

Cette étude a été faite sur la poudre de plomb pulvérisée par air comprimé sous les conditions suivantes: pression $P = 5\text{bars}$; angle de la buse = 30° ; la hauteur du jet libre entre la sortie du tube d'alimentation et le point d'impact $H = 30\text{mm}$; la section de la buse $S = 100\text{ mm}^2$; diamètre du jet du métal liquide $D = 3\text{mm}$.

Les images (1,2,3 et 4) montrent la variation de la forme des particules en fonction de la température de surfusion. Elles ont été obtenues à l'aide d'un microscope électronique à balayage SEM 515 au Laboratoire Génie des matériaux de l'E.M.P.

Image 1: Le métal liquide a été porté à une température de 600°C , soit une surchauffe de 270°C , puis pulvérisé dans les conditions précédentes.

La poudre analysée est celle obtenue par tamisage entre les tamis d'ouvertures 100 et $125\mu\text{m}$. Ces particules ont une forme sphérique, cela est due à la surchauffe élevée qui donne un temps de solidification plus lent dépendant essentiellement de cette dernière, du diamètre de la particule, la densité du métal pulvérisé, ainsi que le coefficient du transfert de chaleur du milieu refroidissant. L'élévation de la température diminue la tension superficielle, ce qui a favorisé l'obtention des particules de forme sphérique.

Image 2 : Le métal liquide a été porté à une température de 550°C , soit une surchauffe de 220°C , pulvérisé dans les conditions présentées ci-dessus. Cette image montre la présence des particules sphériques (près de 30% en nombre de l'ensemble de ces particules) et d'autres sous forme de poire.

Cette forme est due à une solidification de ces particules avant que la sphéroïdisation soit complète et les satellites se détachent des particules mères et prennent la forme sphérique, et par conséquent le temps de solidification est inférieur au temps de sphéroïdisation pour cet ensemble de particules.

Image 3 : Cette poudre a été atomisée sous les mêmes conditions que la précédente, seulement on fait varier la température de chauffage, au lieu de 550°C , on porte le métal à 500°C , soit une surchauffe de 170°C . Cette image montre la présence seulement d'environ 7% en nombre des particules sphériques.

Image 4 : cette poudre a été obtenue par atomisation sous les mêmes conditions que les précédentes avec une température de chauffage de 450°C , soit une surchauffe de 120°C . L'image montre que toutes les particules de cette poudre sont sous forme ligamentaire.



Image 1: T=600°C
poudre sphérique de diamètre 54µm
G : 710X

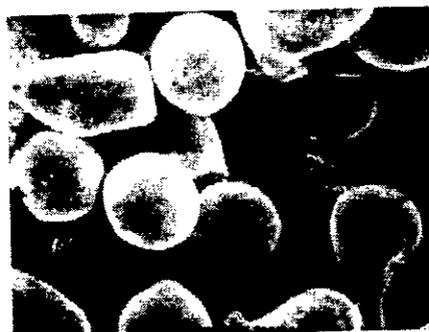


Image 2: T=550°C
G : 170X

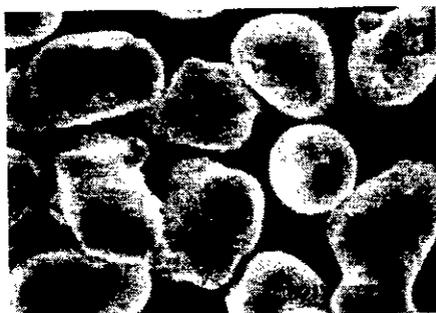


Image 3: T=500°C
G : 170X



Image 4: T=450°C
G : 170X

Figure IV.19 . Evolution de la forme des particule en fonction de la température de coulée.
Image MEB

IV.5.7. Influence de la taille des particules sur la microstructure de la poudre

La figure IV.20 montre l'influence de la taille des particules sur la distance interdendritique. On remarque que plus la taille des particules diminue plus la distance entre les dendrites est petite, car la poudre fine présente une grande surface par unité de volume. Par conséquent, l'extraction de la chaleur devient importante et le refroidissement se fait à des vitesses élevées. Avec des vitesses de solidification rapides, la solidification peut se faire plus vite que la vitesse de diffusion atomique dans le liquide; ce qui élimine la ségrégation et donne une structure solidifiée plus homogène.

Lors de la transformation du liquide en solide, la chaleur est libérée à l'interface, par conséquent, le liquide se réchauffe proportionnellement à la chaleur calorifique. Par contre quand les vitesses de refroidissement sont faibles, le liquide se solidifie par germination et croissance en donnant une structure dendritique hétérogène.

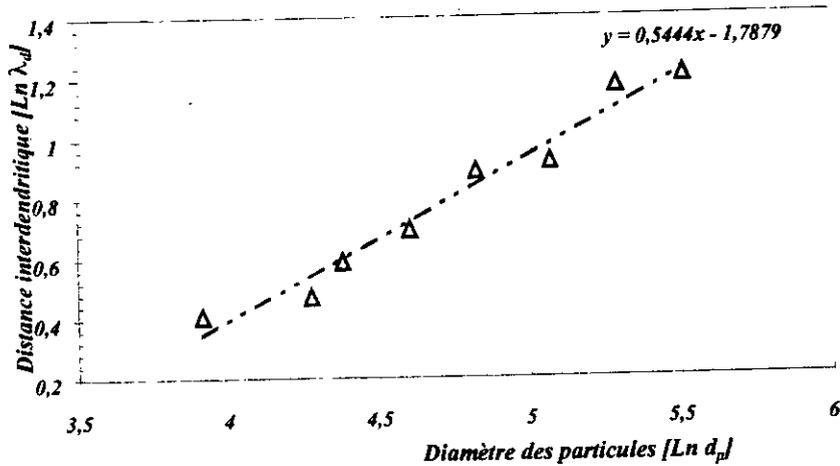


Figure IV.20. Variation de la distance interdendritique en fonction du diamètre des particules.



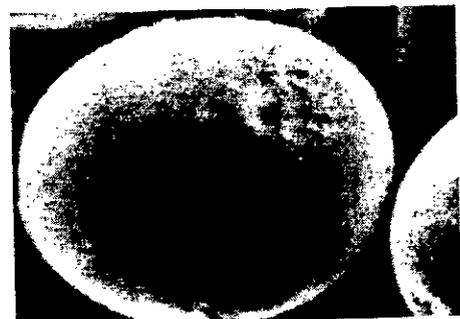
Figure IV.21. Dendrites à la surface d'une particule de poudre de plomb.

IV.5.8. Influence des collisions sur la forme des particules

Lors de l'atomisation, les particules solides subissent des chocs entre elles, ce qui entraîne une modification de la forme par fragmentation et/ou déformation. La fragmentation est due d'une part au choc entre les particules ayant des tailles voisines figure IV.22a, et d'une autre part au choc entre la particule et les parois de la chambre d'atomisation. Les plus petites particules se solidifient avant les grosses et lorsqu'elles entrent en collision, la plus petite déforme la plus grosse en laissant son empreinte à la surface comme le montre la figure IV.22b.



a) fragmentation. G: 150x (gauche)
G: 2000x (droite)



b) déformation. G: 965x

Figure IV.22. Particules déformées par collision.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le présent travail a porté sur l'élaboration des poudres de plomb au moyen d'un atomiseur conçu en Laboratoire. La mise au point de l'installation a porté essentiellement sur les éléments constitutifs de l'atomiseur : régulation de la température du four de fusion, régulation de la pression d'air injectée, calibration de l'angle de pulvérisation et de la hauteur du jet liquide.

L'influence des paramètres d'atomisation adoptés s'est traduite sur les caractéristiques de la poudre obtenue en particulier sur les diamètres moyens, la distribution de taille, la forme et la microstructure des particules. Ces dernières ont été mis en évidence respectivement par tamisage et microscopie électronique à balayage.

Les résultats obtenus ont été traduits sous forme de courbes, micrographies et valeurs numériques en fonction des conditions expérimentales choisies.

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.

En ce qui concerne le dispositif d'atomisation, il est prévu de lui concevoir un système d'épuration et de récupération des gaz inertes permettant, d'une part, d'atomiser des métaux ayant une grande affinité chimique avec l'oxygène et minimisant les coûts de production d'autre part.

En outre, il est prévu, à court terme d'installer un four à induction permettant d'atteindre des températures élevées en un temps très court. Ainsi, le dispositif d'atomisation permettra d'élaborer une large gamme de métaux et alliages tels que l'aluminium, le zinc, le nickel, le cuivre et ses alliages...etc.

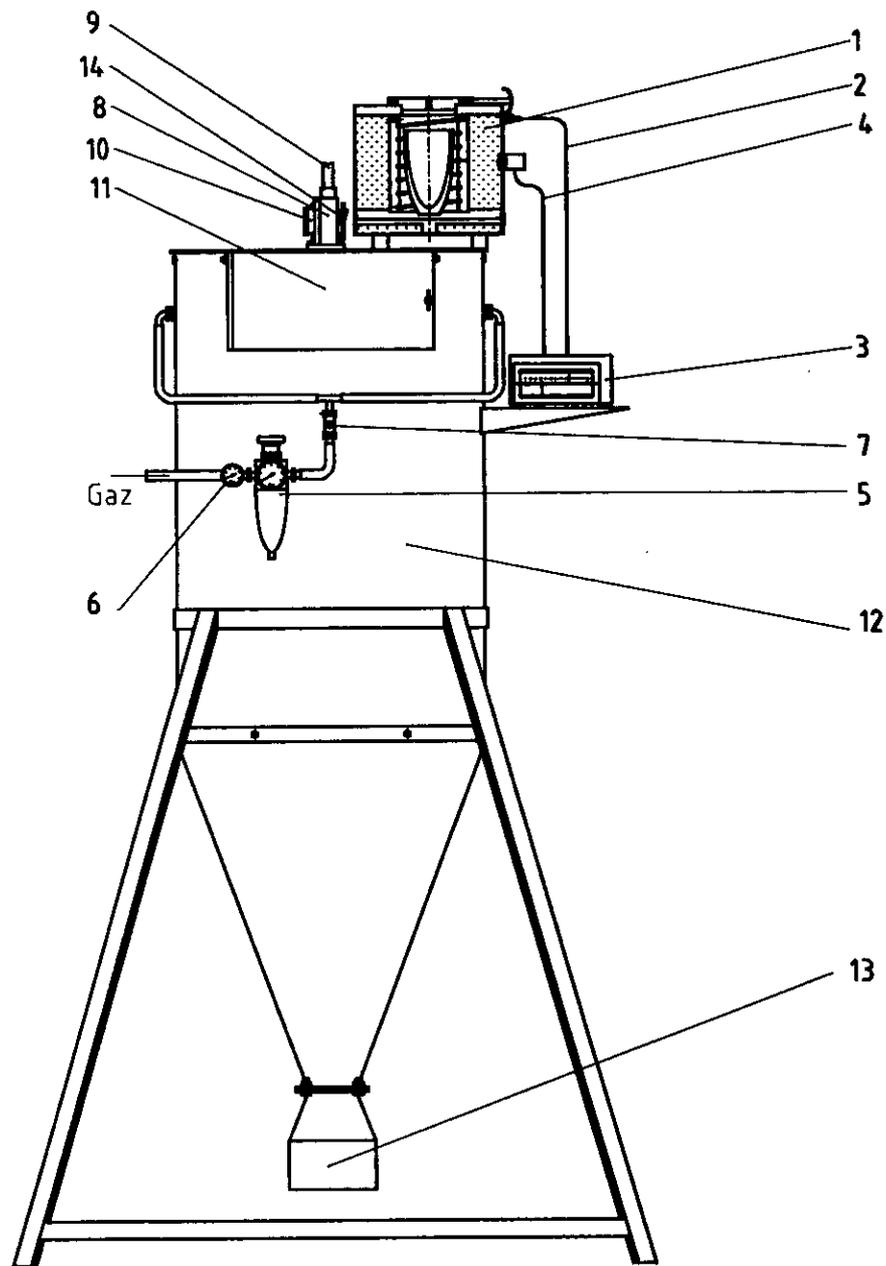
La caractérisation des poudres portera, en outre sur l'analyse par énergie dispersive (microscopie électronique) des différentes compositions élaborées et également sur la nature des phases présentes dans les poudres préallées par diffraction des rayons X.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **A.J. YULE; J.J. JOHN.** "Atomization of Melts for Powder Production and Spray Deposition". Oxford University Press, 1994.
- [2] **R. KIEFFER ; W. HOTOP.** Fer et aciers frittés, "Ed. DUNOD", 1951.
- [3] **G. CIZERON.** La Revue de Métallurgie-CIT/Science et Génie des Matériaux, Mai 1994, pp. 683-692.
- [4] **R. MEYER.** "Poudres Métalliques". Techniques de l'Ingénieur, Fasc. M862, 1980.
- [5] **C. CHAUSSIN ; G. HILLY.** "Elaboration des Métaux". Ed. DUNOD, Tome 2, 1984.
- [6] **B. CHAMPAGNE ; R. ANGERS.** "Fabrication of Powders by Rotating Electrode Process". Int. J. Powder Met. Powder Tech., Vol. 16, 1980, pp. 359-367.
- [7] **E. KLAR ; J.W. FESKO.** Metals Handbook of Powder Metallurgy, 1982, pp. 25-35.
- [8] **A.R.E. SINGER.** Journal of the Institute of Metallurgy, 1972, pp.100-185.
- [9] **R.M.German.** "Powder Metallurgy Science". Ed. Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, 1994.
- [10] **T. ANDO ; C.Y. TSAO ; J. WAHLROOS ; N.J. GRANT.** "Analysis and Control of Gas Atomization". The Int. J. of Powder Metallurgy, Vol. 26, N°4, 1990, pp. 311-317.
- [11] **R.J. GRANDZOL ; J.A. TALLMADGE.** "Effect of Jet Angle on Water Atomization". Int. J. Powder Met. Powder Tech., Vol.11, N°2, 1975, pp. 103-116.
- [12] **L.D. LUCAS.** "Viscosité". Techniques de l'Ingénieur, Fasc. M66, 1984.
- [13] **L. GOUMIRI.** "Etude des propriétés de surface". E.N.L, 1986.
- [14] **L.D. LUCAS.** "Tension superficielle". Techniques de l'Ingénieur. Fasc. M67, 1984.
- [15] **S. NUKIYAMA ; Y. TANASAWA.** "Experiments on the Atomization of Liquids", Reports 1-6, translated from Trans. Soc. Mech. Eng. (Jap.), Vol. 4-6, 1938.
- [16] **H. LUBANSKA.** "Correlaton of Spray Ring Data for Gas Atomization of Liquid Metals". J. Met. Vol. 22, N°2, pp.45-49, 1970.
- [17] **N.S. GRANT.** "A Review of various Atomization Process in Rapid Solidification Processing". Ed., Claitor's Publishing, 1978, pp. 230-245.
- [18] **O.S. NICHIPORENKO ; Yu.I. NAIDA.** "Fashioning The Shape of Sprayed Powder Particles". Soviet Powder Metallurgy Metal Ceramics, Vol.70, N°10, 1968.
- [19] **F. BARBAS.** Matériaux et Techniques N° 8-9, 1976, pp.283-286.
- [20] **J. HEURTIN ; J.L. MAZOYER.** "Chauffage par Effet Joule". Techniques de l'Ingénieur. Fasc. D824, 1984.
- [21] **M. ORFEUIL.** "Electrothermie Industrielle". Ed. Dunod, 1981.
- [22] **A.B. DEVRIENDT.** "La Transmission de la Chaleur". Vol. 1, Tome 1, Ed. Gaëtan Morin, Canada. 1982.
- [23] **F. BARBAS.** Matériaux et Techniques N°1-2, 1977, pp. 37-42.
- [24] **G. BONNIER ; E. DEVIN.** "Couples Thermoélectriques - Caractéristiques et Mesure de Température" Techniques de l'Ingénieur, Fasc. R2590, 1997.
- [25] **I.G. CURRIE.** "Fundamental Mechanics of Fluids". Ed. Mc Graw Hill, 1993.
- [26] **A.H. SHAPIRO.** "The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow". Vol.2, The Ronald Press Company, New York, 1953.
- [27] **R.H. PERRY.** Chemical Engineer's Handbook, Ed. Mc Graw Hill. 1976.

ANNEXE I

Sous-ensembles de l'Atomiseur



- 1- Four.
- 2- Thermocouple.
- 3- Régulateur de température.
- 4- Alimentation du four.
- 5- Régulateur de pression.
- 6- Indicateur de pression.
- 7- Vanne.
- 8- Carter.
- 9- Crémaillère.
- 10- Indicateur de déplacement.
- 11- Fenêtre.
- 12- Chambre d'atomisation.
- 13- Chambre de récolte.
- 14- Creuset.

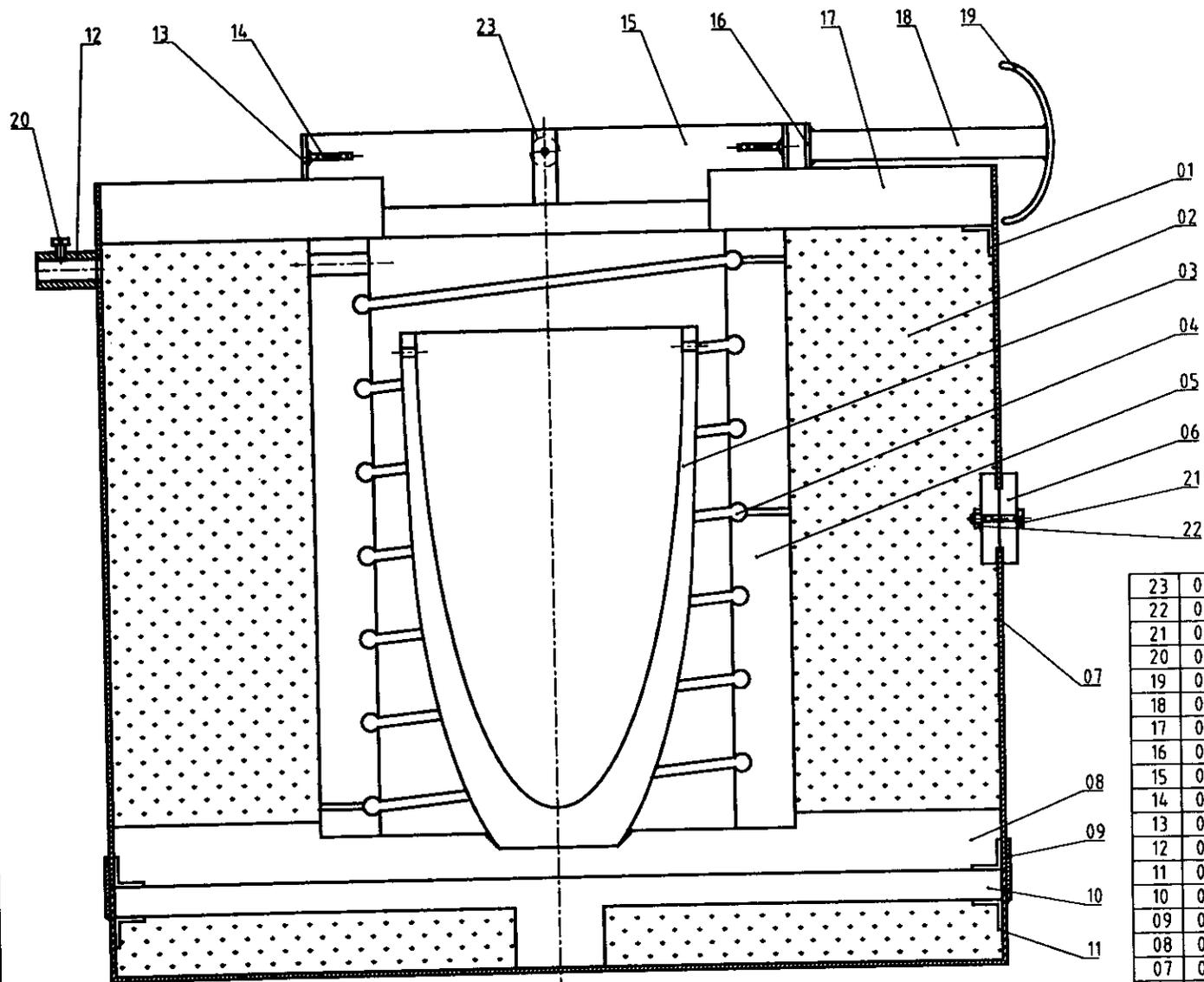
Echelle=1:5	ATOMISEUR
E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)	
BRITAN Abdelmalek	ATOMISEUR

Réduction de 3.1

ANNEXE I

Sous-ensembles de l'Atomiseur

I- Four et accessoires



Four

Echelle = 1:1

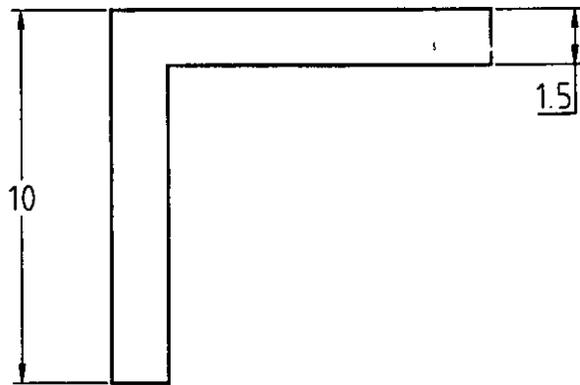
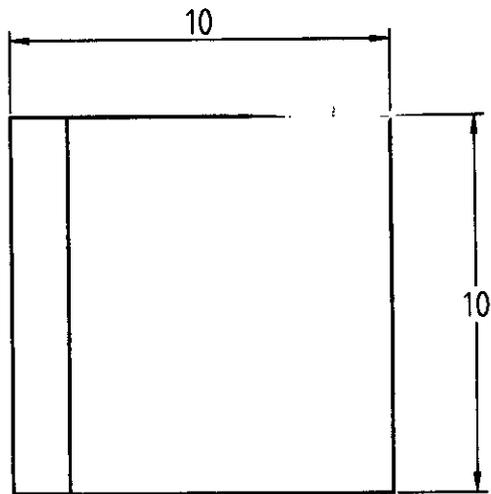
E.M.P. Bordj El Bahr (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR

Réduction de 2.2

23	02	Tourillon	A 33	
22	02	Ecrou H, M 3		NF E 25-401
21	02	Vis CS, M 3-16		NF E 25-127
20	01	Vis CS, M 3-5		NF E 25-127
19	01	Poignée	A 33	
18	01	Levier	A 33	
17	01	Couvercle	A 33	
16	01	Fourche	A 33	
15	01	Voûte	Réfractaire	
14	08	Armature	A 33	
13	01	Cerceau de la voûte	A 33	
12	01	Guide	A 33	
11	01	Support du sol	A 33	
10	01	Sol	Réfractaire	
09	01	Cerceau	A 33	
08	01	Semelle	Réfractaire	
07	01	Enveloppe	A 33	
06	02	Isolant électrique	Réfractaire	
05	01	Support de résist.	Réfractaire	
04	02	Résistance	Fe-Cr-Al	
03	01	Creuset	Alumine	
02	02	Isolant thermique	Laine de roche	
01	11	Calle	A 33	
Rep.	Nb.	Désignation	Matériau	Observation



ITG = 0.1 Matière : A 33 Nbre = 11

Echelle=5:1

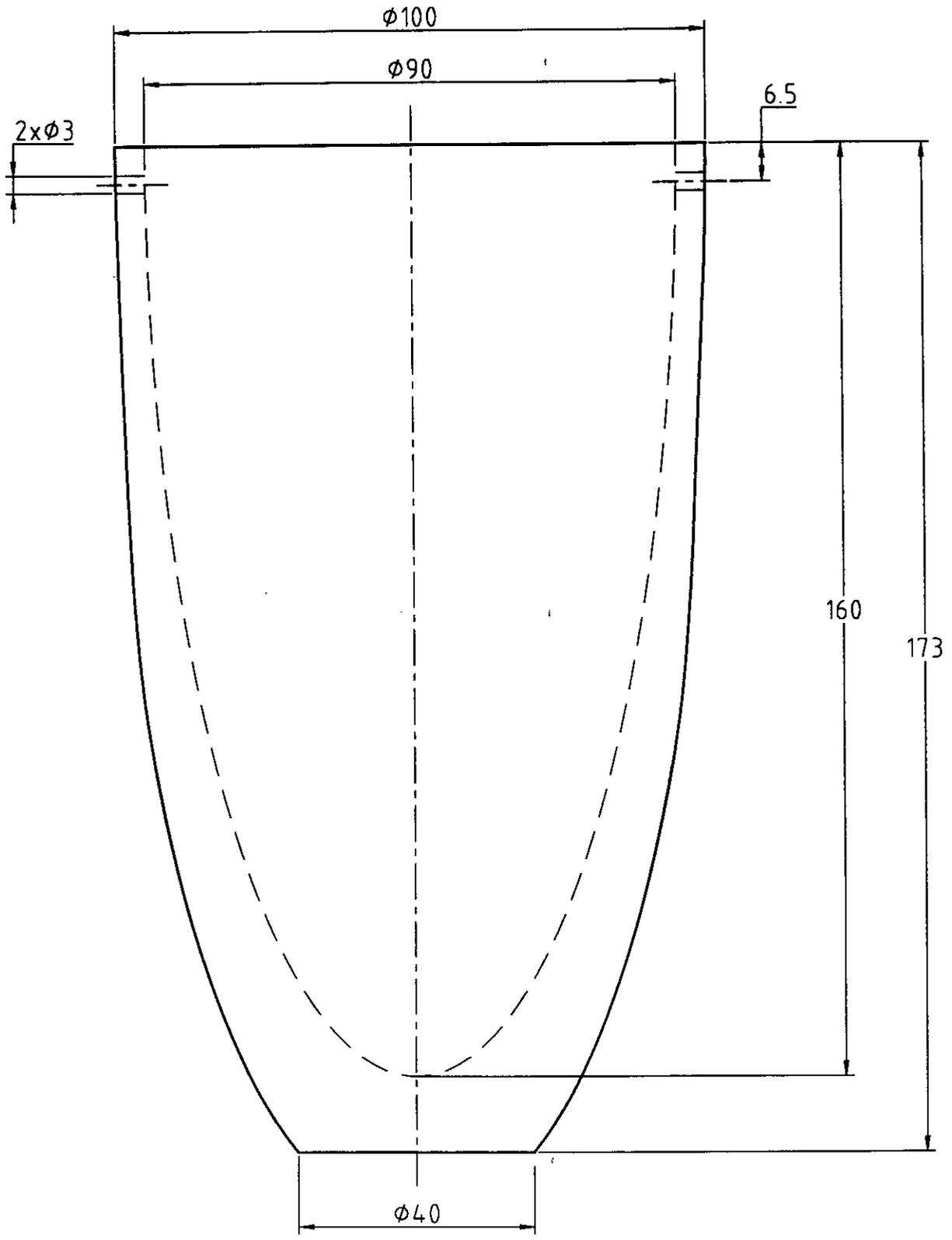
FOUR Rep. 01
Calle



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

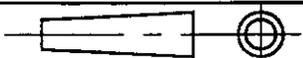
ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Réfractaire Nbre = 01

Echelle=1:1

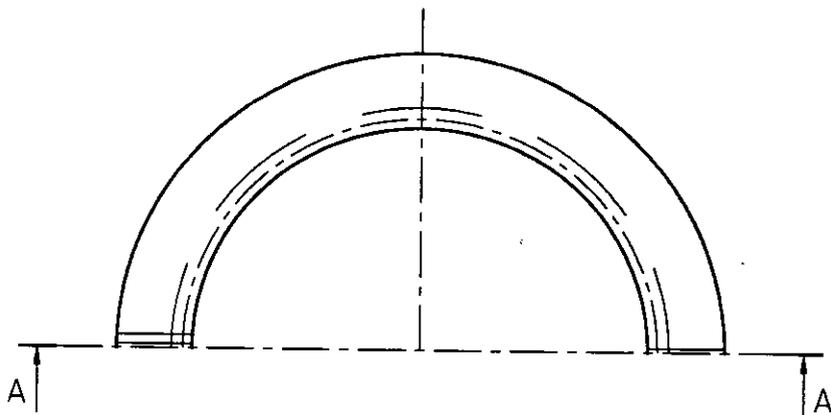
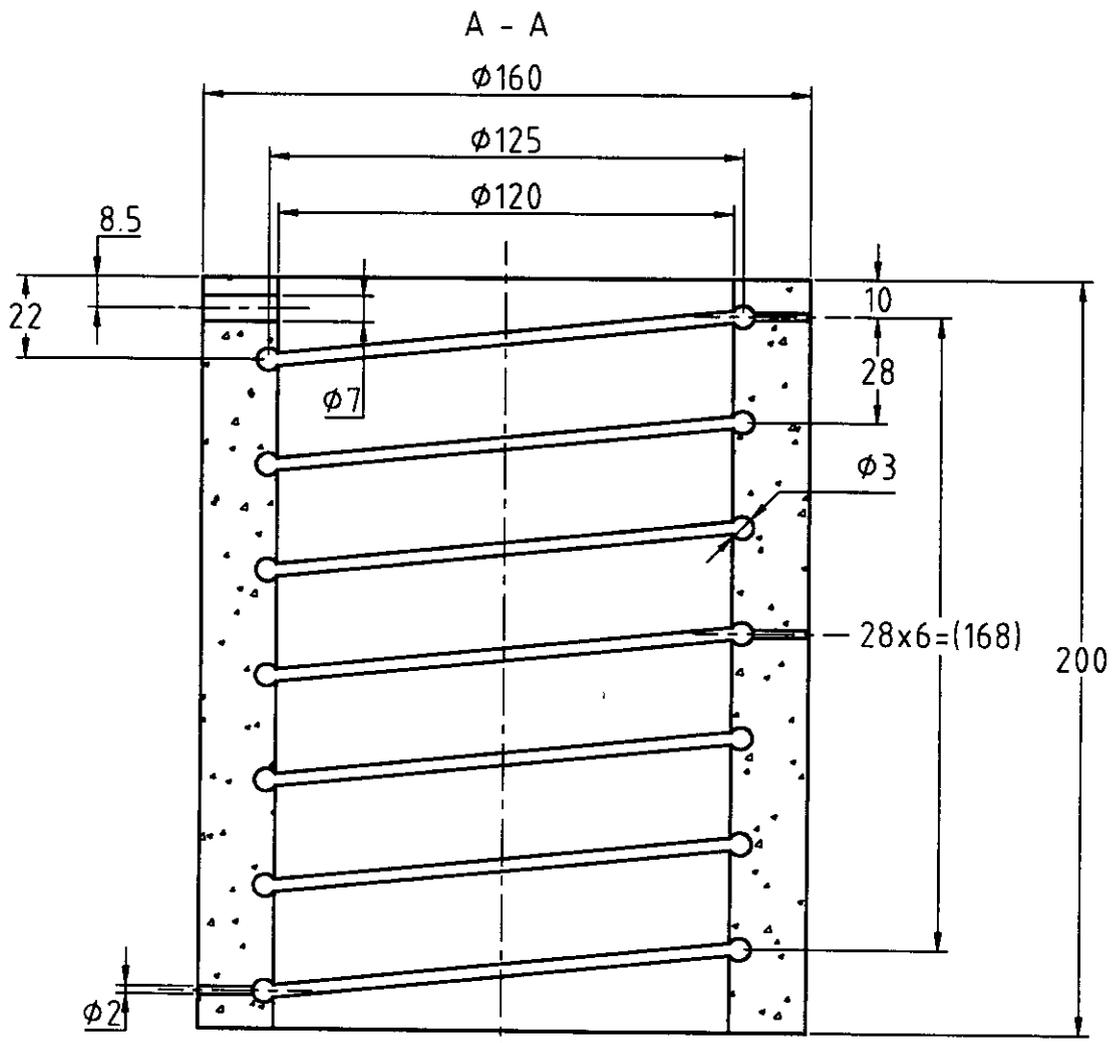
FOUR Rep. 03
Creuset



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Réfractaire Nbre = 01

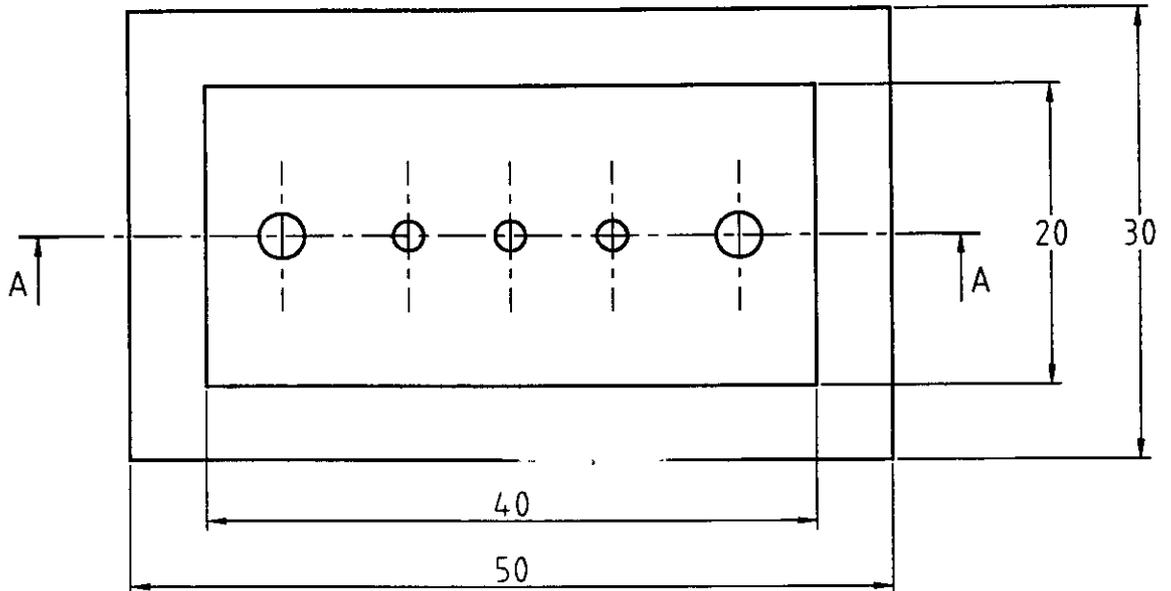
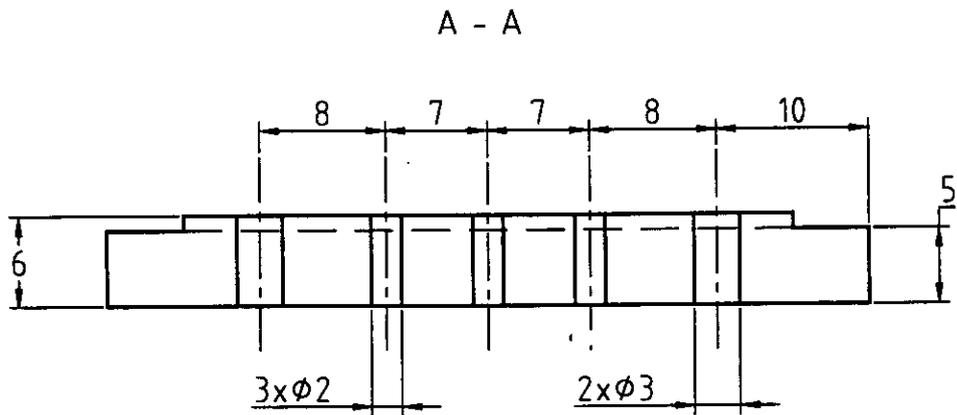
Echelle = 1:2

FOUR Rep. 05
Support de resistance

E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Réfractaire Nbre = 02

Echelle=2:1

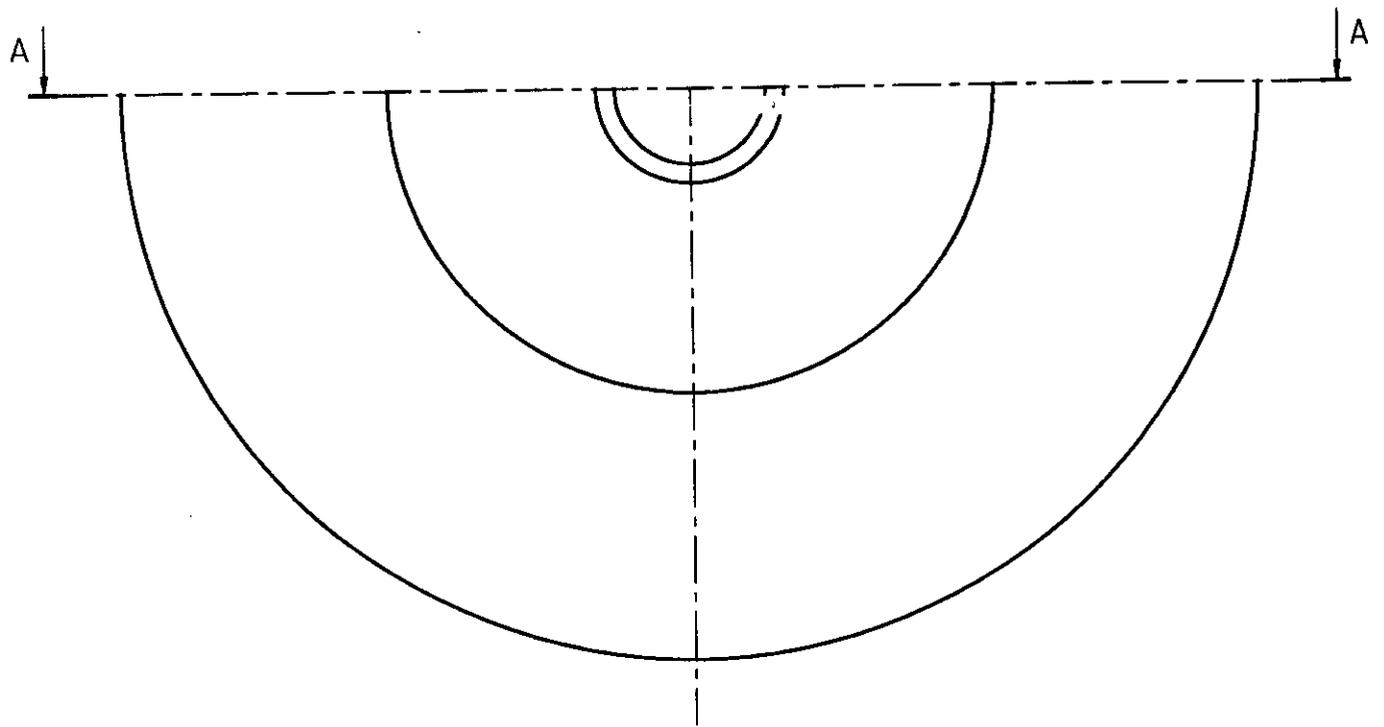
FOUR Rep. 06
Isolant



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR

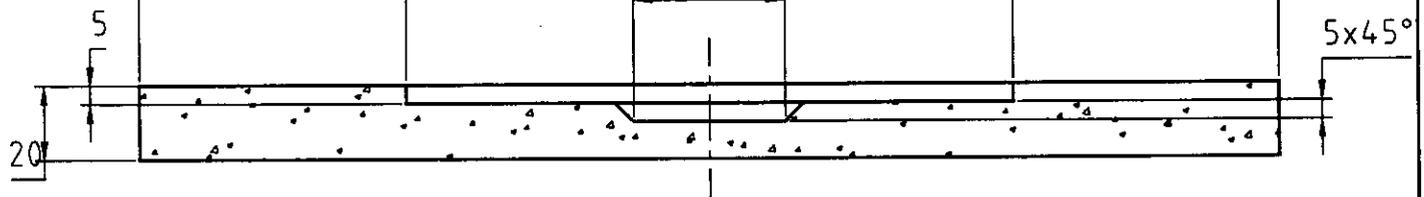


A - A

$\phi 300$

$\phi 160$

$\phi 40$



ITG = 0.1

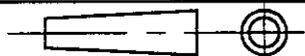
Matière : Réfractaire

Nbre = vi

Echelle = 1:2

FOUR Rep. 08

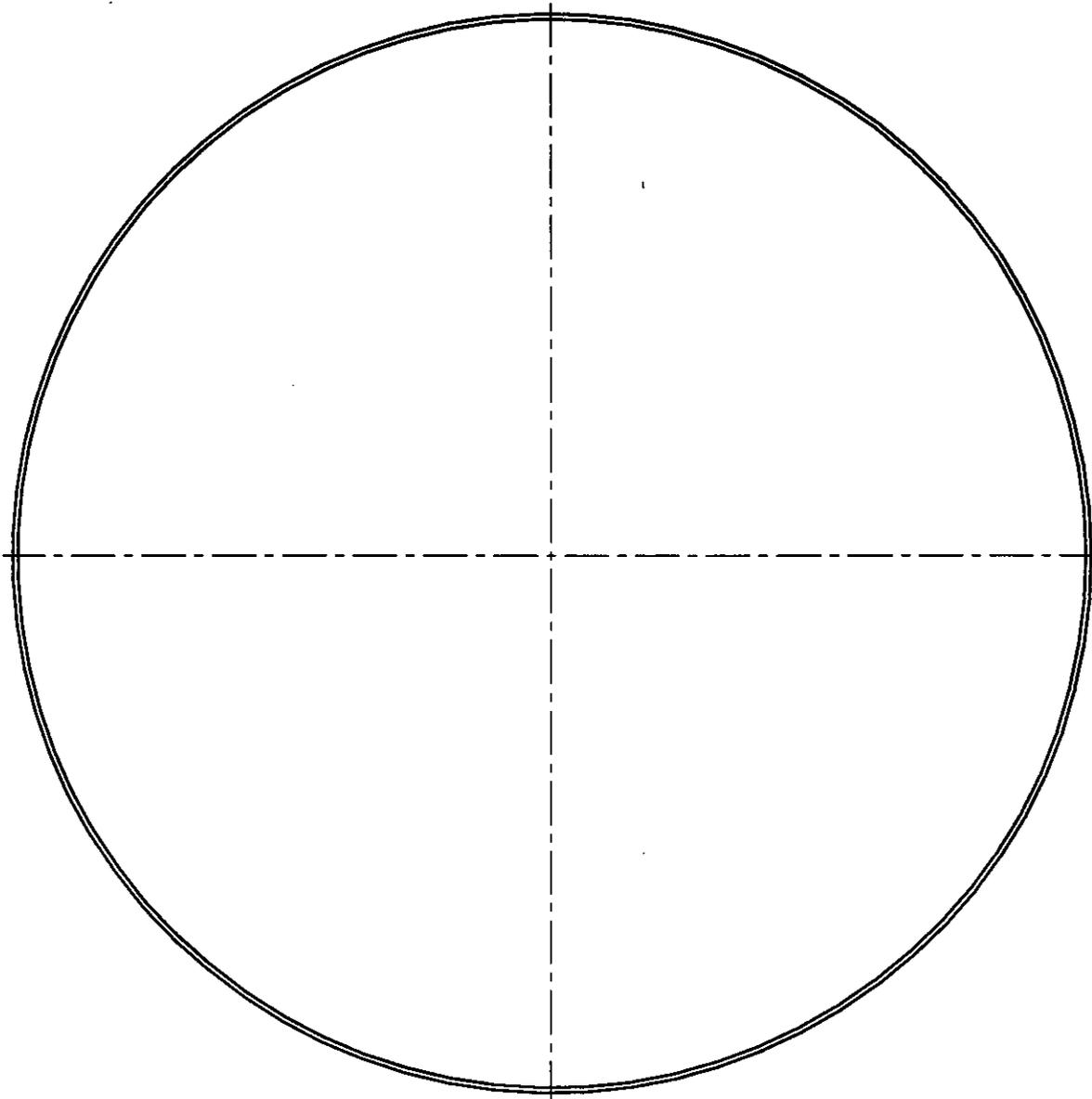
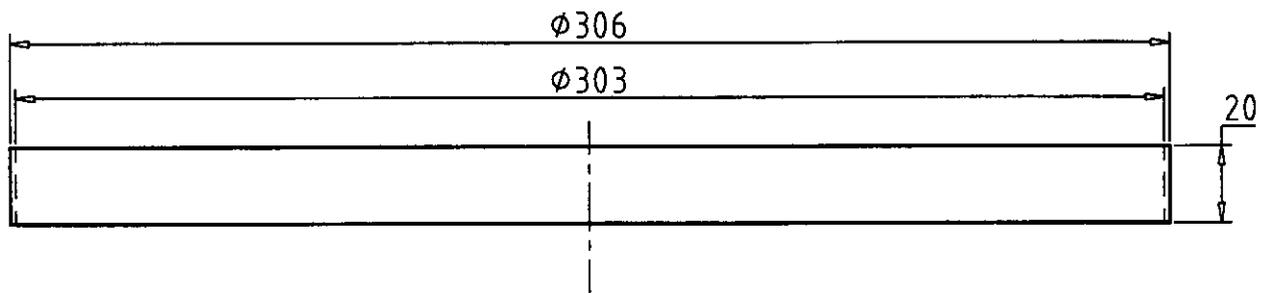
Semelle



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR

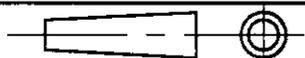


ITG = 0.1 Matière : A 33 Nbre = 01

Echelle=1:2

FOUR Rep. 09

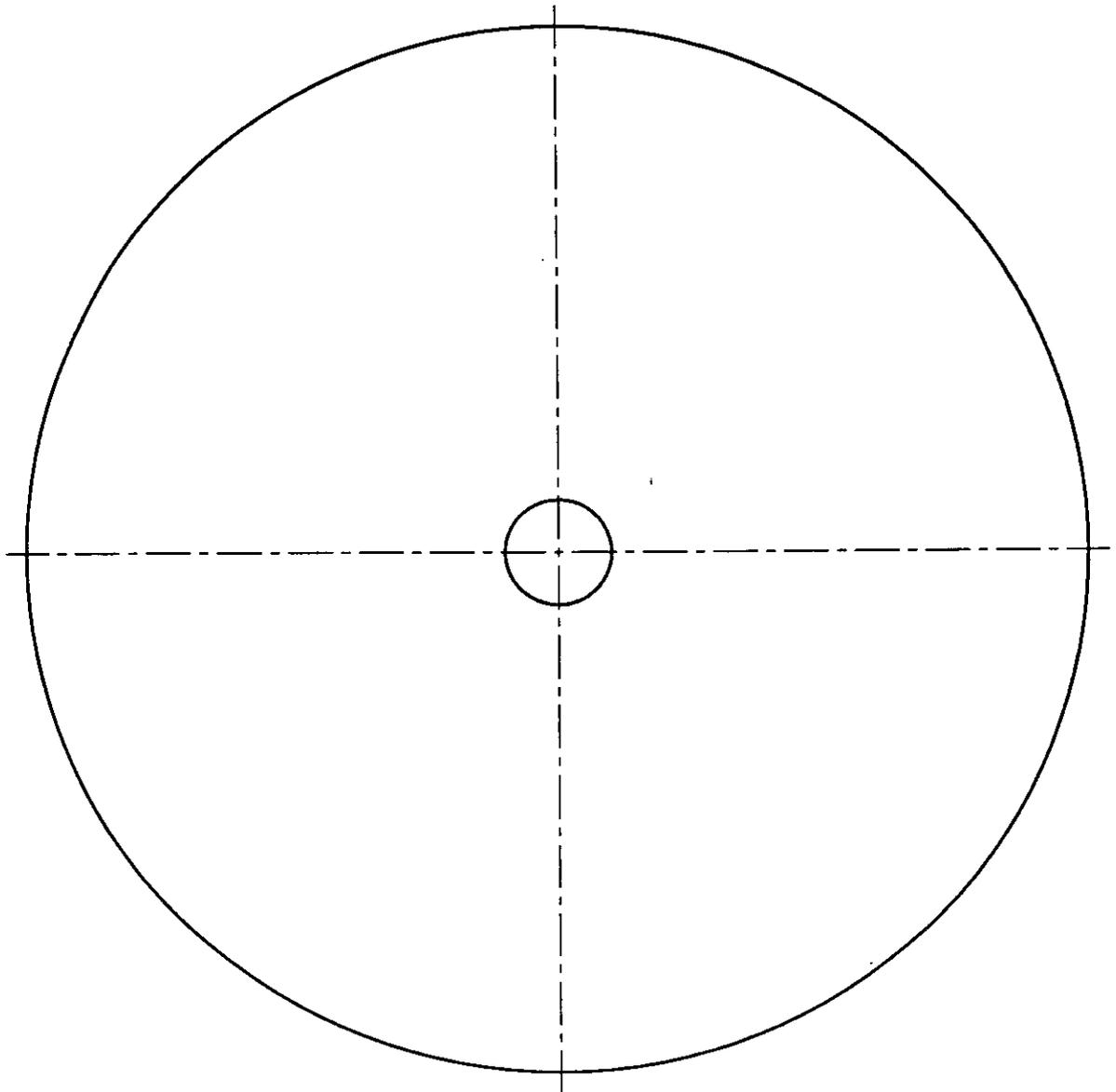
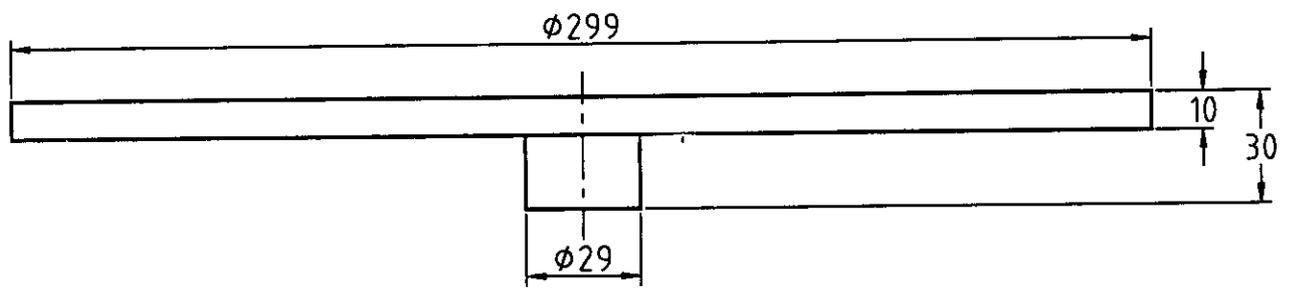
Cerceau



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

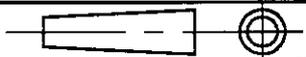
ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Réfractaire Nbre = 01

Echelle=1:2

FOUR Rep. 10
Sol

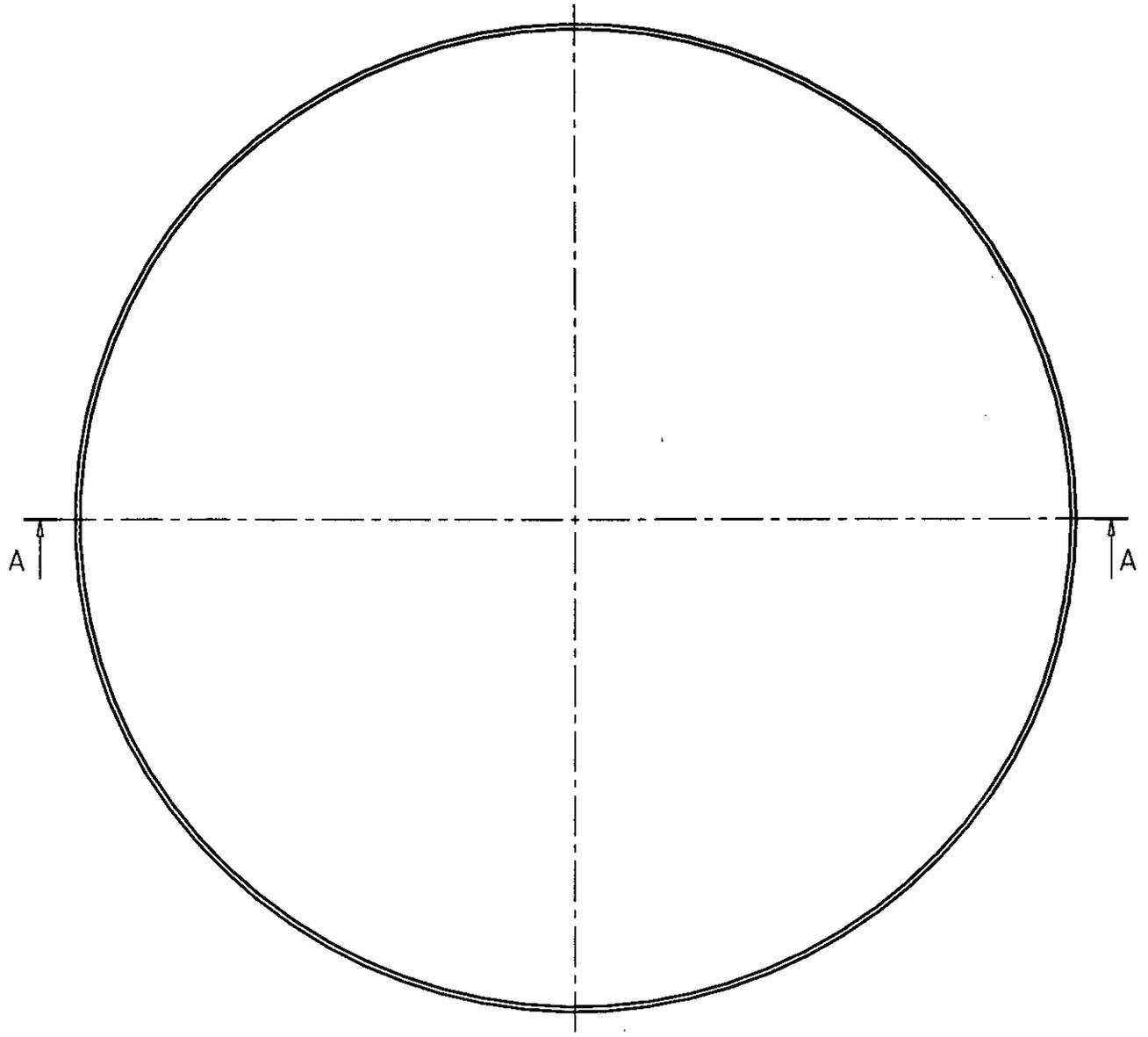
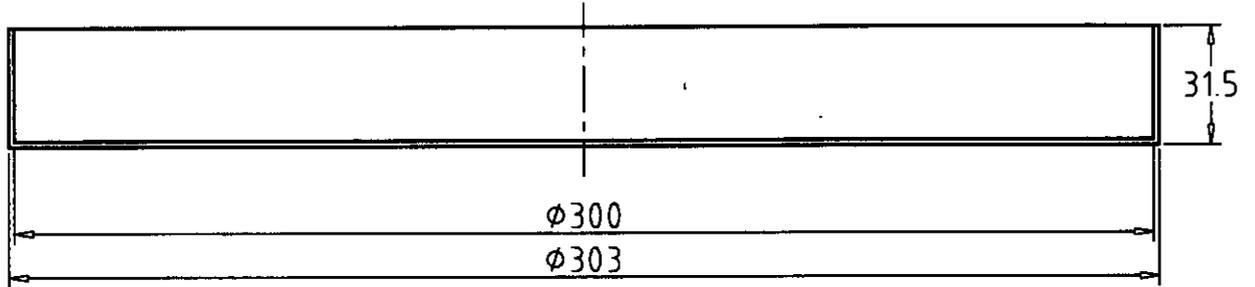


E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

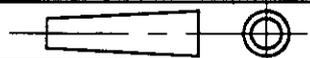
ATOMISEUR

A-A



ITG = 0.1 Matière : A 33 Nbre = 01

Echelle=1:2

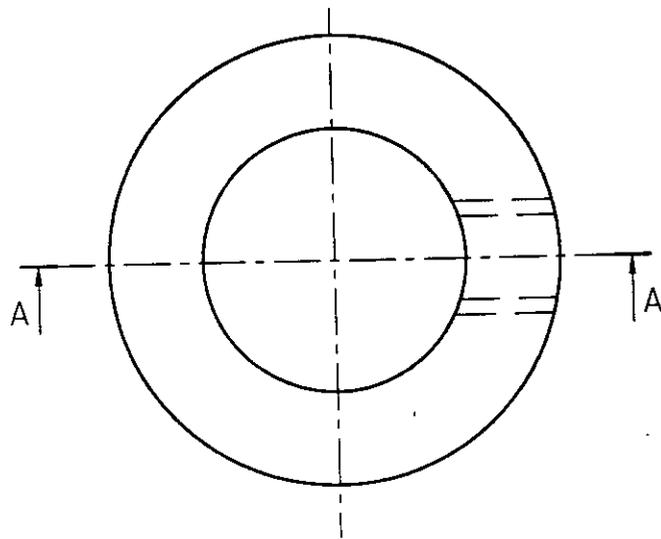
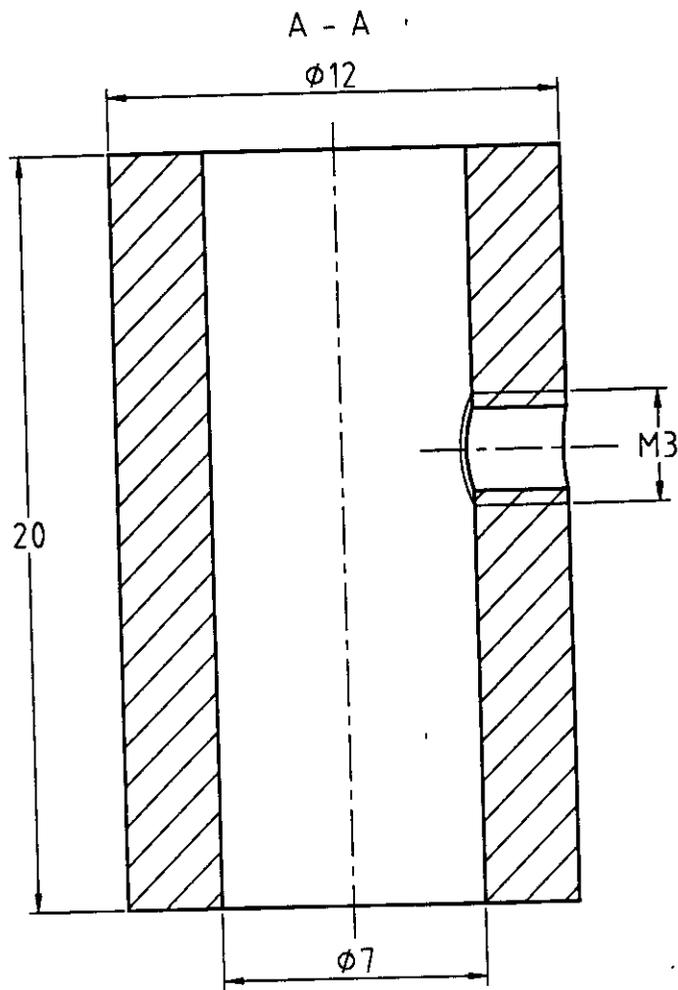


FOUR Rep. 11
Support du sol

E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

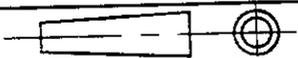
ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A 33 Nbre = 01

Echelle = 5:1

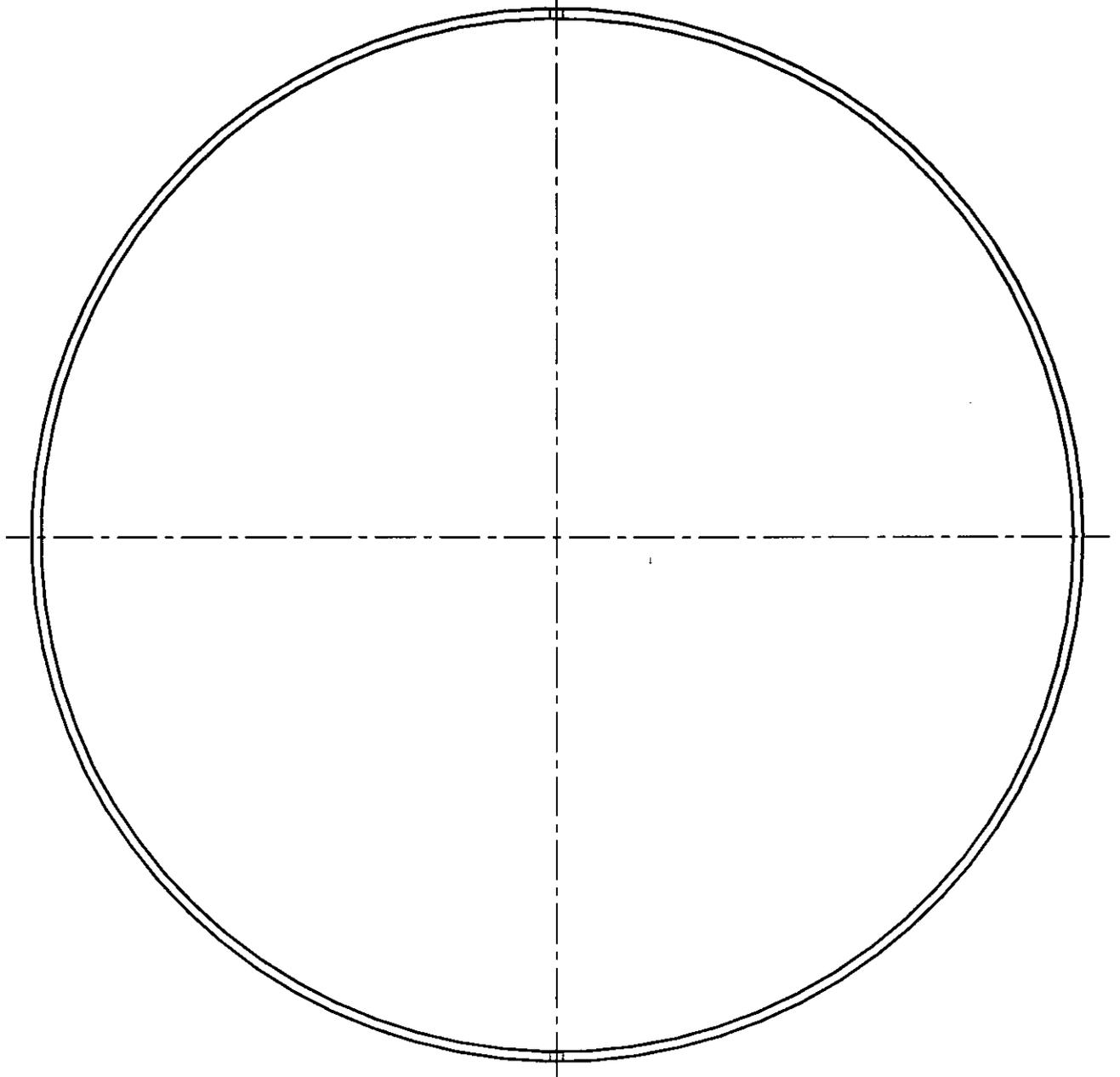
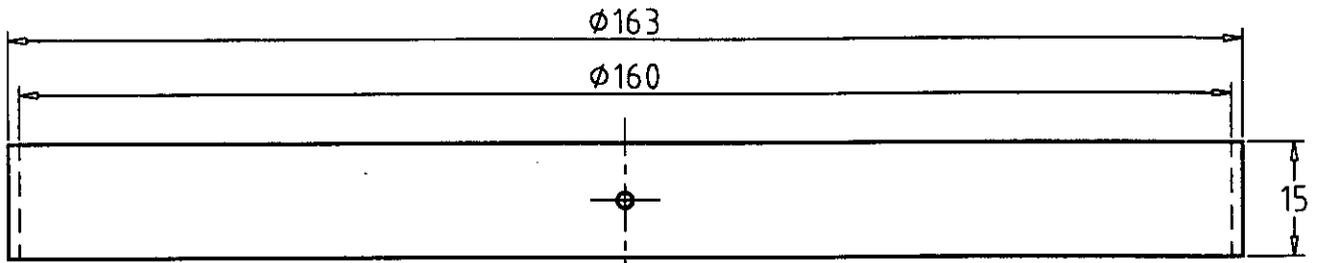
FOUR Rep. 12
Guide



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

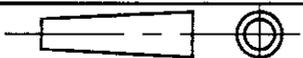
BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A 33 Nbre = 01

Echelle=1:1

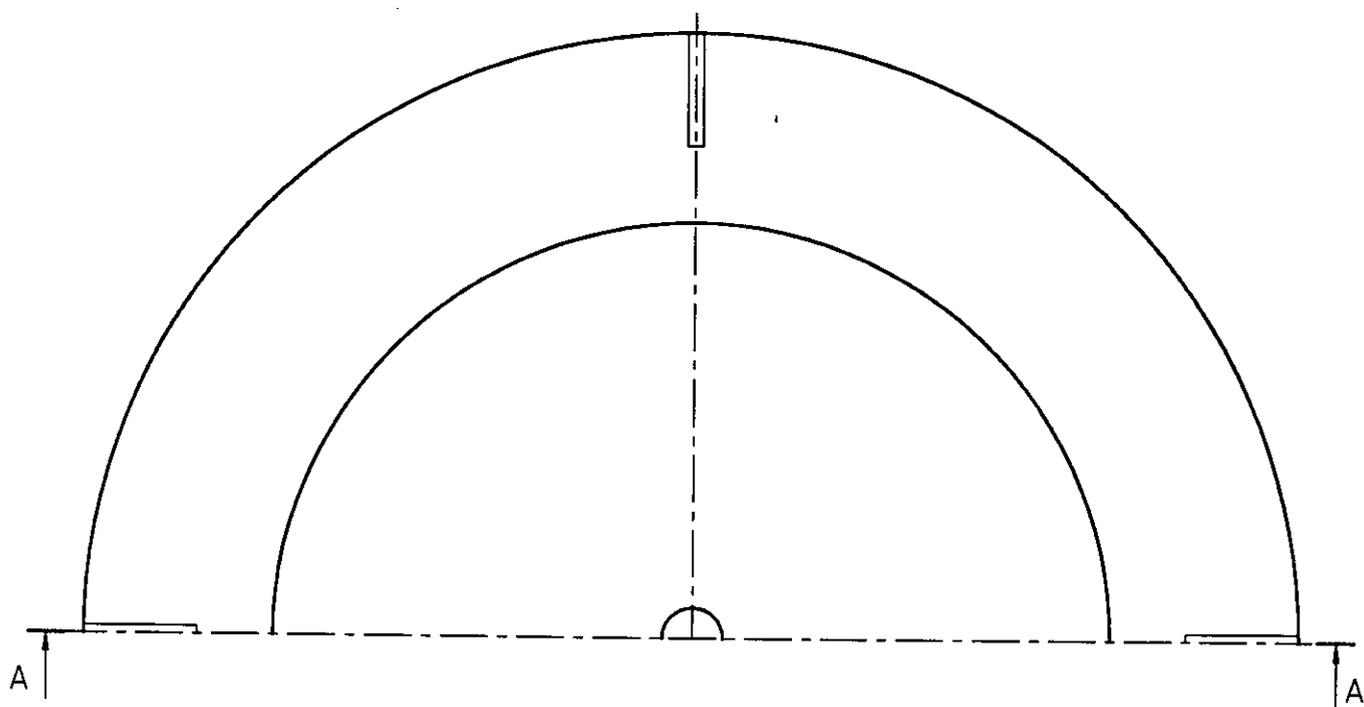
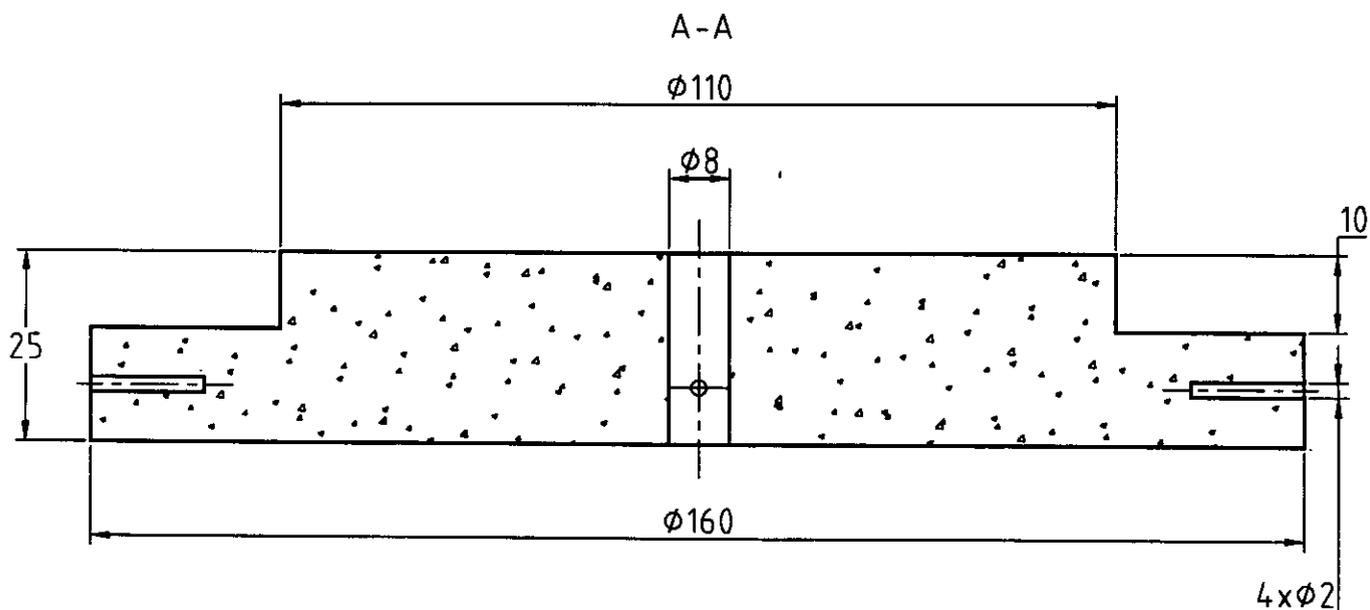


FOUR Rep. 13
Cerceau de la voûte

E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Réfractaire Nbre = 01

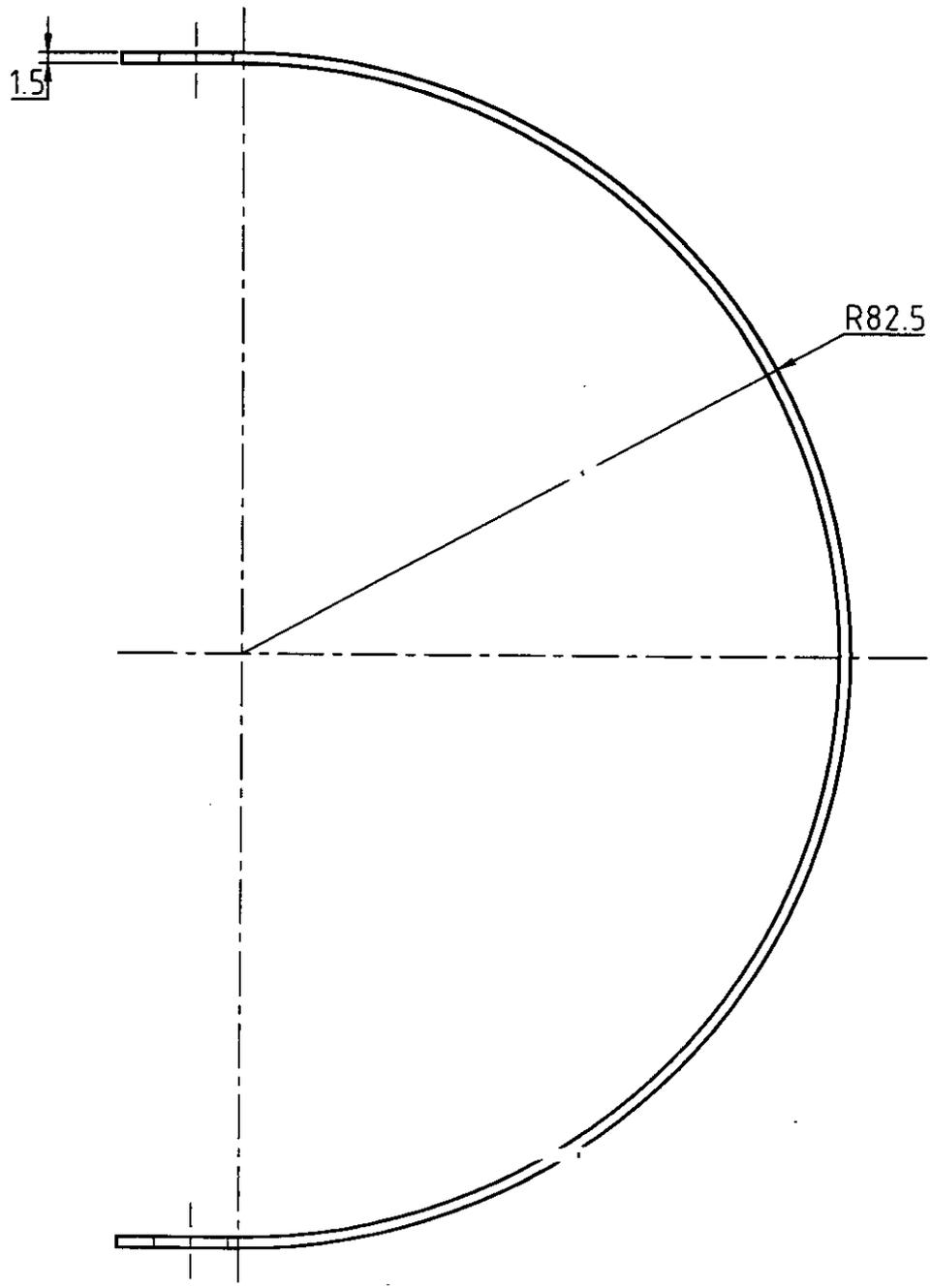
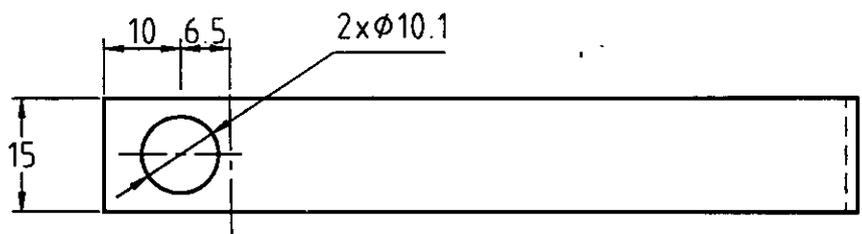
Echelle=1:1

FOUR Rep. 15
voûte

E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

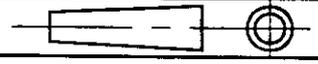
ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A 33 Nbre = 01

Echelle=1:1

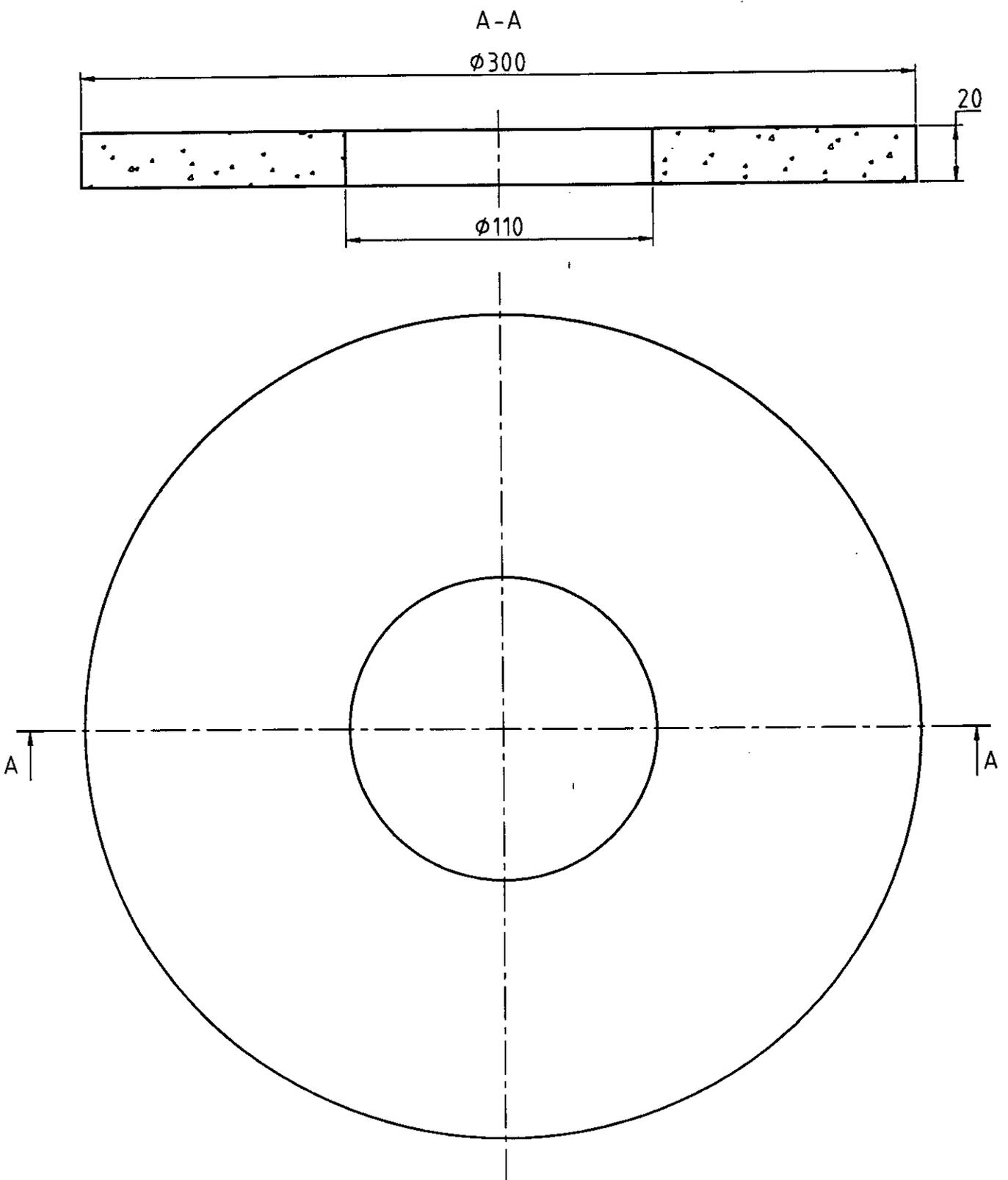
FOUR Rep. 16
Fourche



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

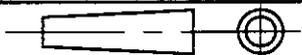
ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Réfractaire Nbre = 01

Echelle = 1:2

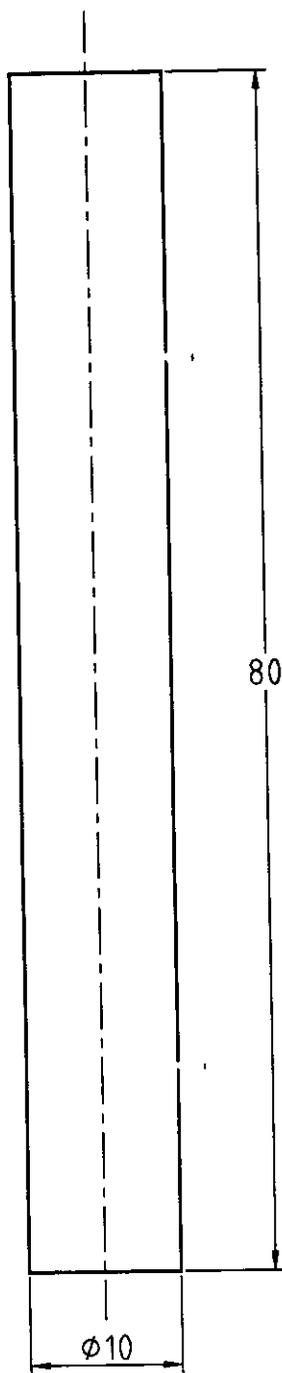
FOUR Rep. 17
Couvercle du four



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

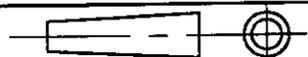
ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A 33 Nbre = 01

Echelle=2:1

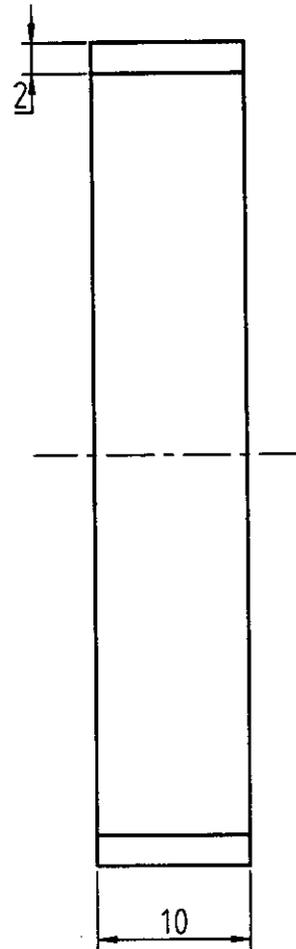
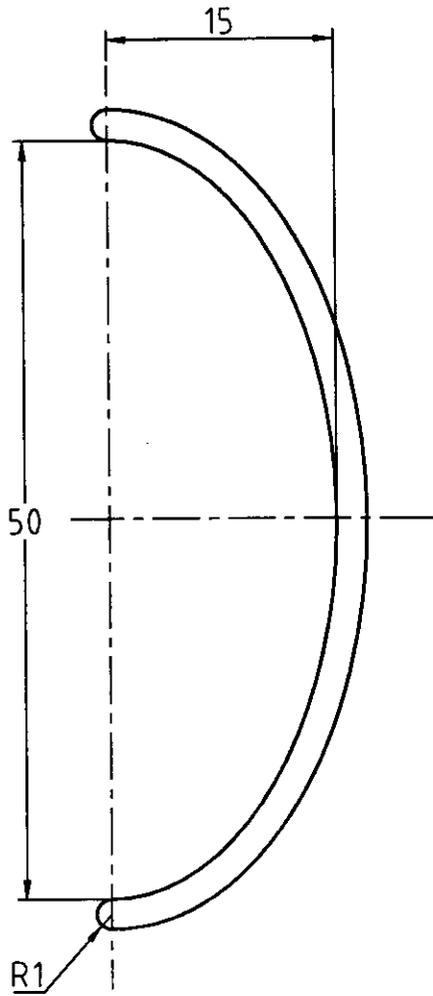
FOUR Rep. 18
Levier



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

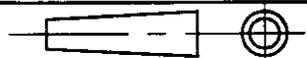
ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A 33 Nbre = 01

Echelle=2:1

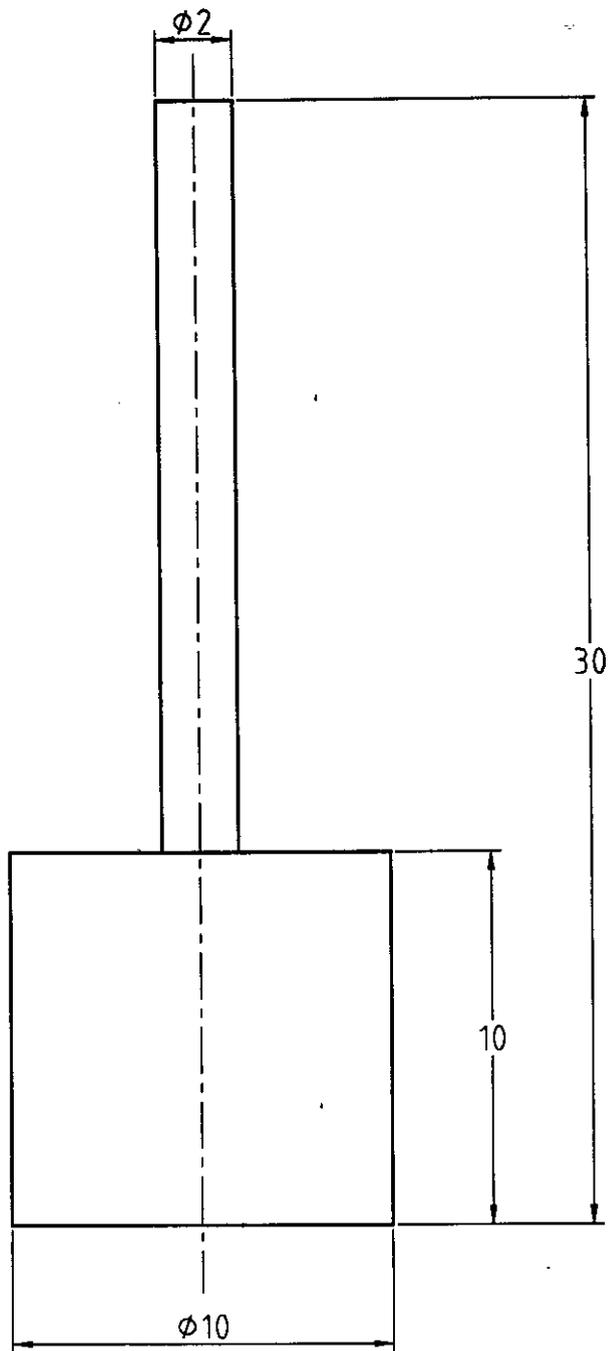
FOUR Rep. 19
Poignée



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A 33 Nbre = 02

Echelle=5:1

FOUR Rep. 23
Tourillon



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

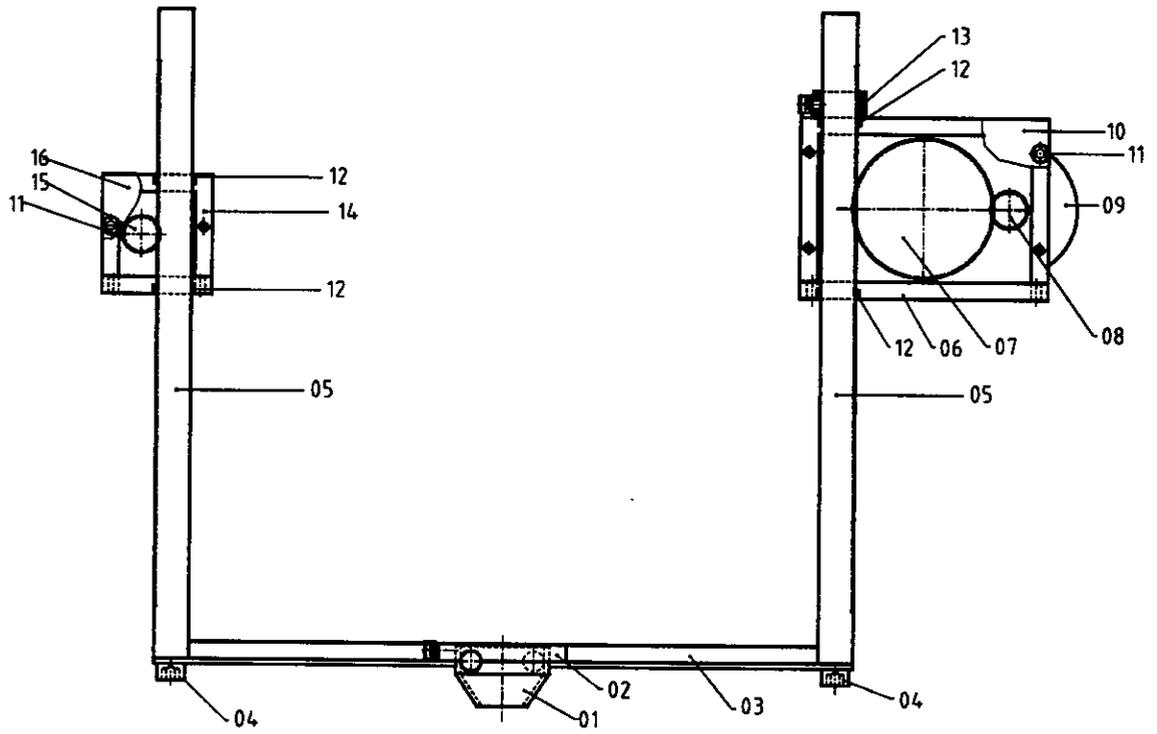
BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR

ANNEXE I

Sous-ensembles de l'Atomiseur

II- Ensemble de déplacement de la buse

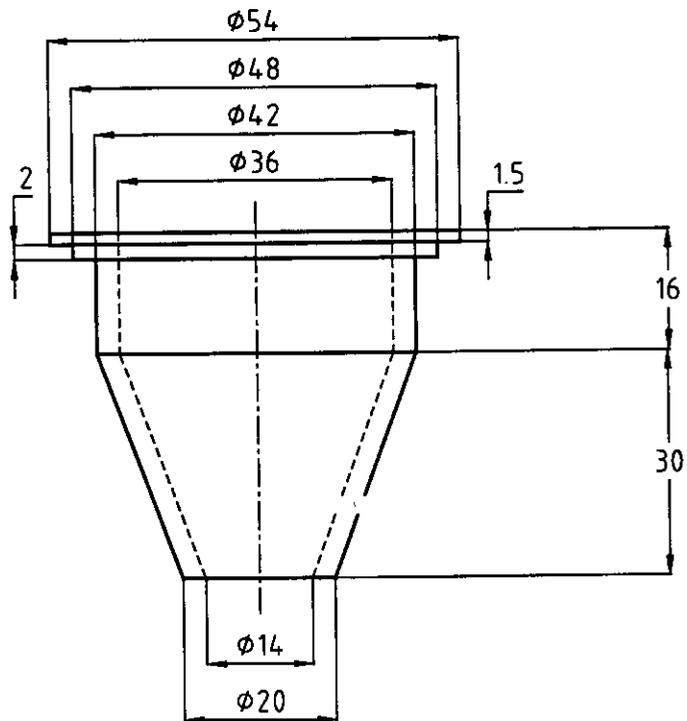


Réduction de 2.2

16	01	Couvert 2	Aluminium	
15	01	Pignon	A33	
14	01	Carter 2	Aluminium	
13	01	Butée	Acier doux	
12	01	Bague de friction	Bronze	
11	06	Vis CHc M6	Acier doux	
10	02	Couvert 1	Aluminium	
09	01	Manette	Acier doux	
08	01	Pignon	A33	
07	01	Pignon	A33	
06	01	Carter 1	Aluminium	
05	02	Cremaillere	A33	
04	02	Vis CHc M10	Acier doux	
03	02	Traverse	Acier doux	
02	01	Anneau	A33	
01	01	Buse	A33	
Rep.	Nb.	Désignation	Matière	Observation

ITG = 0.1

Echelle=1:2	ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE	
E.N.P EL - HARRACHÉ (ALGER)		
BRITAH Abdelmalek	ATOMISEUR	



ITG = 0.1 Matière : A33 Nbre = 01

Echelle = 1:1

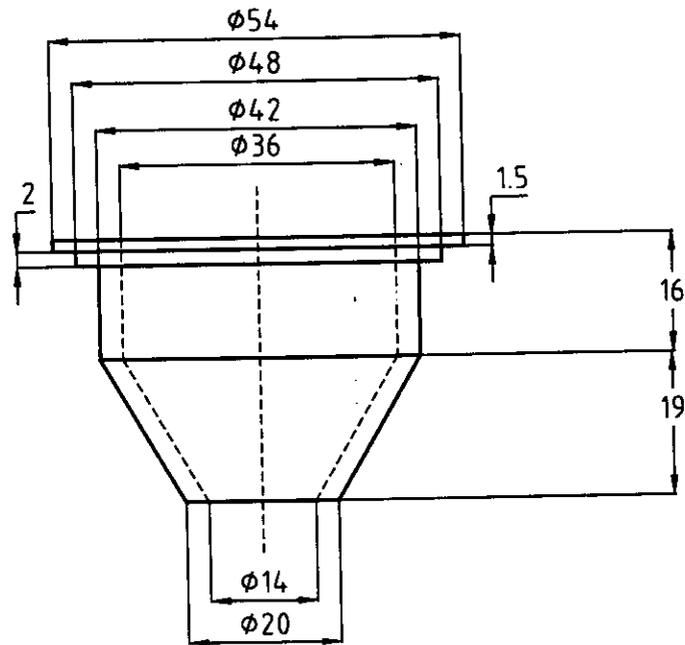
ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE Rep. 01
CONE INTERIEUR DE LA BUSE 20°



E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

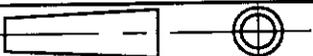
ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A33 Nbre = 01

Echelle = 1:1

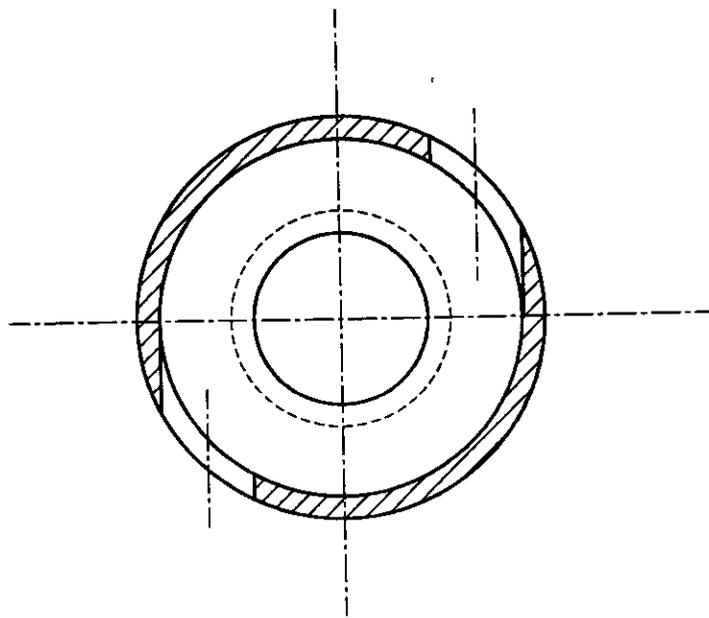
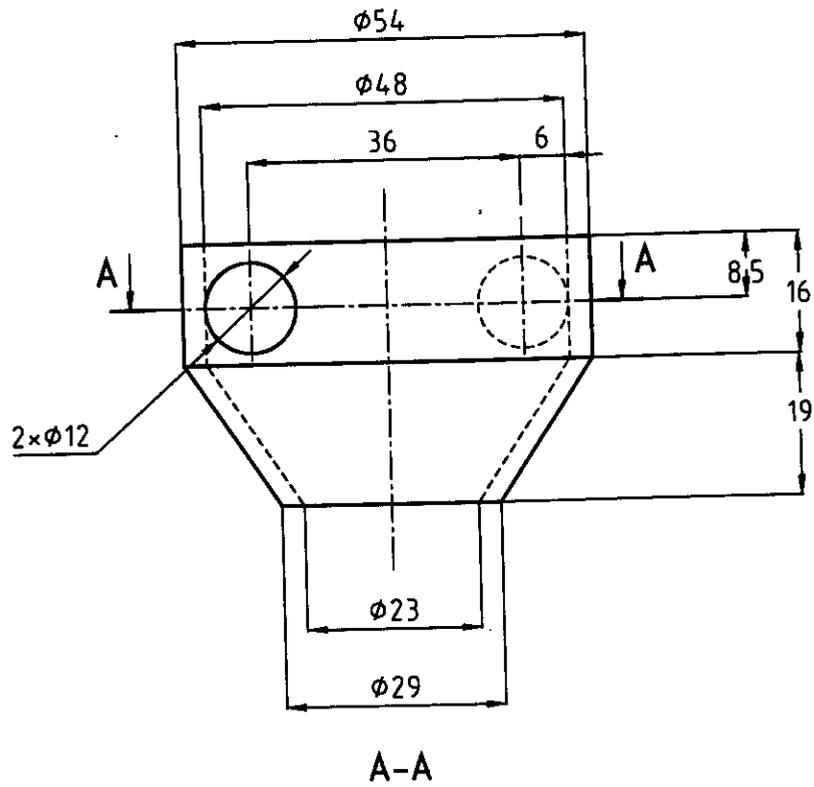
ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE Rep. 01
CONE INTERIEUR DE LA BUSE 30°



E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A33 Nbre = 01

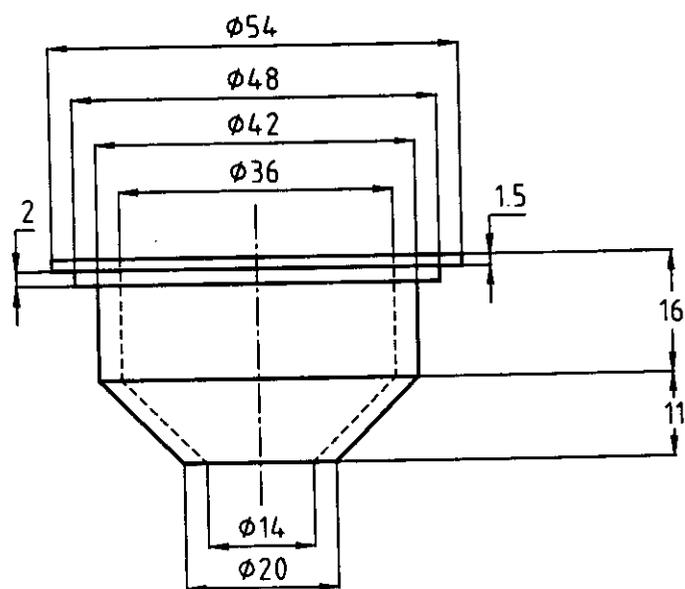
Echelle = 1:1

ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE Rep. 01
CONE EXTERIEUR DE LA BUSE 30°

E.N.P EI - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A33 Nbre = 01

Echelle = 1:1

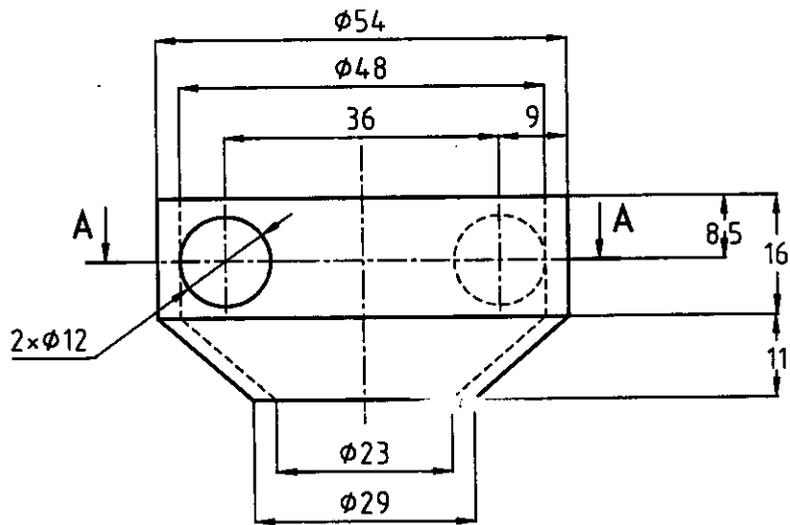
ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE Rep. 01
CONE INTERIEUR DE LA BUSE 45°



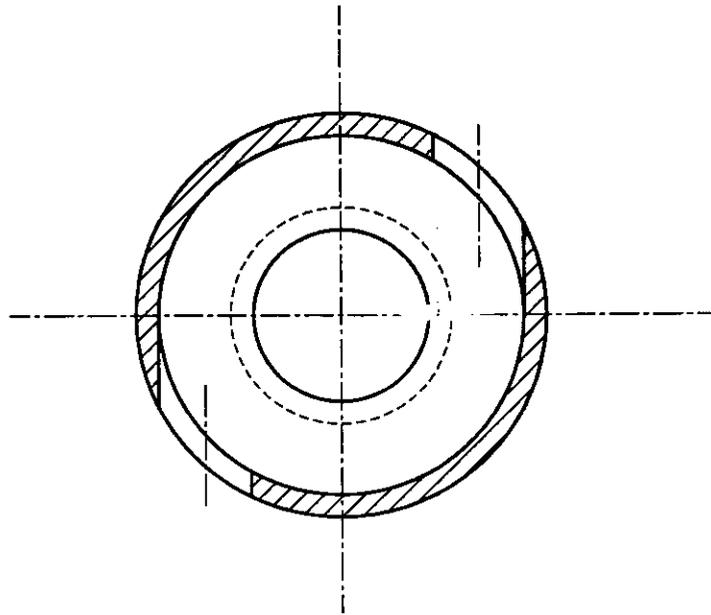
E.N.P EL - HARRACHF (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



A-A



ITG = 0.1 Matière : A33 Nbre = 01

Echelle = 1:1

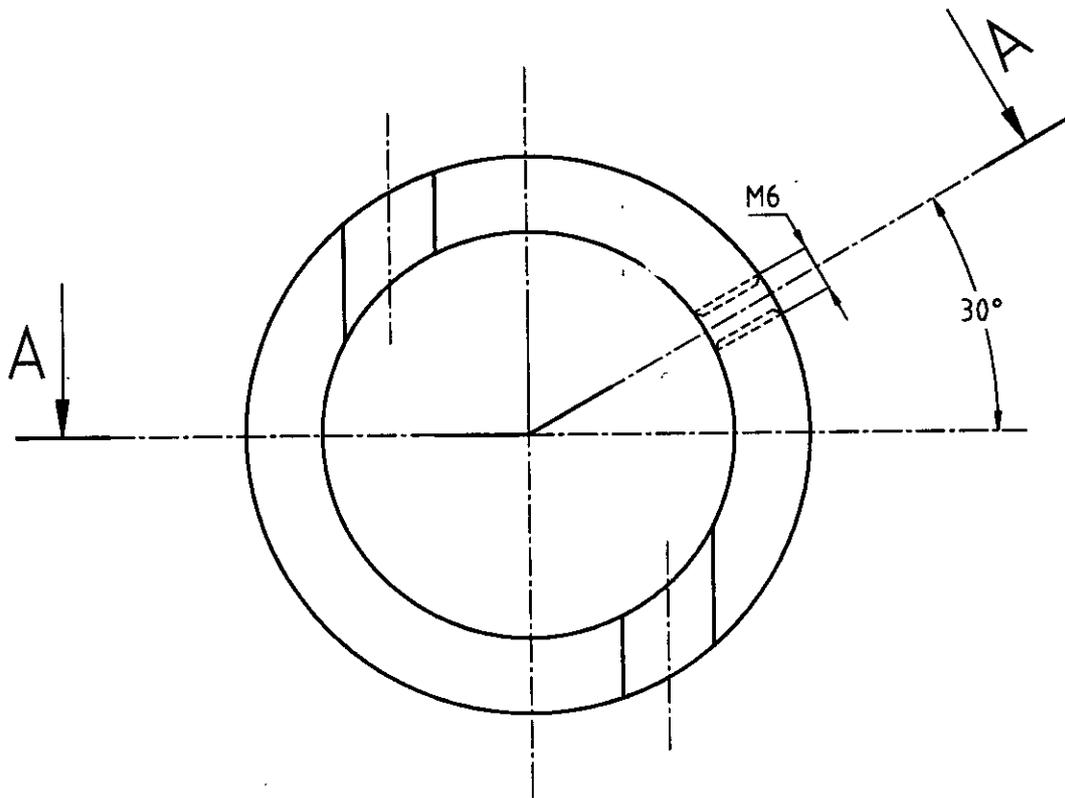
ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE Rep. 01
CONE EXTERIEUR DE LA BUSE 45°



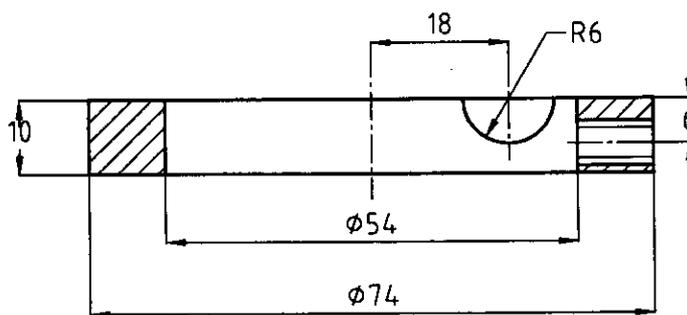
E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



A-A



ITG = 0.1

Matière : A33

Nbre = 01

Echelle = 1:1

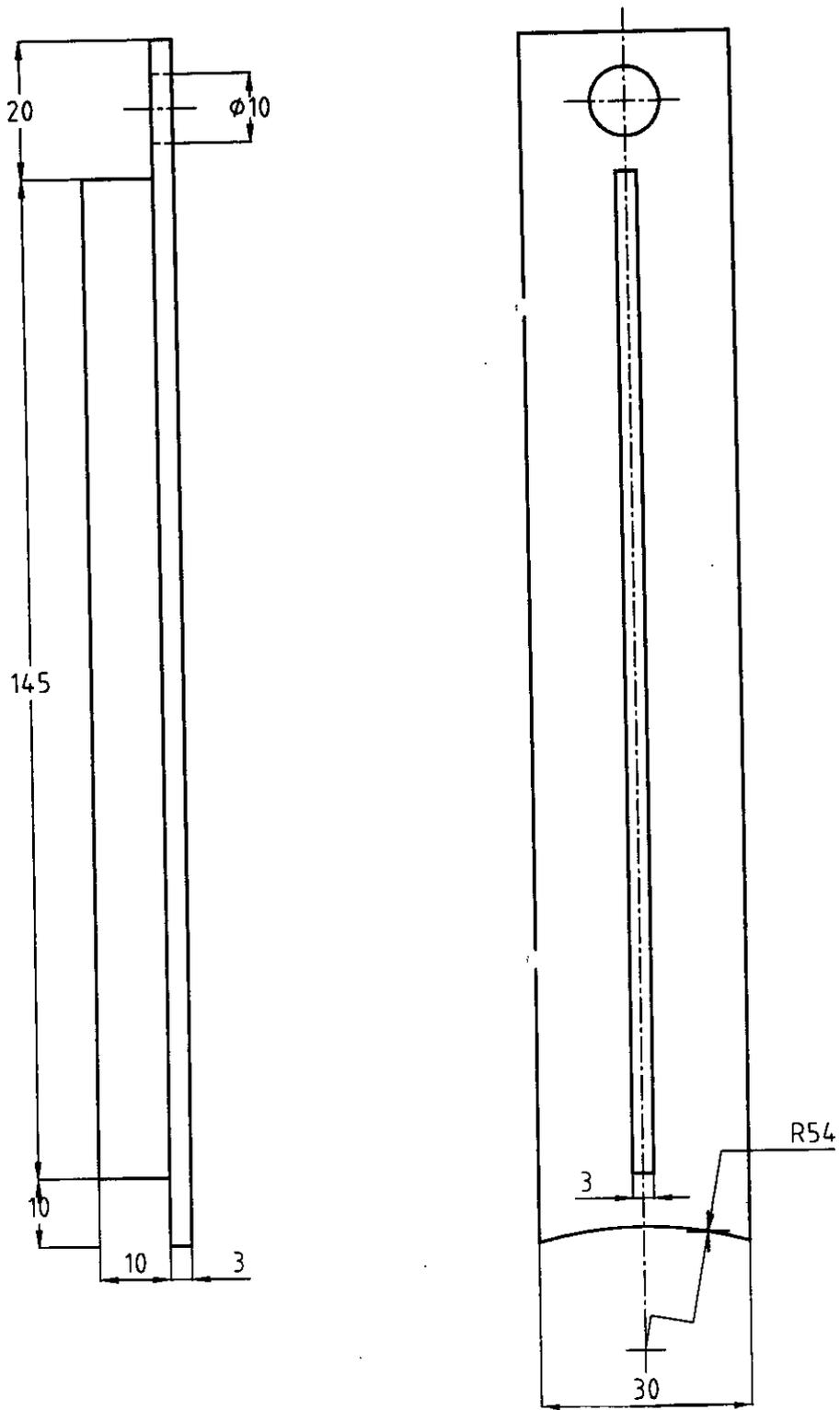
ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE Rep. 02
ANNEAU POUR FIXATION DE LA BUSE



E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Acier doux Nbre = 02

Echelle = 1:1

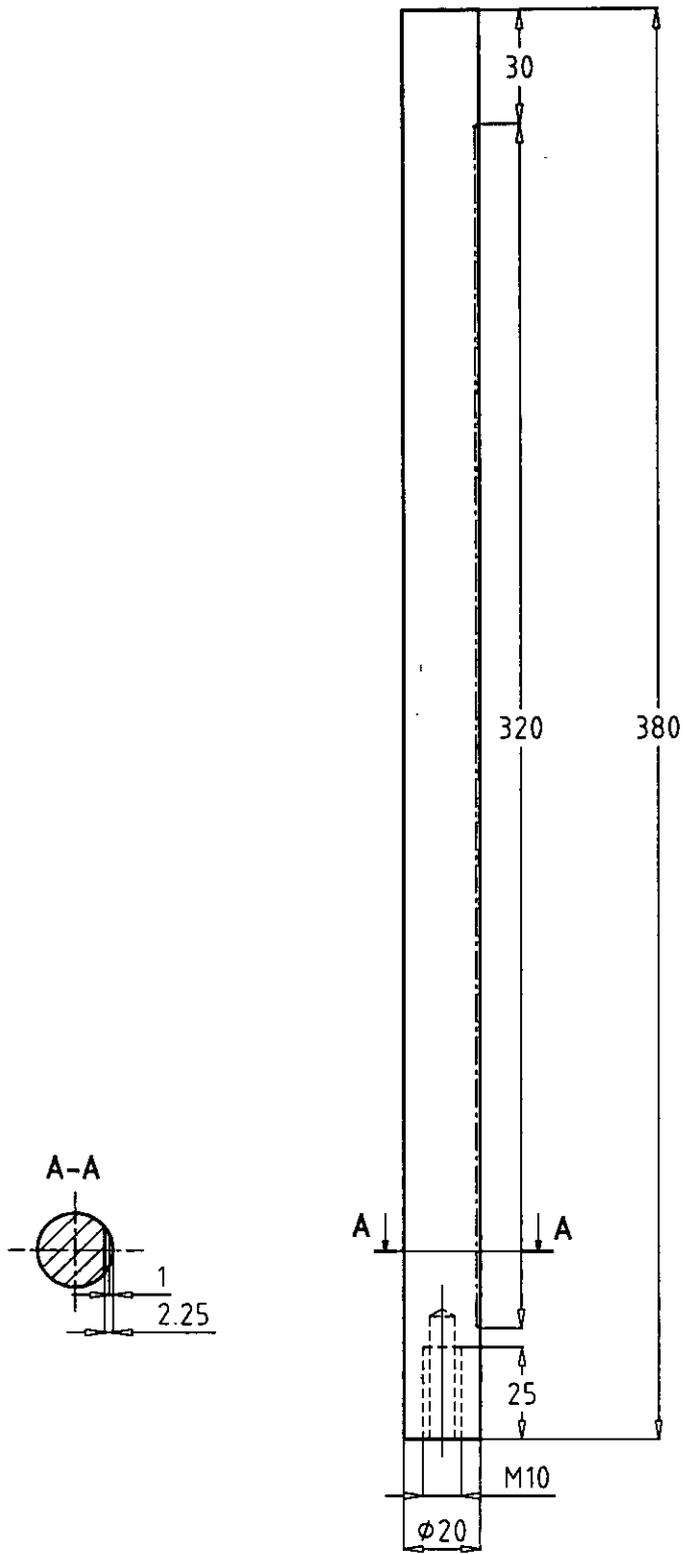
ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE Rep. 03
TRAVERSE DE LA BUSE



E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A33 Nbre = 02

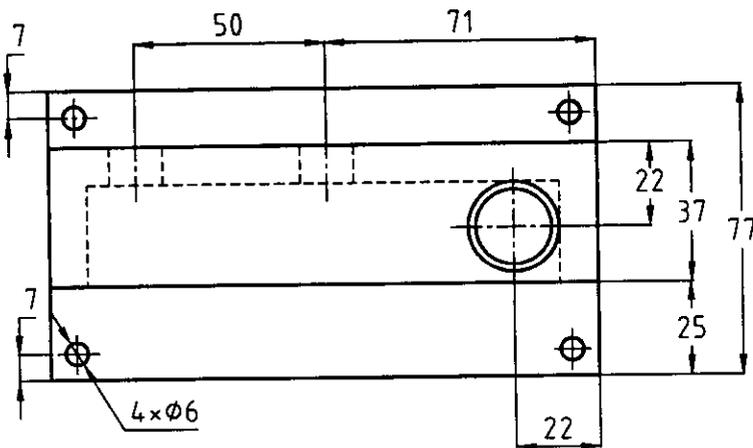
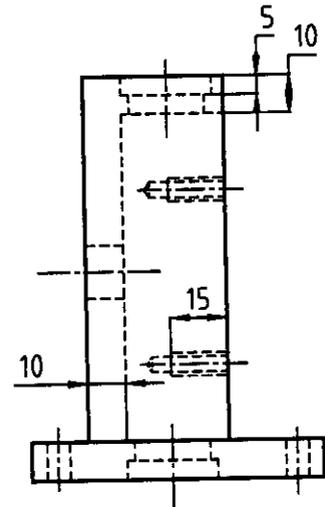
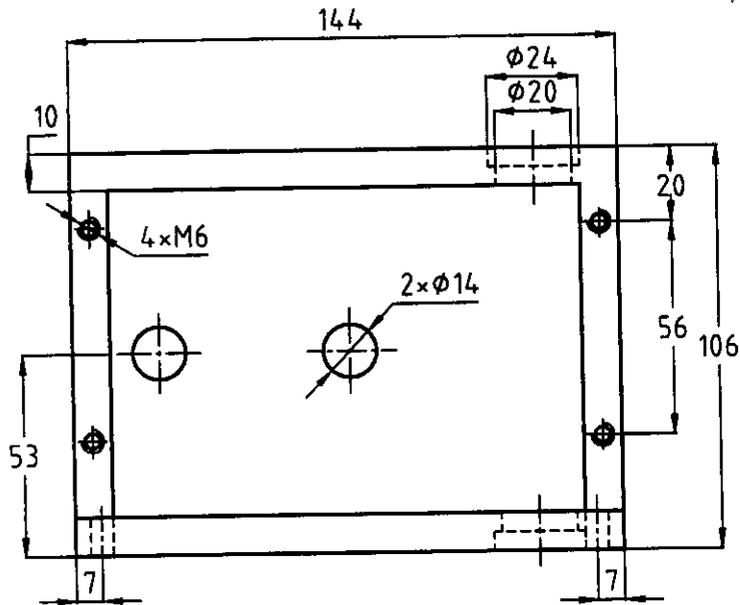
Echelle = 1:2

ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE Rep. 05
CREMAILLERE

E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Aluminium Nbre = 01

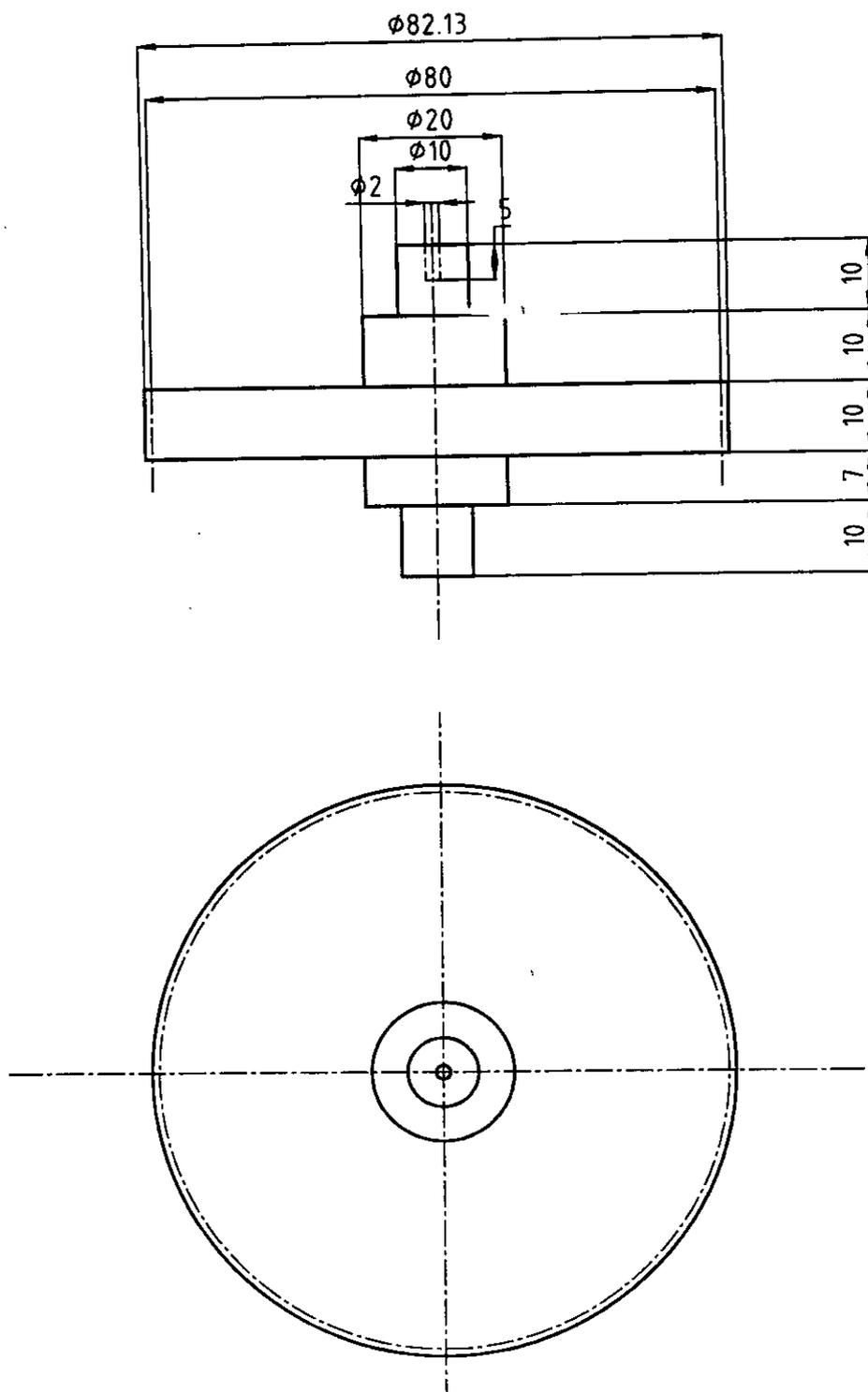
Echelle = 1:2

ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE Rep. 06
CARTER 1 POUR PIGNON D'ENTRAINEMENT

E.N.P El - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A33 Nbre = 01 m = 01 z = 80

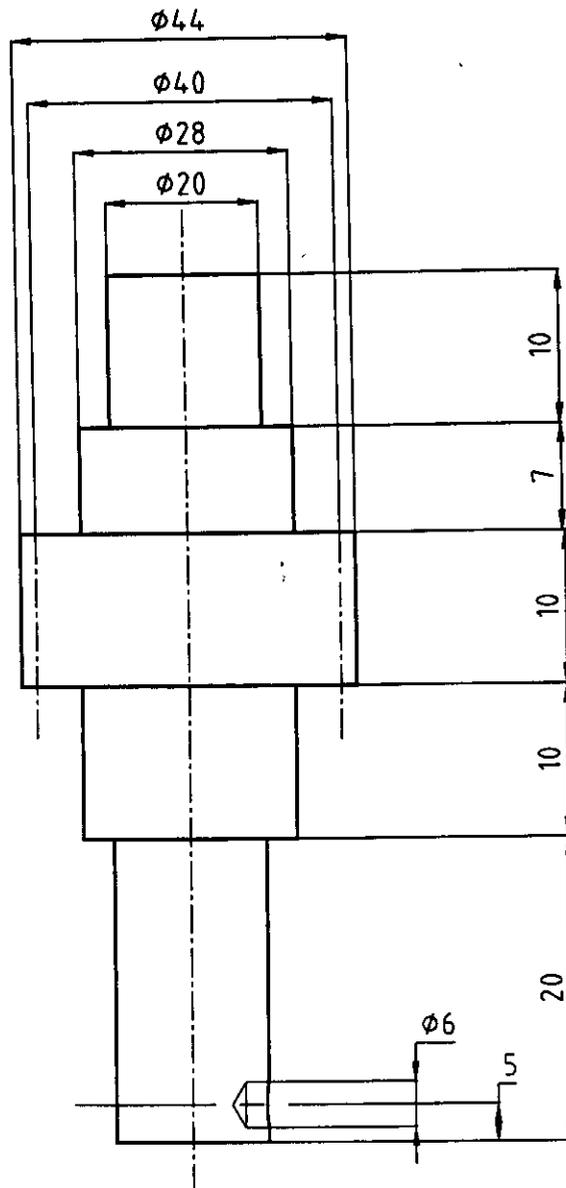
Echelle = 1:1

ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE Rep. 07
 PIGNON DE LA ROUE DENTEE

E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
 Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A33 Nbre = 01 m = 01 z = 20

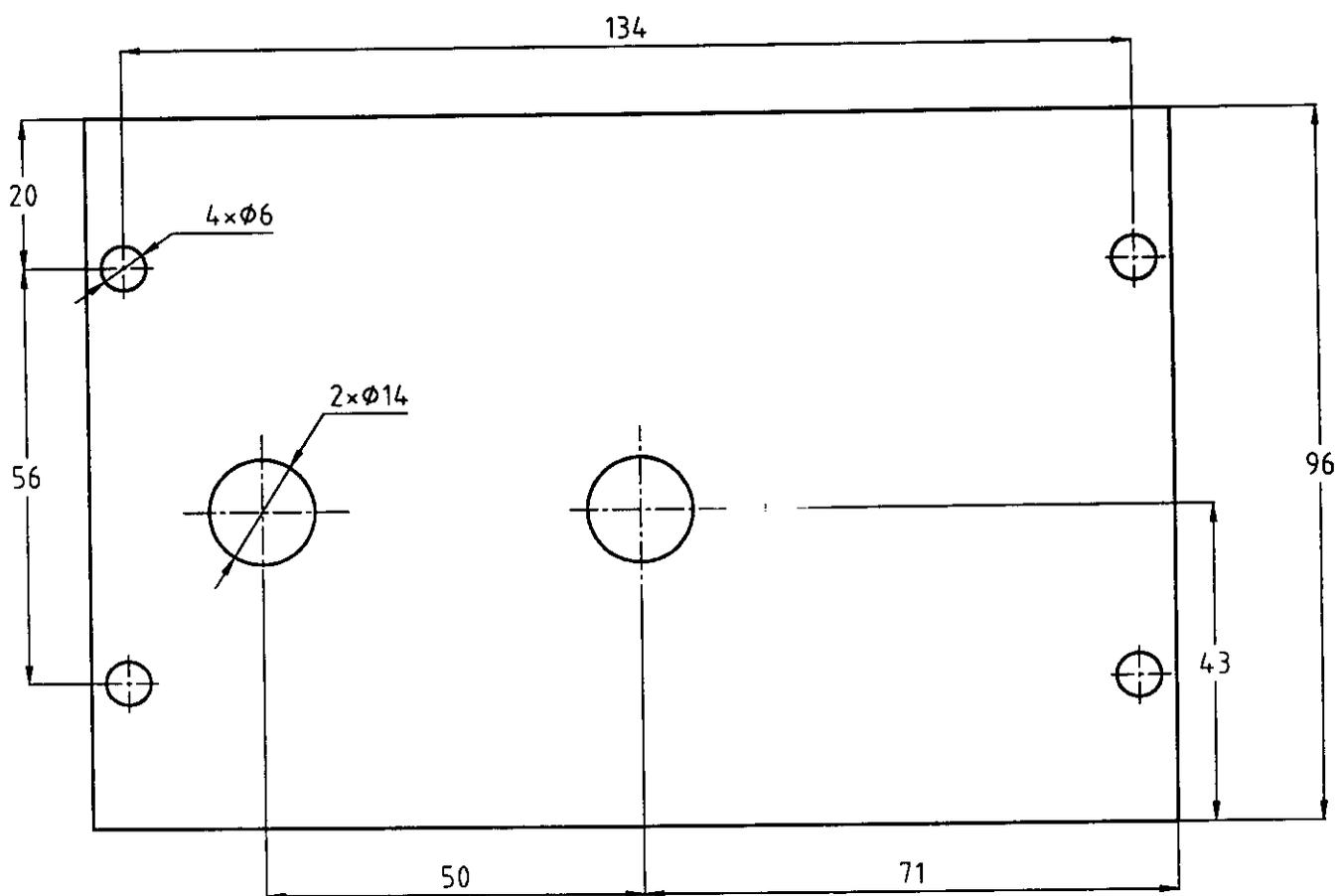
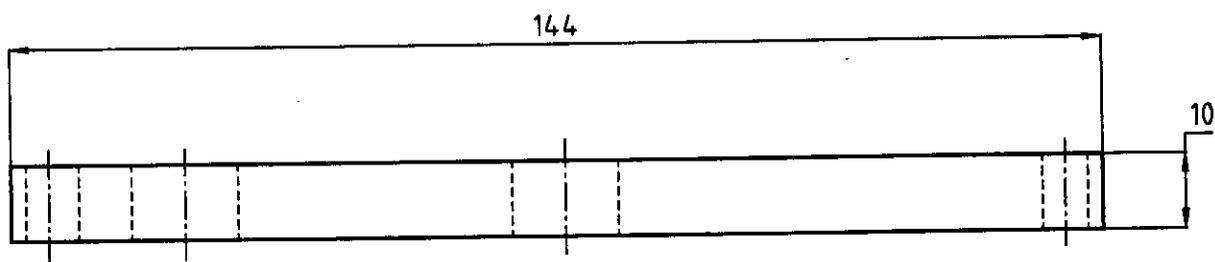
Echelle = 2:1

ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE Rep. 08
 PIGNON D'ENTRAINEMENT

E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
 Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Aluminium Nbre = 01

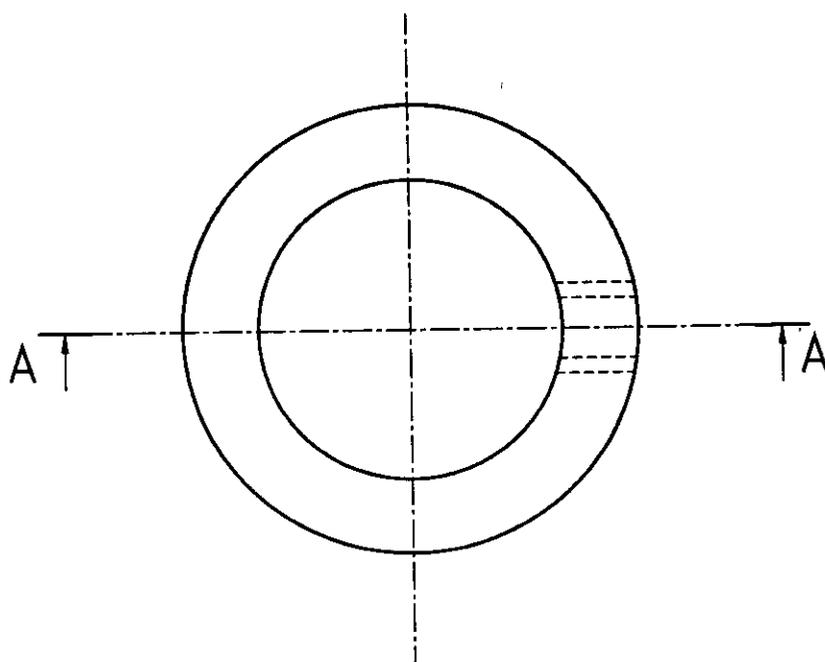
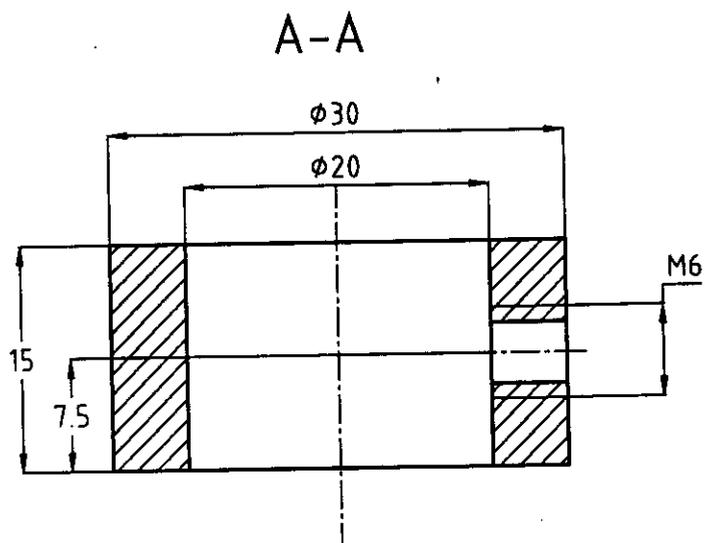
Echelle = 1:1

ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE Rep. 10
COUVERT POUR CARTER 1

E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

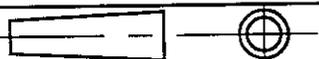
ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Acier doux Nbre = 01

Echelle = 2:1

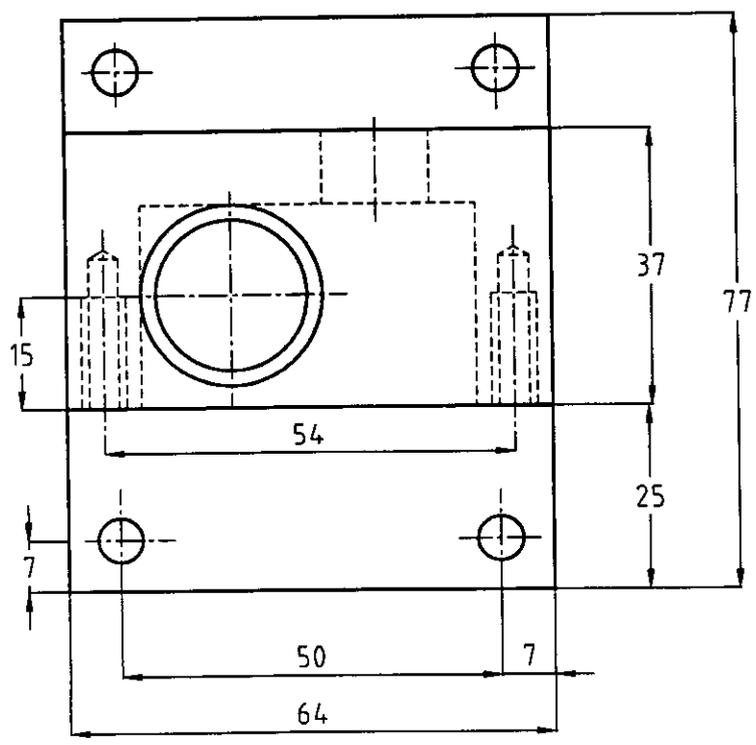
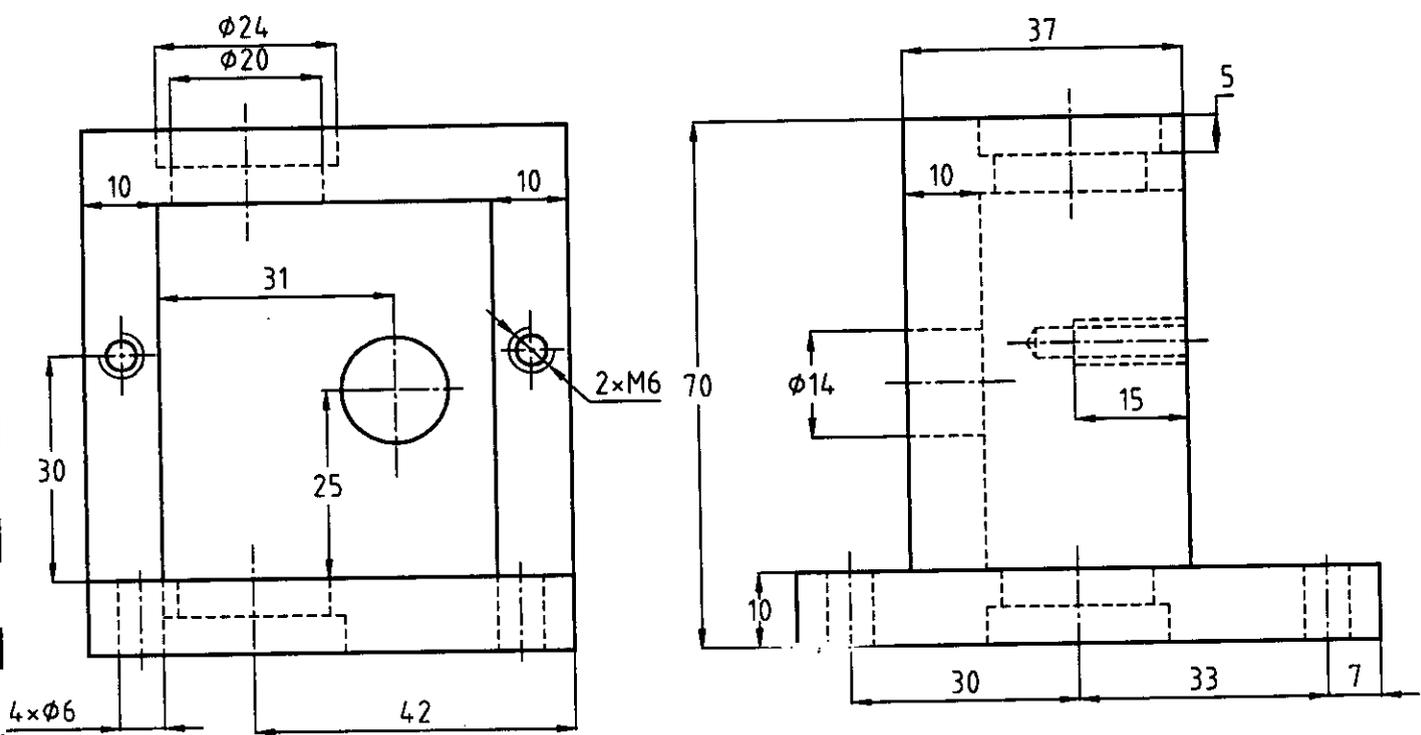
ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE Rep. 13
FIN DE BUTEE DE LA CREMAILLERE



E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



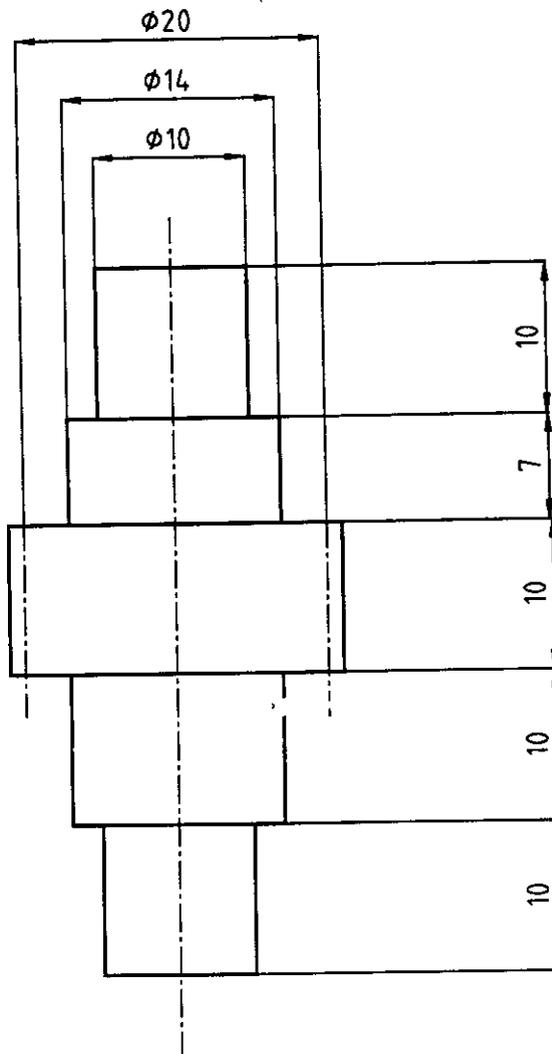
ITG = 0.1 Matière : Aluminium Nbre = 01

Echelle = 1:1 ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE Rep. 14
 CARTER 2 POUR L'ENSEMBLE DE GUIDAGE

E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
 Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A33 Nbre = 01 m = 01 z=20

Echelle = 2:1

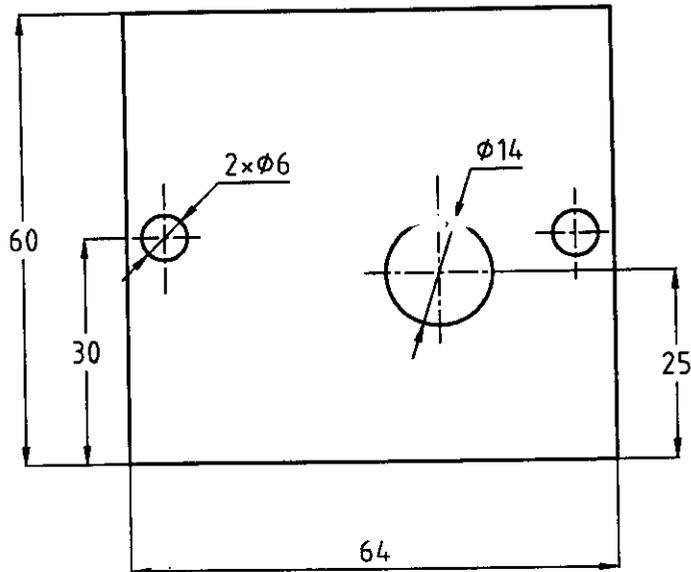
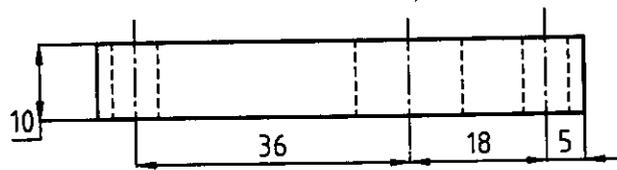
ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE Rep. 15
 PIGNON DE GUIDAGE



E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
 Abdelmalek

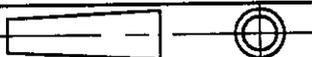
ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Tole noire Nbre = 01

Echelle = 1:1

ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE Rep. 16
COUVERT POUR CARTER 2



E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

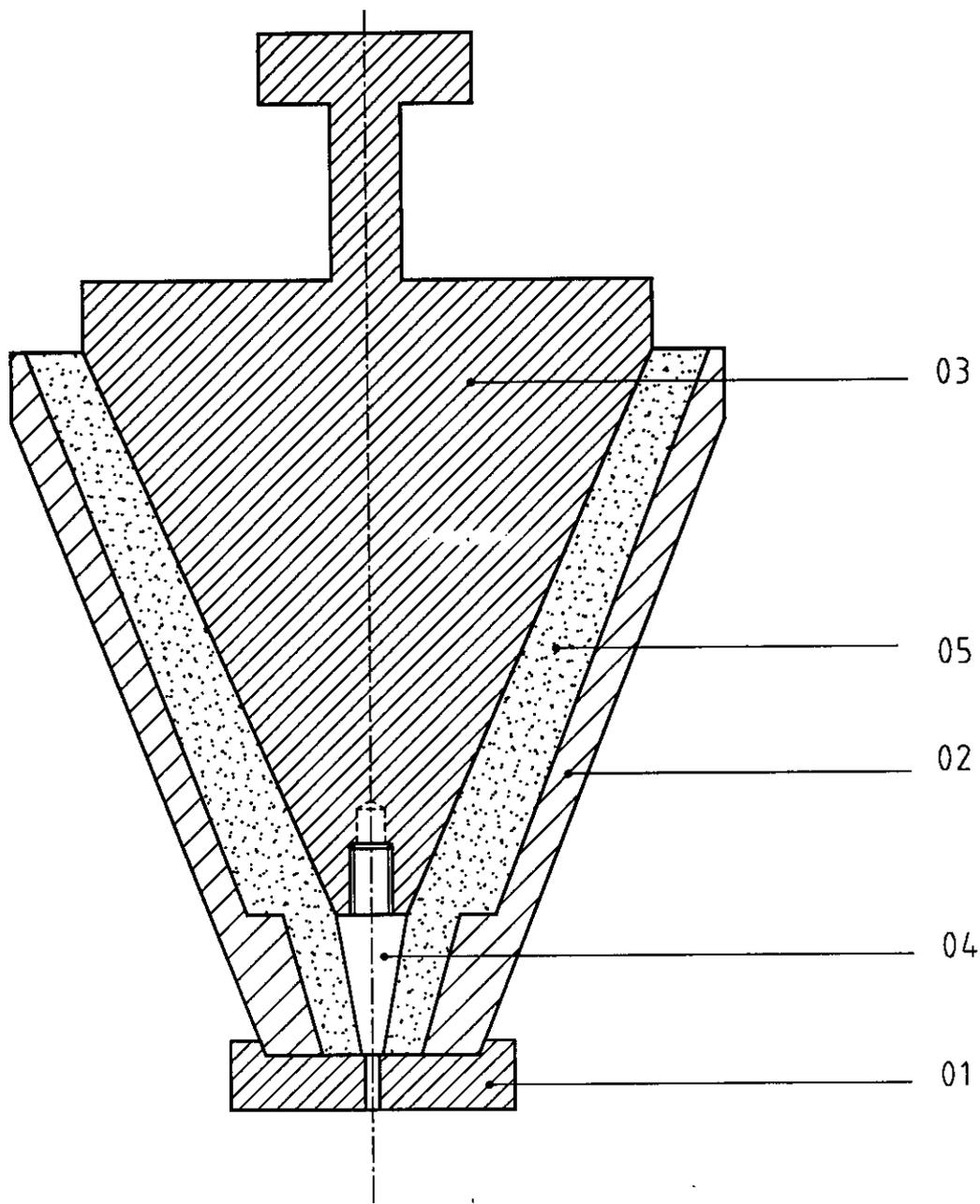
BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR

ANNEXE I

Sous-ensembles de l'Atomiseur

III- Ensemble du moule



ITG = 0.1 Matière : Acier doux Nbre = 01

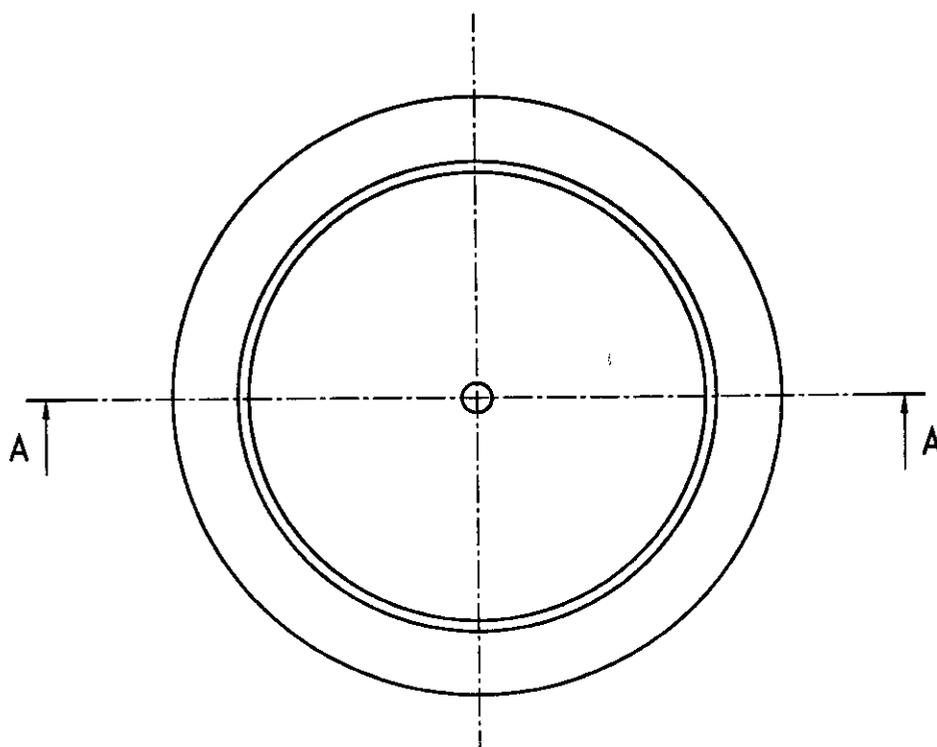
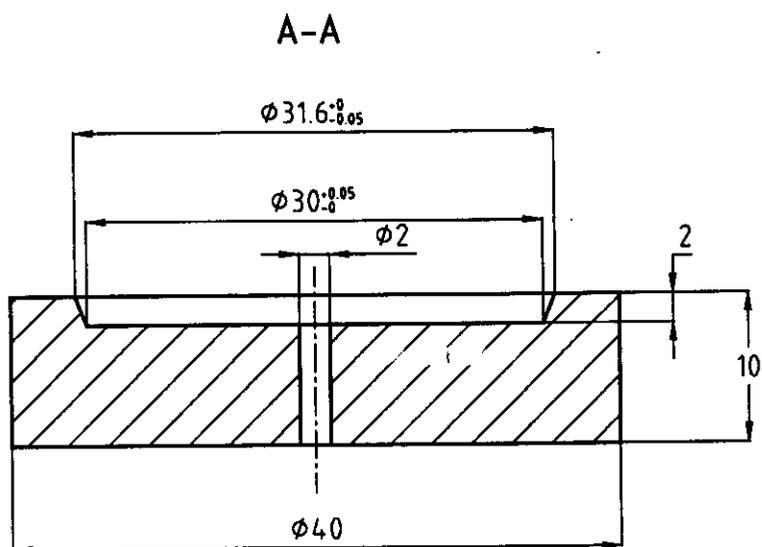
Echelle = 1:1

ENSEMBLE DU MOULE

E.N.P El - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A33 Nbre = 01

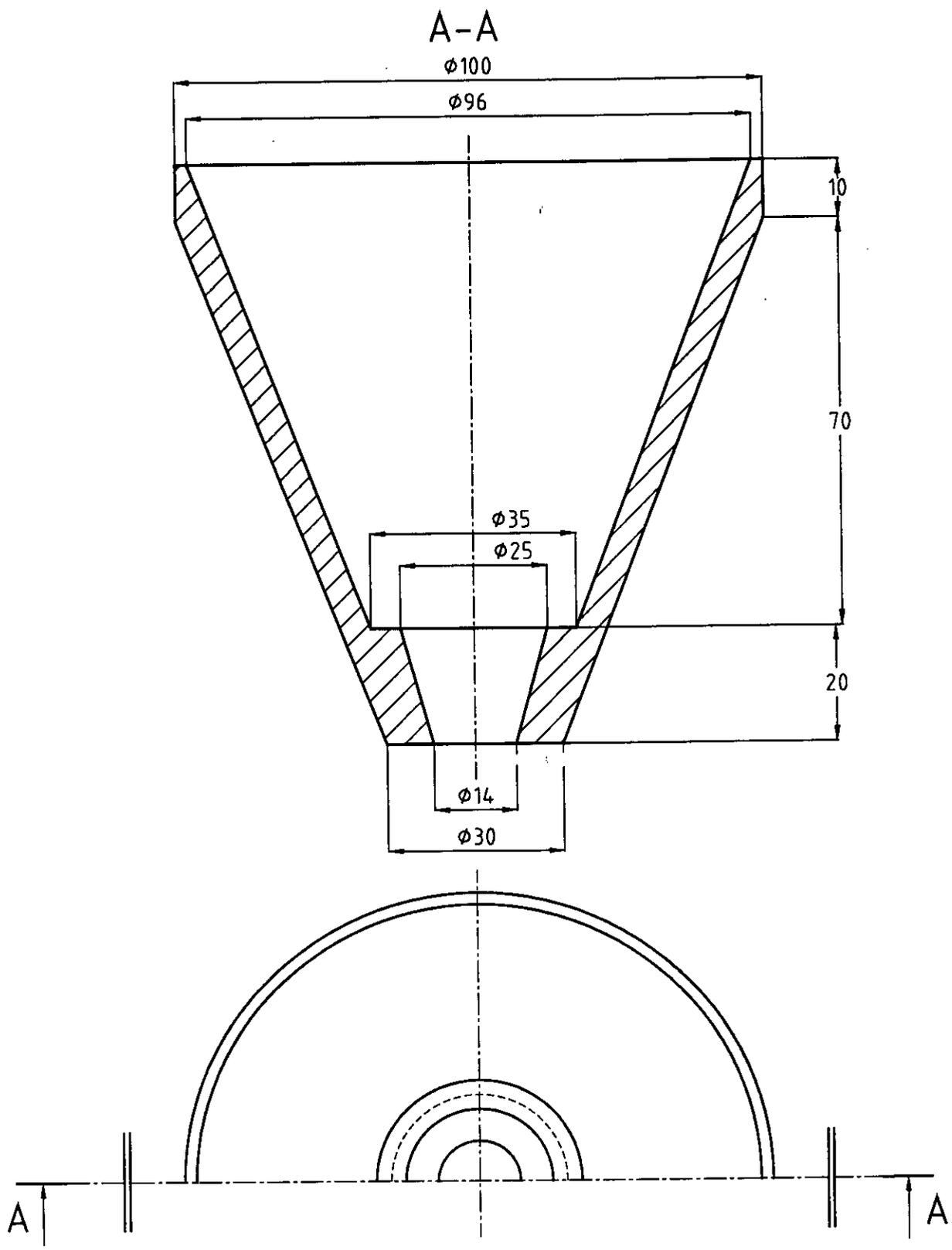
Echelle = 2:1

MOULE Rep. 01
APPUI POUR NOYAU ET MOULE

E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A33 Nbre = 01

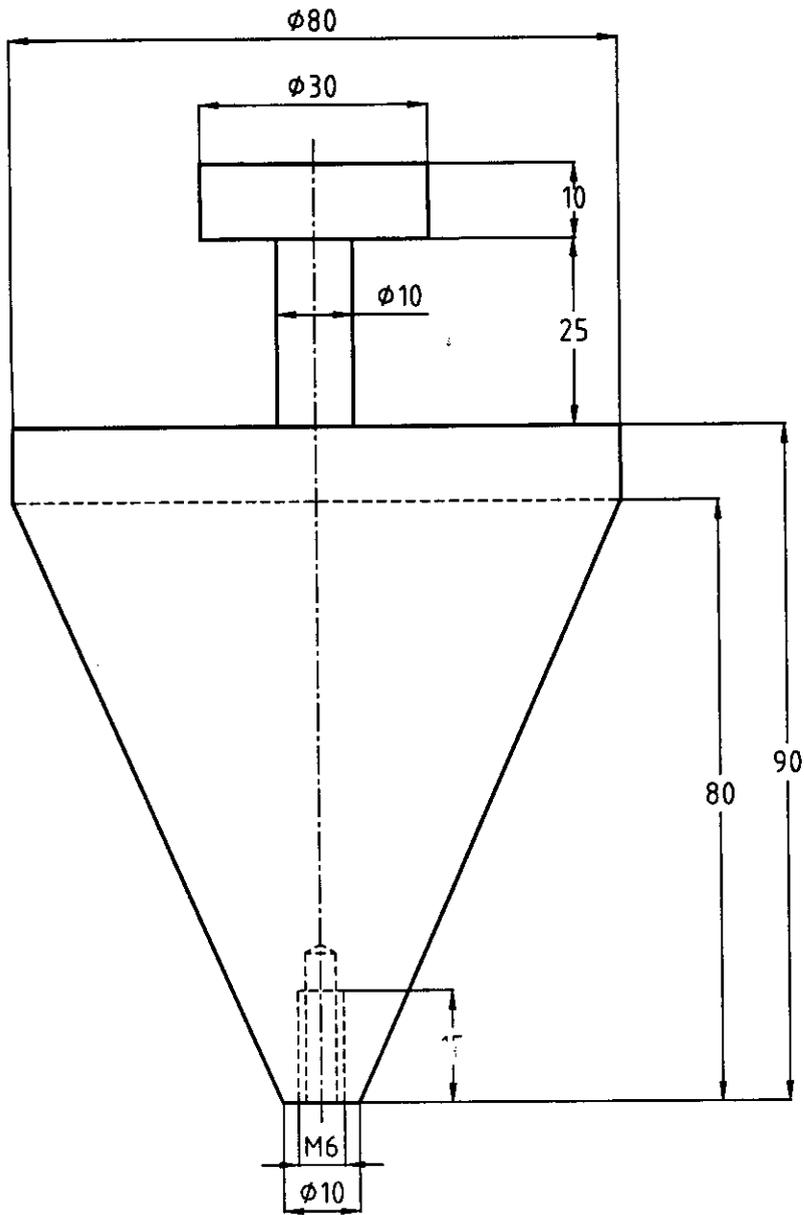
Echelle = 1:1

MOULE Rep. 02
MOULE

E.N.P EI - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A33 Nbre = 01

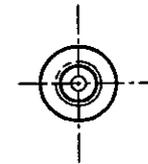
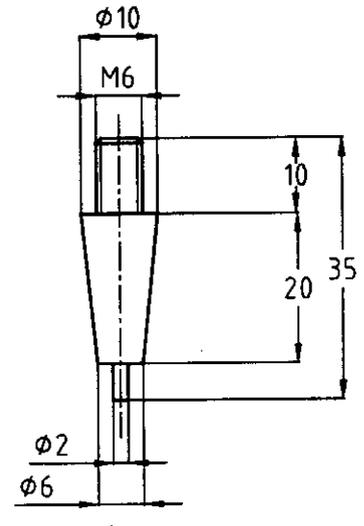
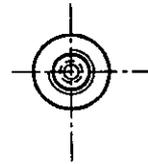
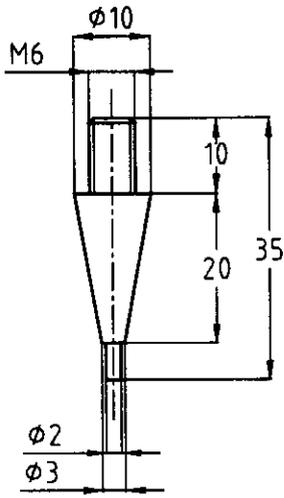
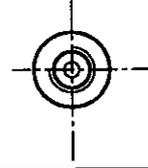
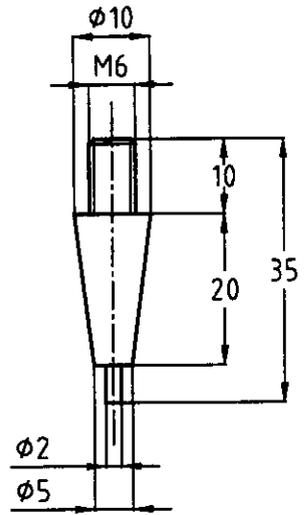
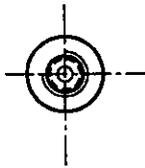
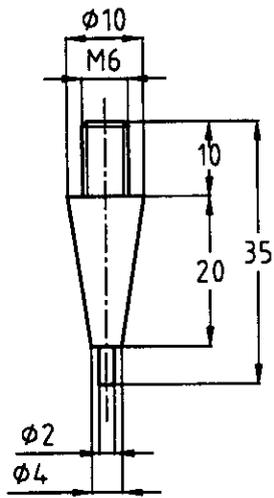
Echelle = 1:1

MOULE Rep. 03
NOYAU

E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A33 Nbre = 01

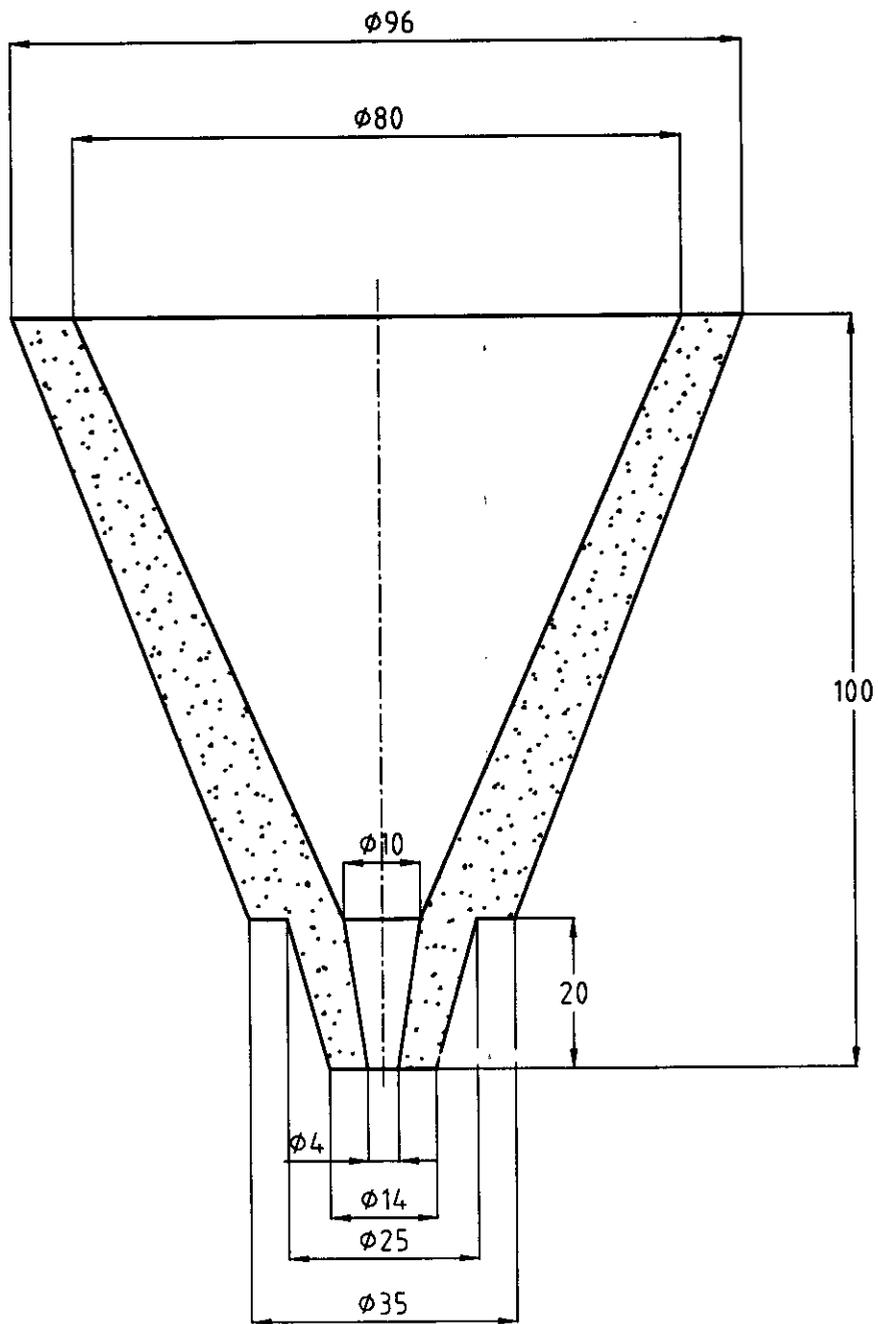
Echelle = 1:1

MOULE Rep. 04
PARTIES DEMONTABLES

E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Refractaire Nbre = 01

Echelle = 1:1

MOULE Rep. 05
ENTONNOIR POUR COULEE

E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

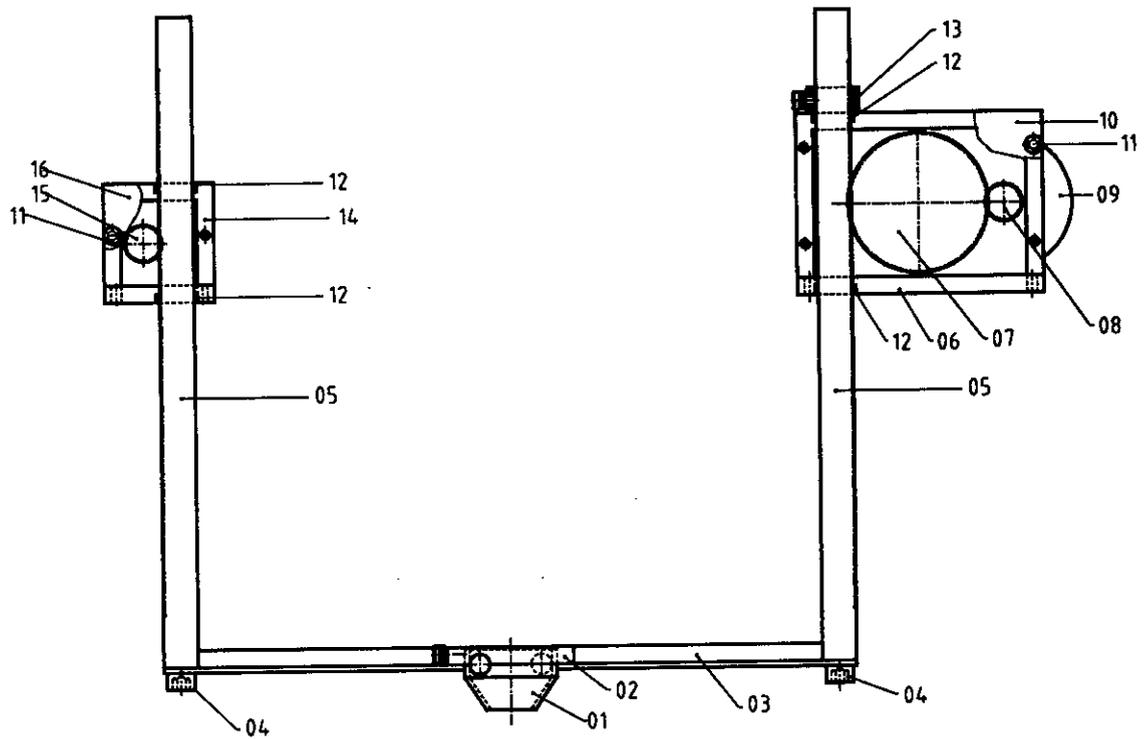
BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR

ANNEXE I

Sous-ensembles de l'Atomiseur

II- Ensemble de déplacement de la buse

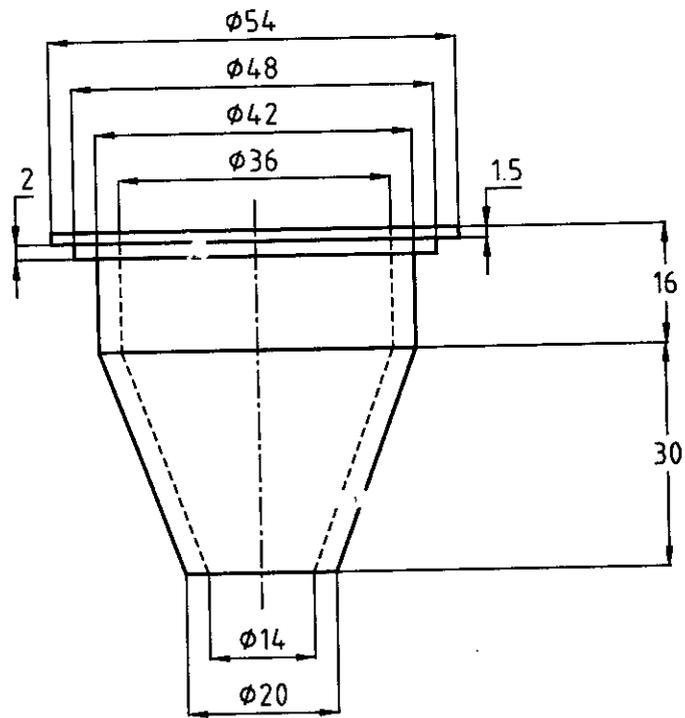


Réduction de 2.2

16	01	Couvert 2	Aluminium	
15	01	Pignon	A33	
14	01	Carter 2	Aluminium	
13	01	Butée	Acier doux	
12	01	Bague de friction	Bronze	
11	06	Vis CHc M6	Acier doux	
10	02	Couvert 1	Aluminium	
09	01	Manette	Acier doux	
08	01	Pignon	A33	
07	01	Pignon	A33	
06	01	Carter 1	Aluminium	
05	02	Cremaillere	A33	
04	02	Vis CHc M10	Acier doux	
03	02	Traverse	Acier doux	
02	01	Anneau	A33	
01	01	Buse	A33	
Rep.	Nb.	Désignation	Matériau	Observation

ITG = 0.1

Echelle=1:2	ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE	
	E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)	
BRITAH Abdelmalek	ATOMISEUR	



ITG = 0.1 Matière : A33 Nbre = 01

Echelle = 1:1

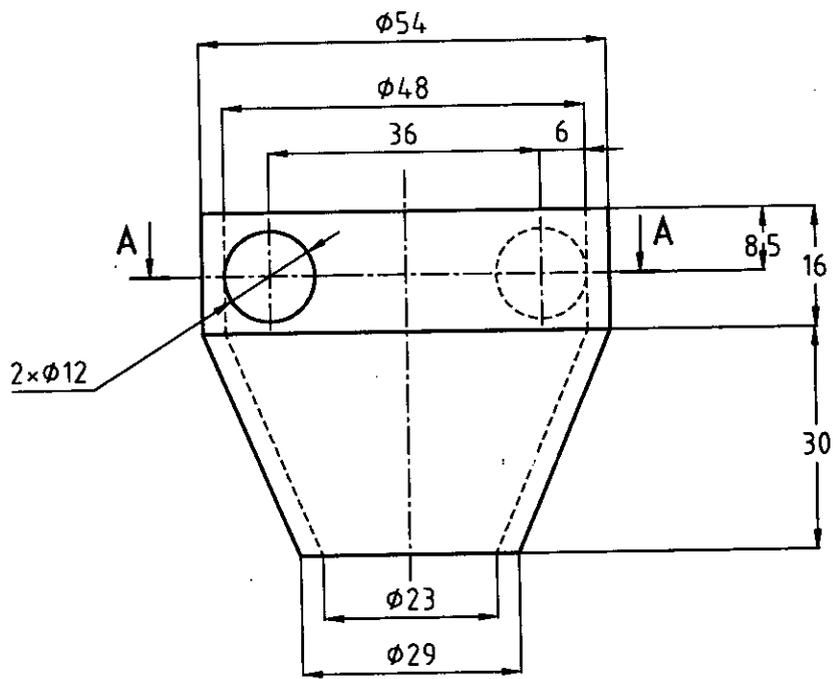
ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE Rep. 01
CONE INTERIEUR DE LA BUSE 20°



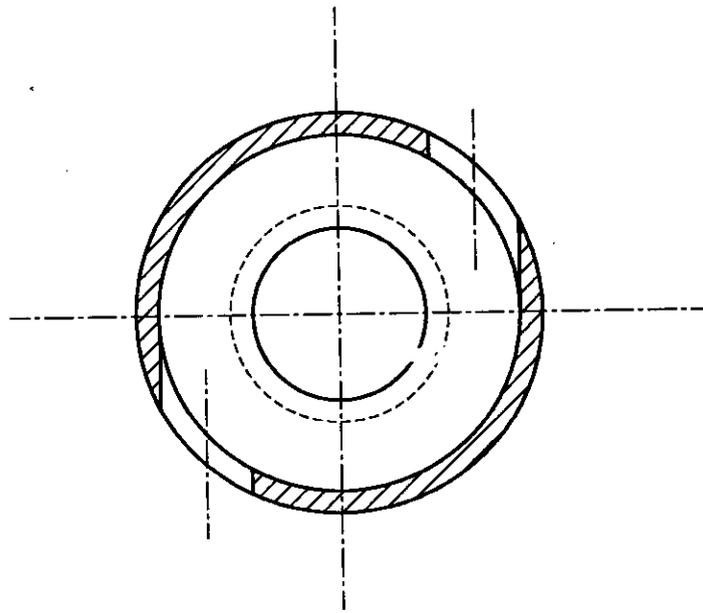
E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



A-A



ITG = 0.1

Matière : A33

Nbre = 01

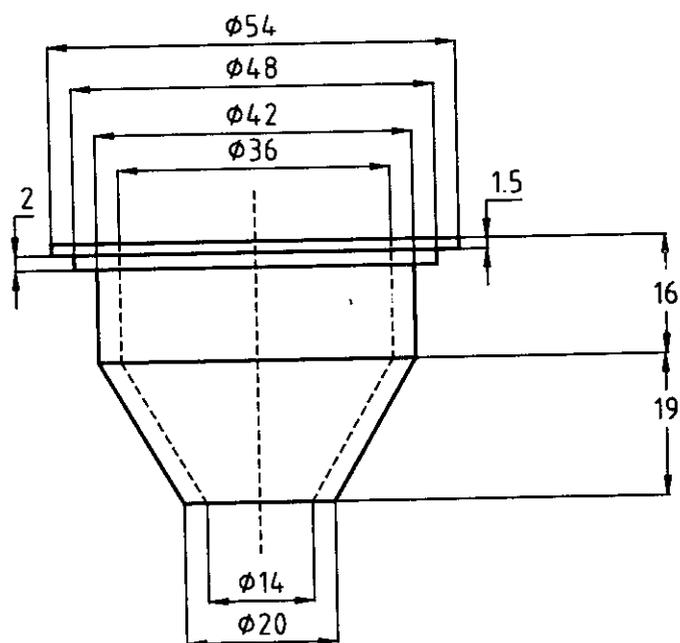
Echelle = 1:1

ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE Rep. 01
CONE EXTERIEUR DE LA BUSE 20°

E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

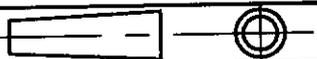
ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A33 Nbre = 01

Echelle = 1:1

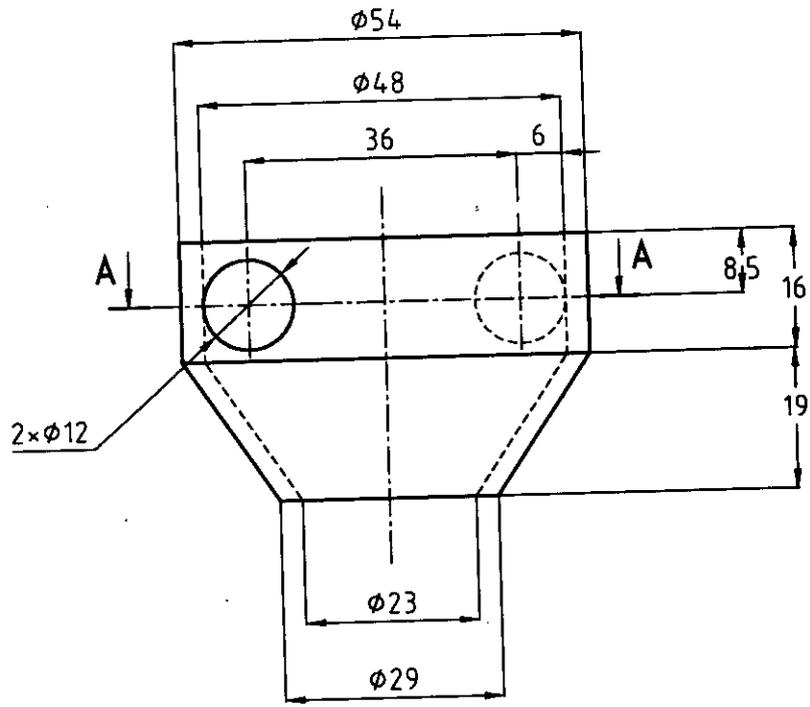
ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE Rep. 01
CONE INTERIEUR DE LA BUSE 30°



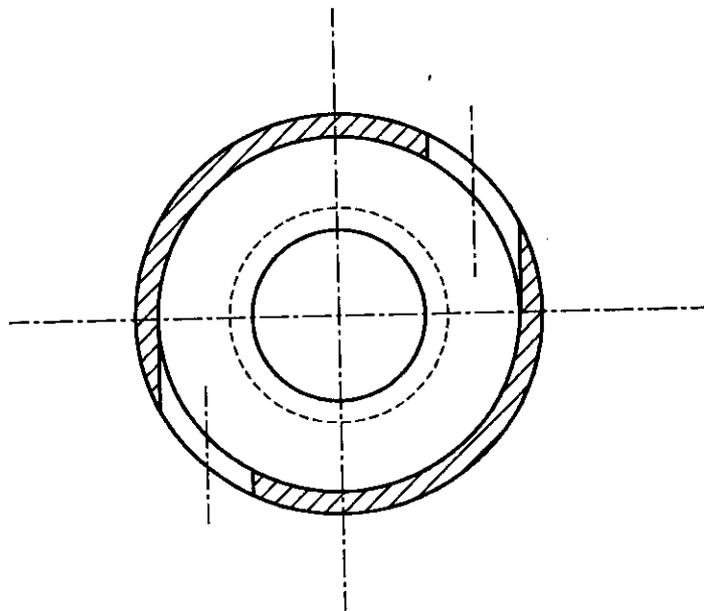
E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



A-A



ITG = 0.1 Matière : A33 Nbre = 01

Echelle = 1:1

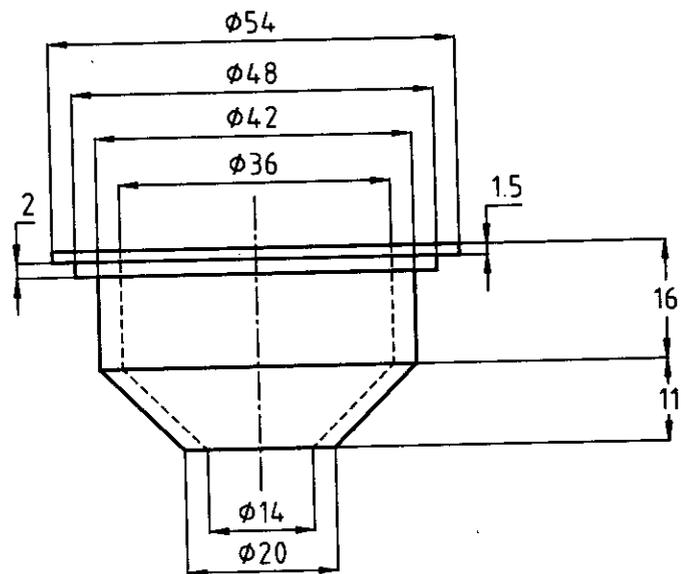
ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE Rep. 01
CONE EXTERIEUR DE LA BUSE 30°



E.N.P EI - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A33 Nbre = 01

Echelle = 1:1

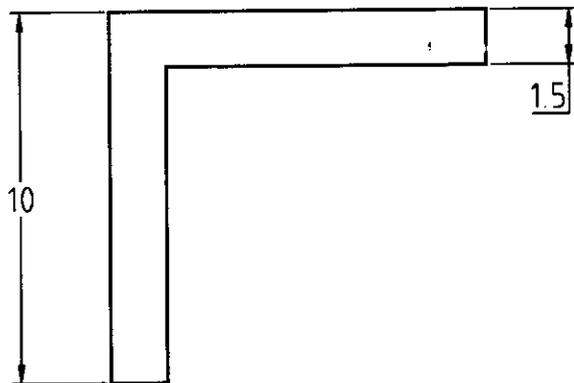
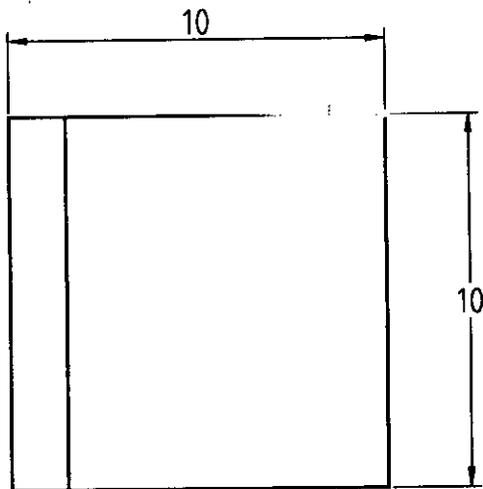
ENSEMBLE DE DEPLACEMENT DE LA BUSE Rep. 01
CONE INTERIEUR DE LA BUSE 45°



E.N.P EL - HARRACHF (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

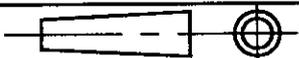
ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A 33 Nbre = 11

Echelle=5:1

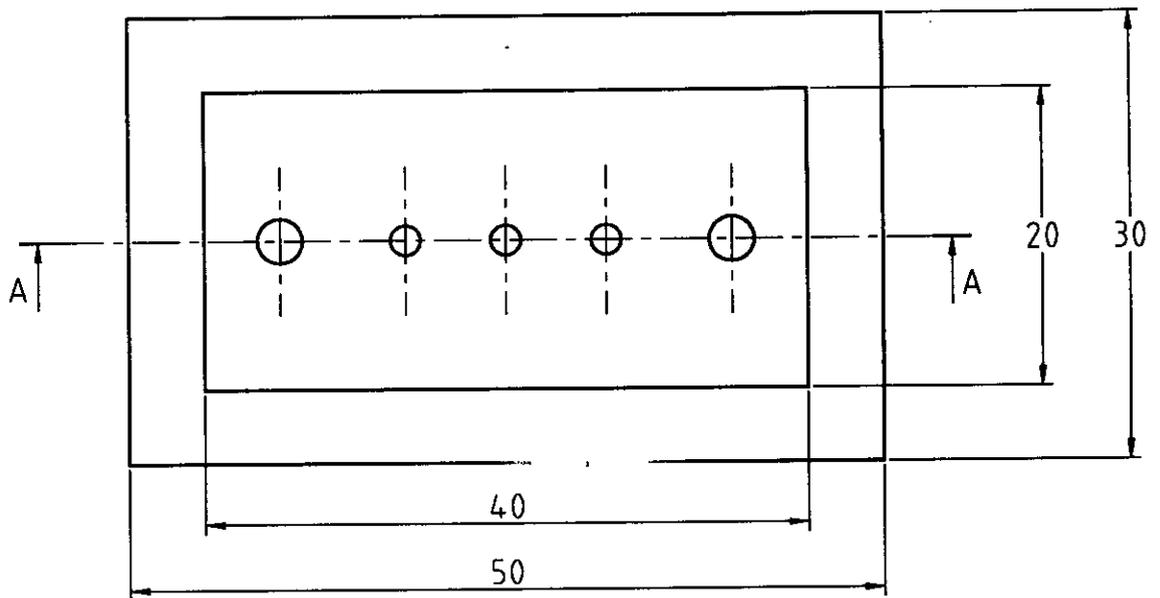
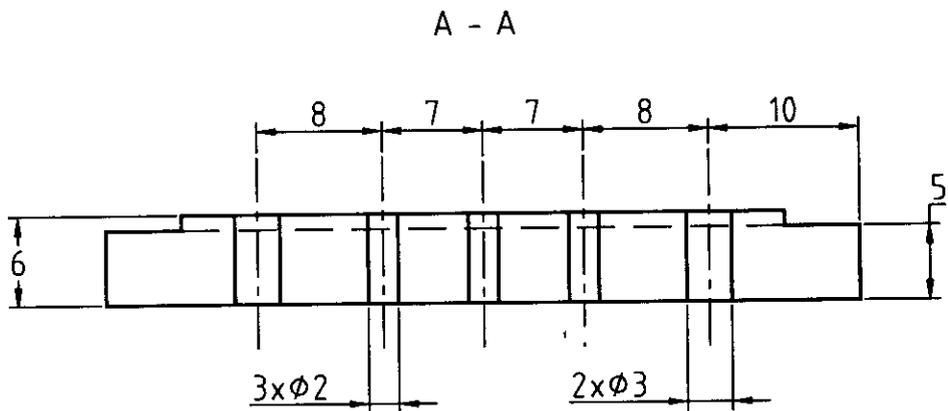
FOUR Rep. 01
Calle



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

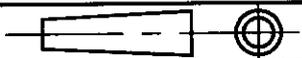
ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Réfractaire Nbre = 02

Echelle=2:1

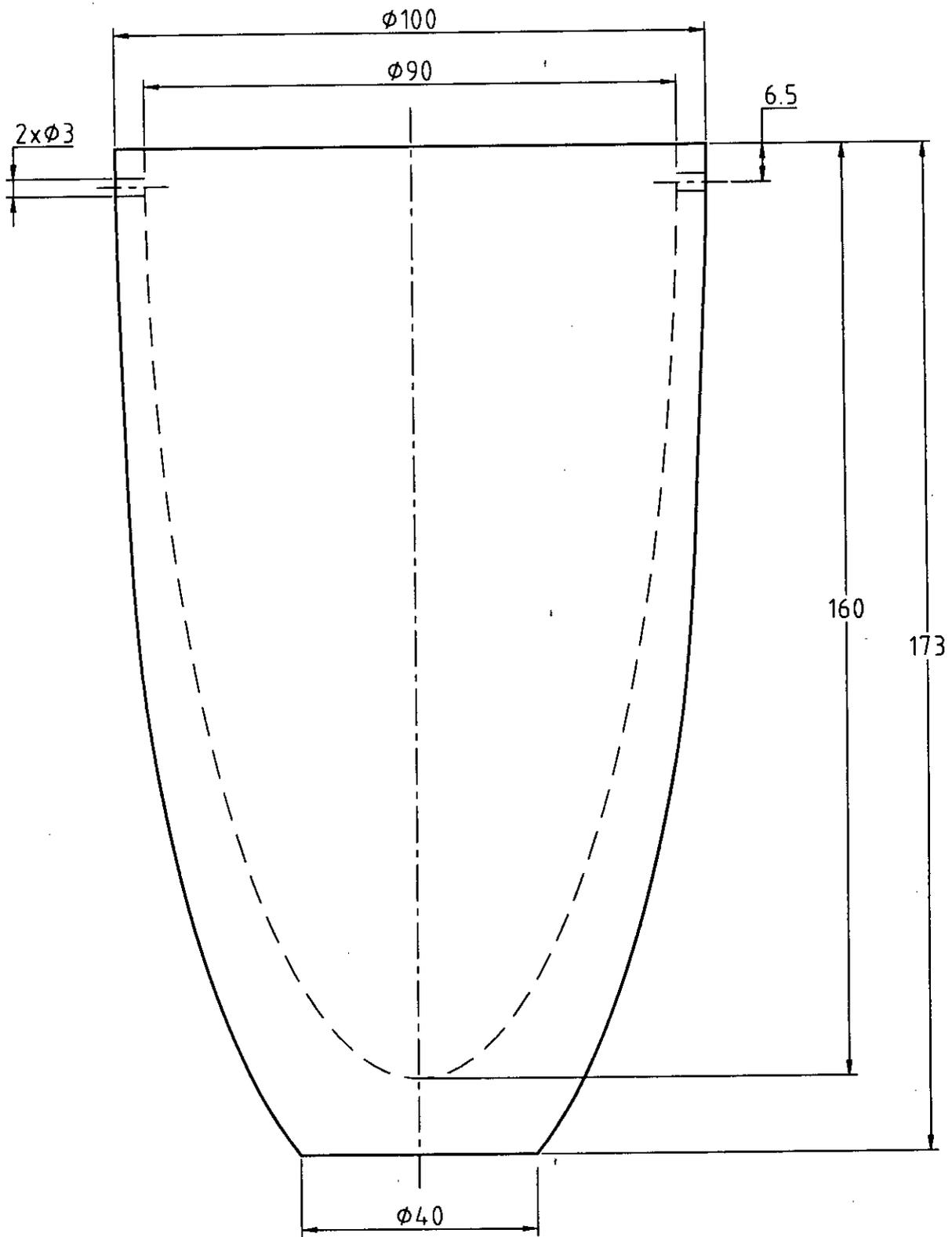
FOUR Rep. 06
Isolant



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

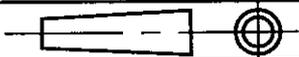
ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Réfractaire Nbre = 01

Echelle=1:1

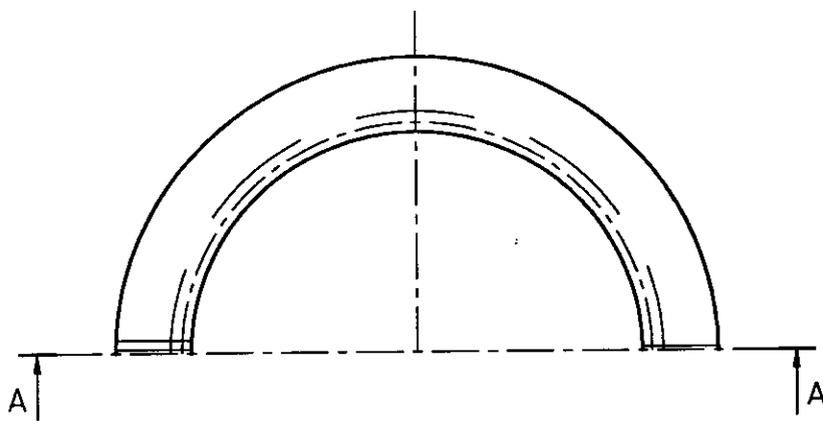
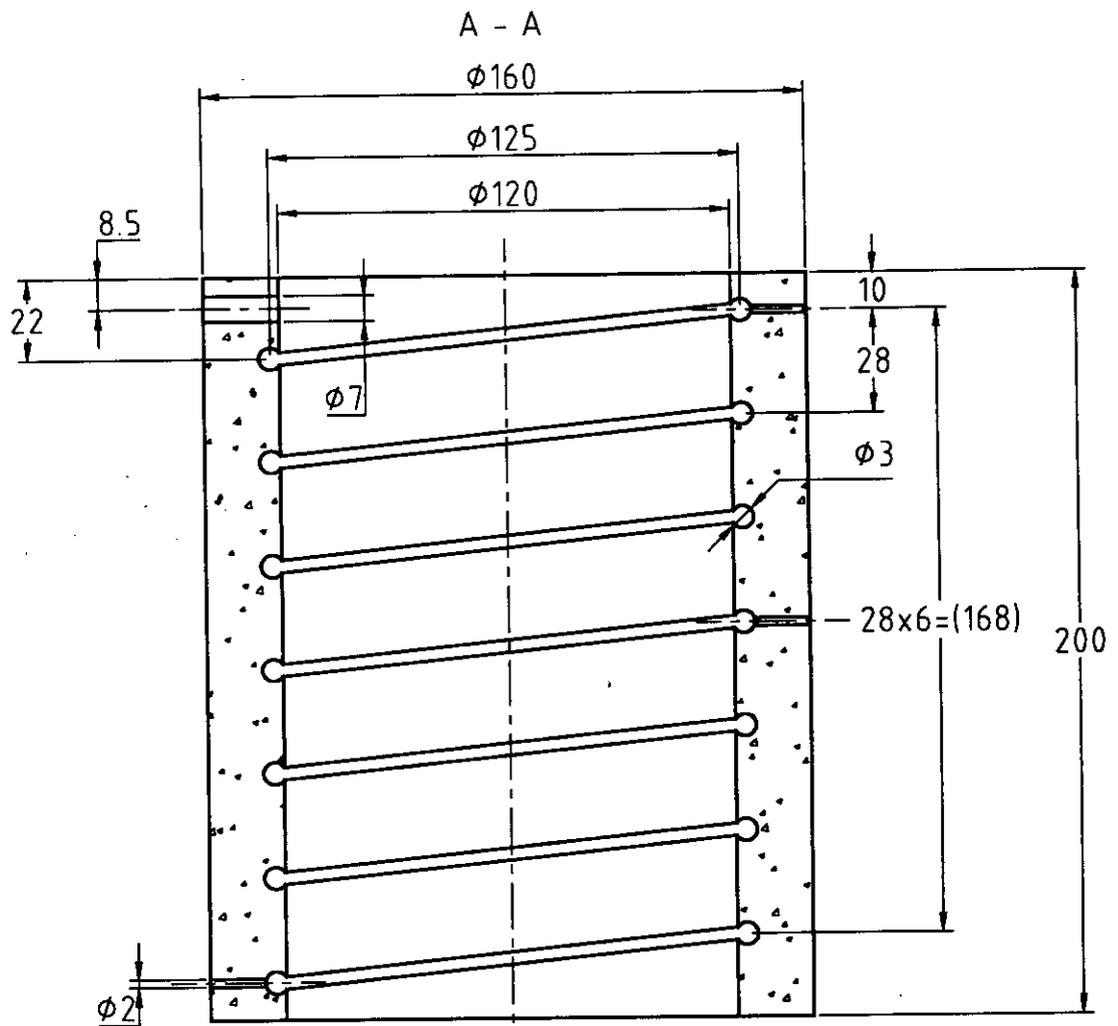
FOUR Rep. 03
Creuset



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Réfractaire Nbre = 01

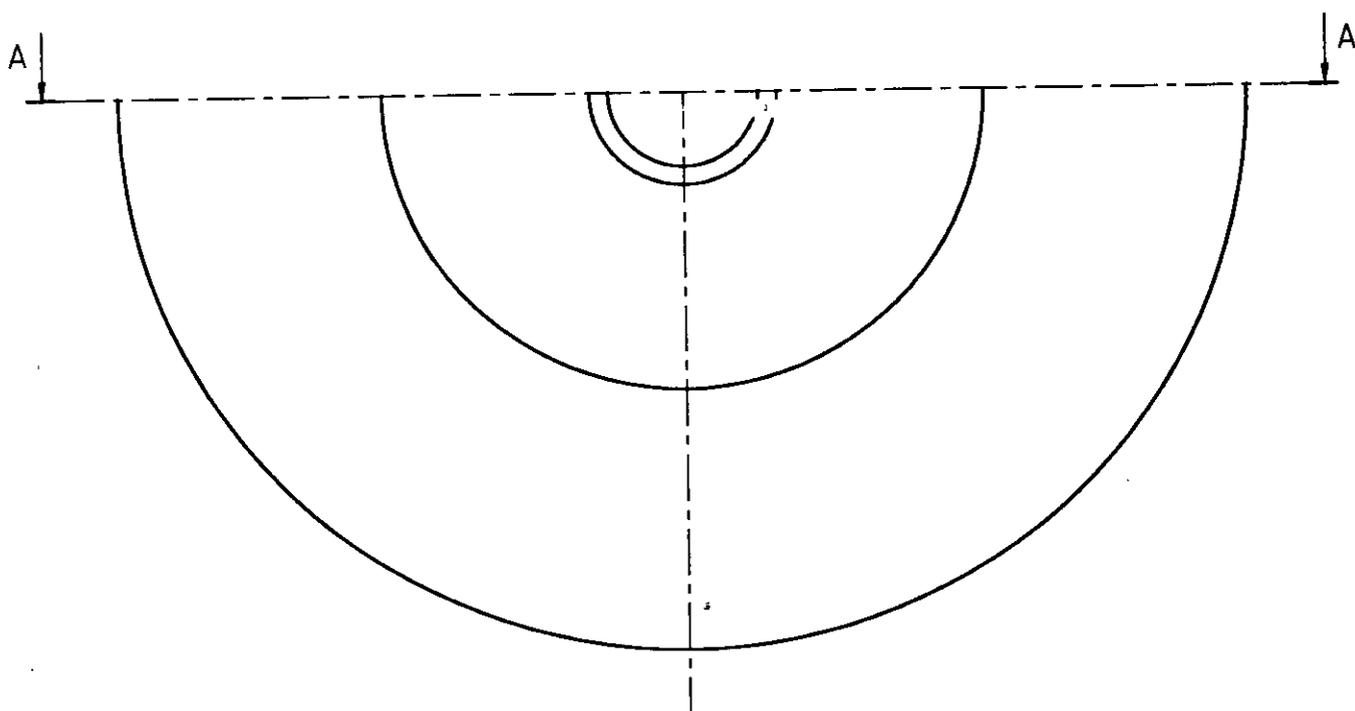
Echelle = 1:2

FOUR Rep. 05
Support de resistance

E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR

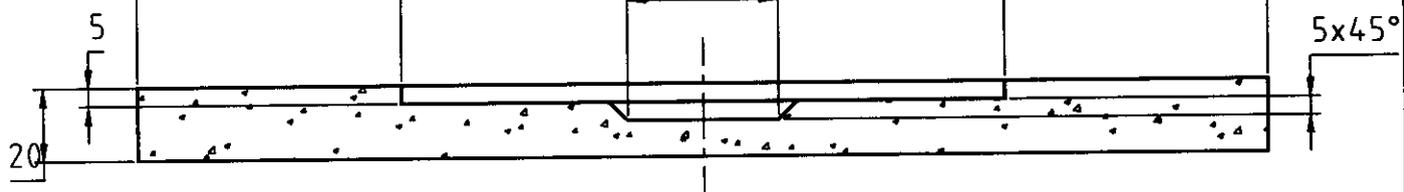


A - A

$\phi 300$

$\phi 160$

$\phi 40$



ITG = 0.1

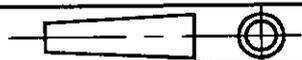
Matière : Réfractaire

Nbre = 01

Echelle = 1:2

FOUR Rep. 08

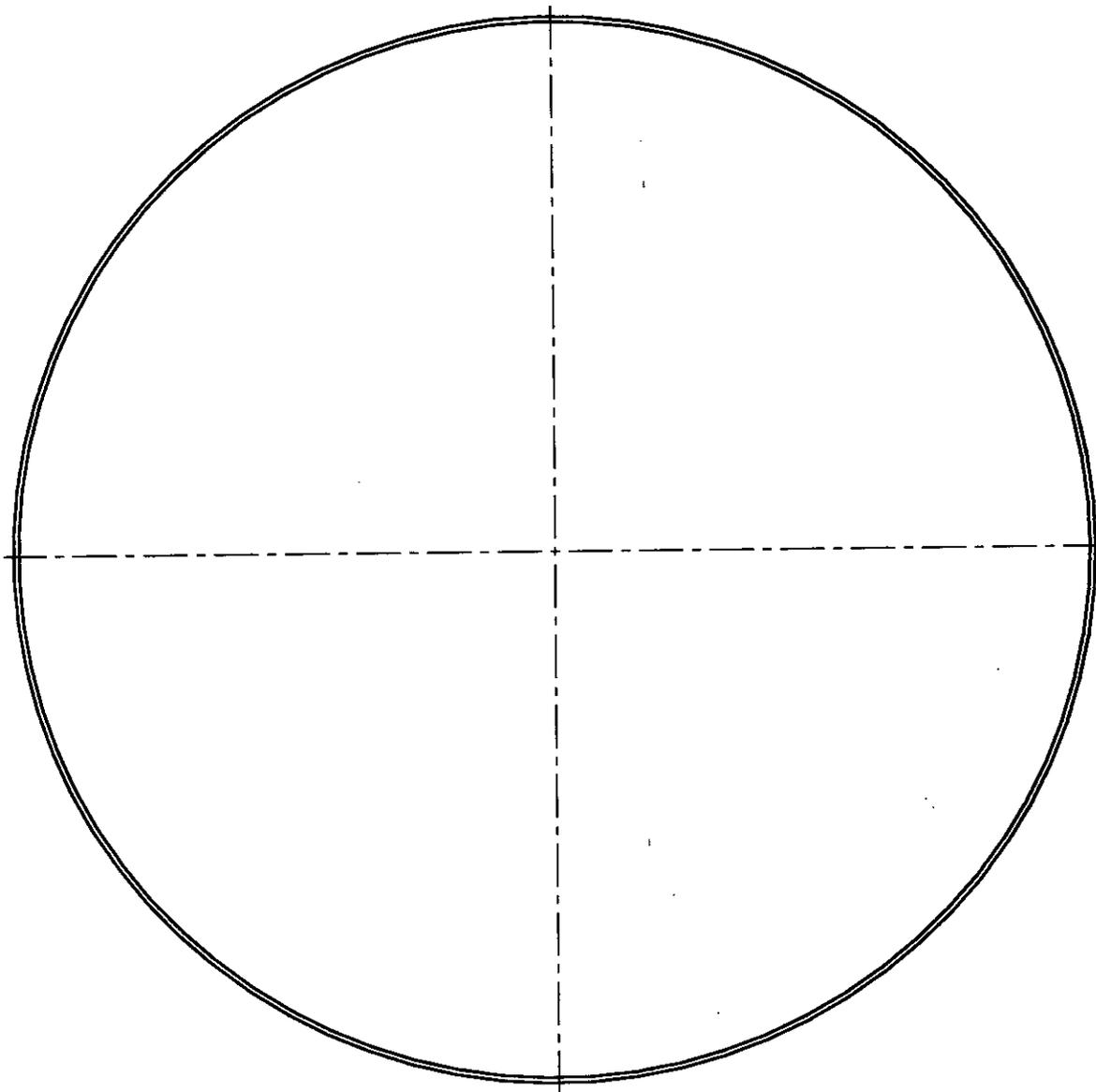
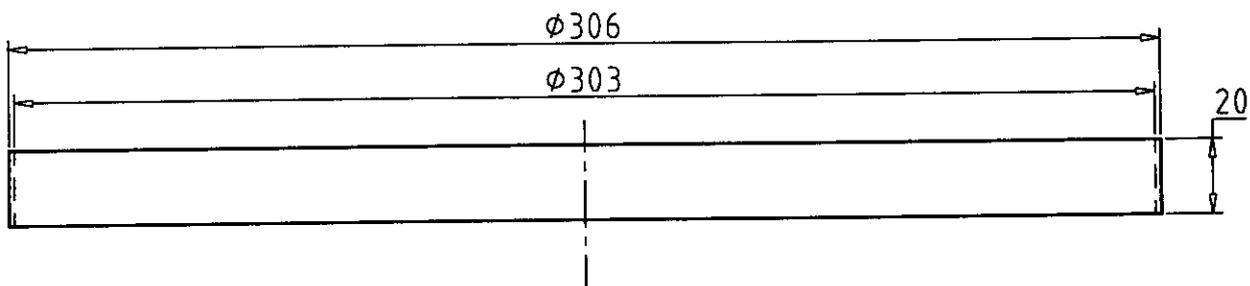
Semelle



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

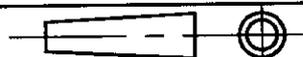
ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A 33 Nbre = 01

Echelle=1:2

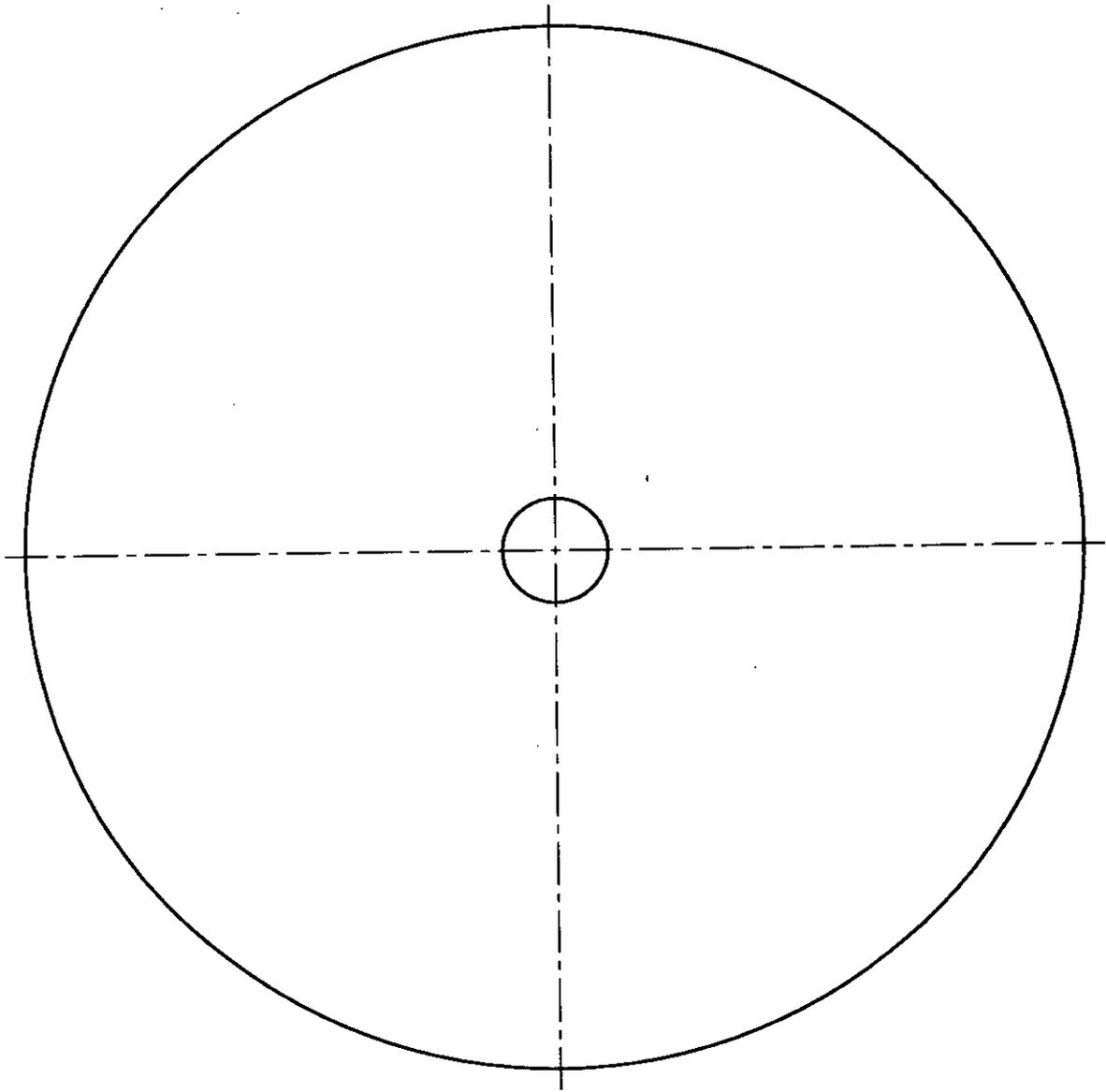
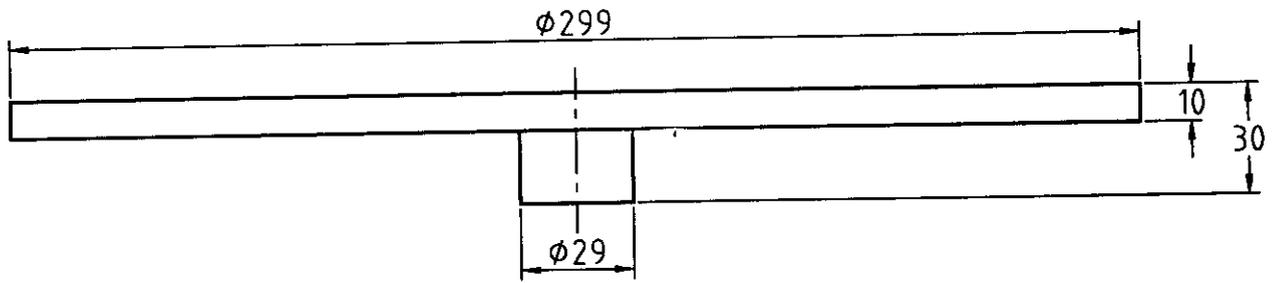
FOUR Rep. 09
Cerceau



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Réfractaire Nbre = 01

Echelle=1:2

FOUR Rep. 10
Sol

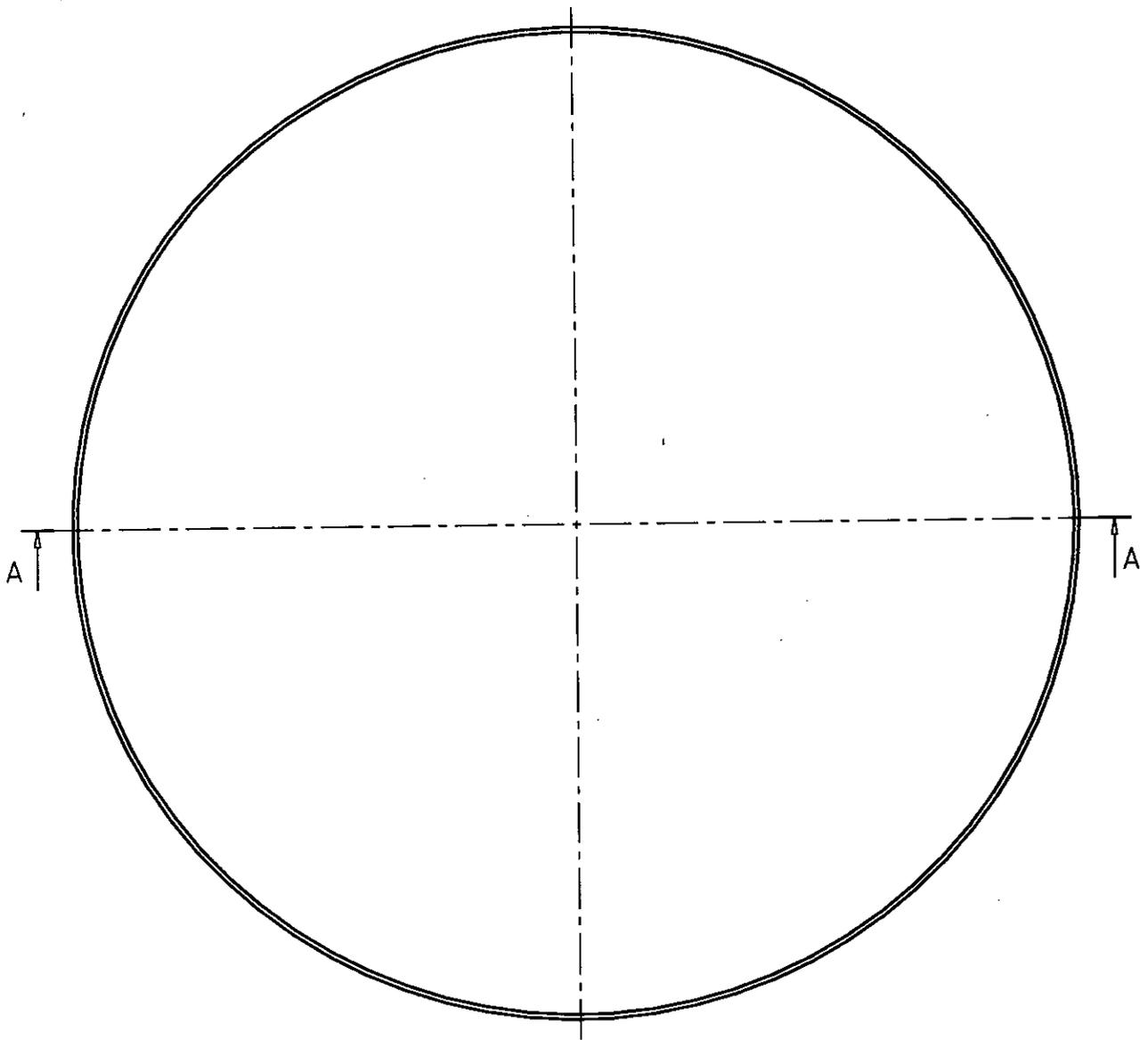
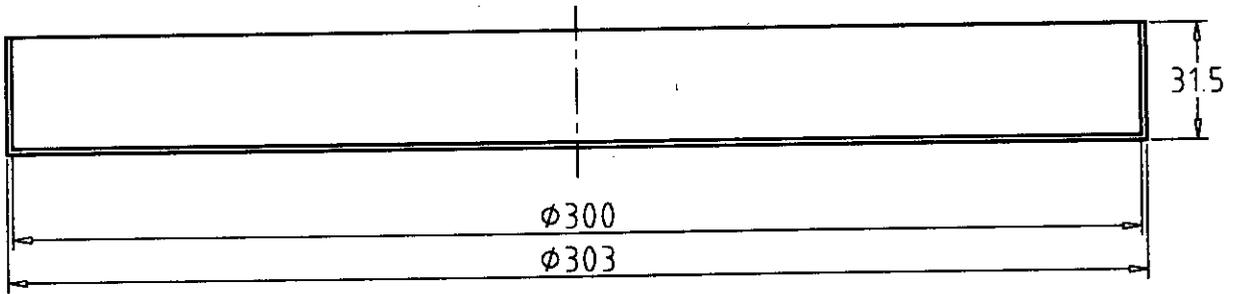


E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

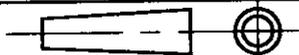
ATOMISEUR

A-A



ITG = 0.1 Matière : A 33 Nbre = 01

Echelle=1:2

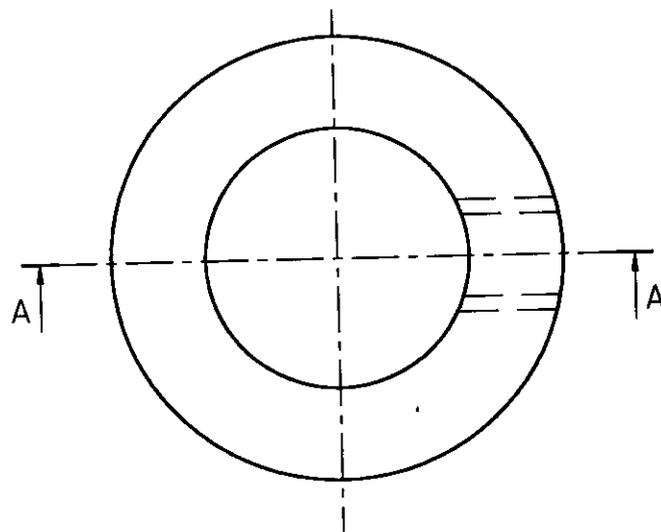
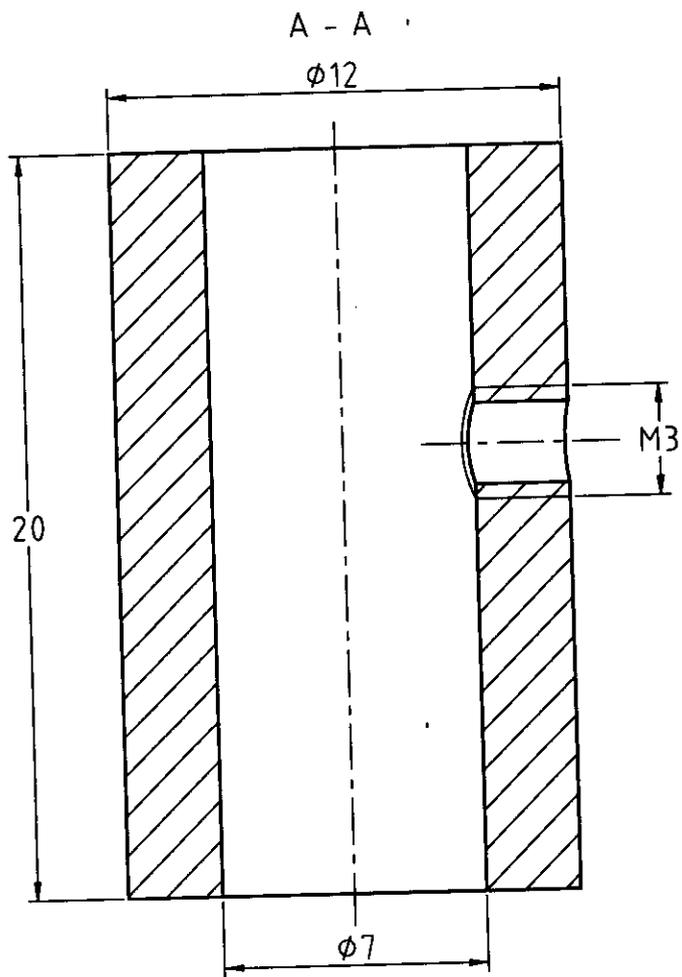


FOUR Rep. 11
Support du sol

E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

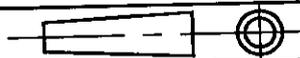
ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A 33 Nbre = 01

Echelle=5:1

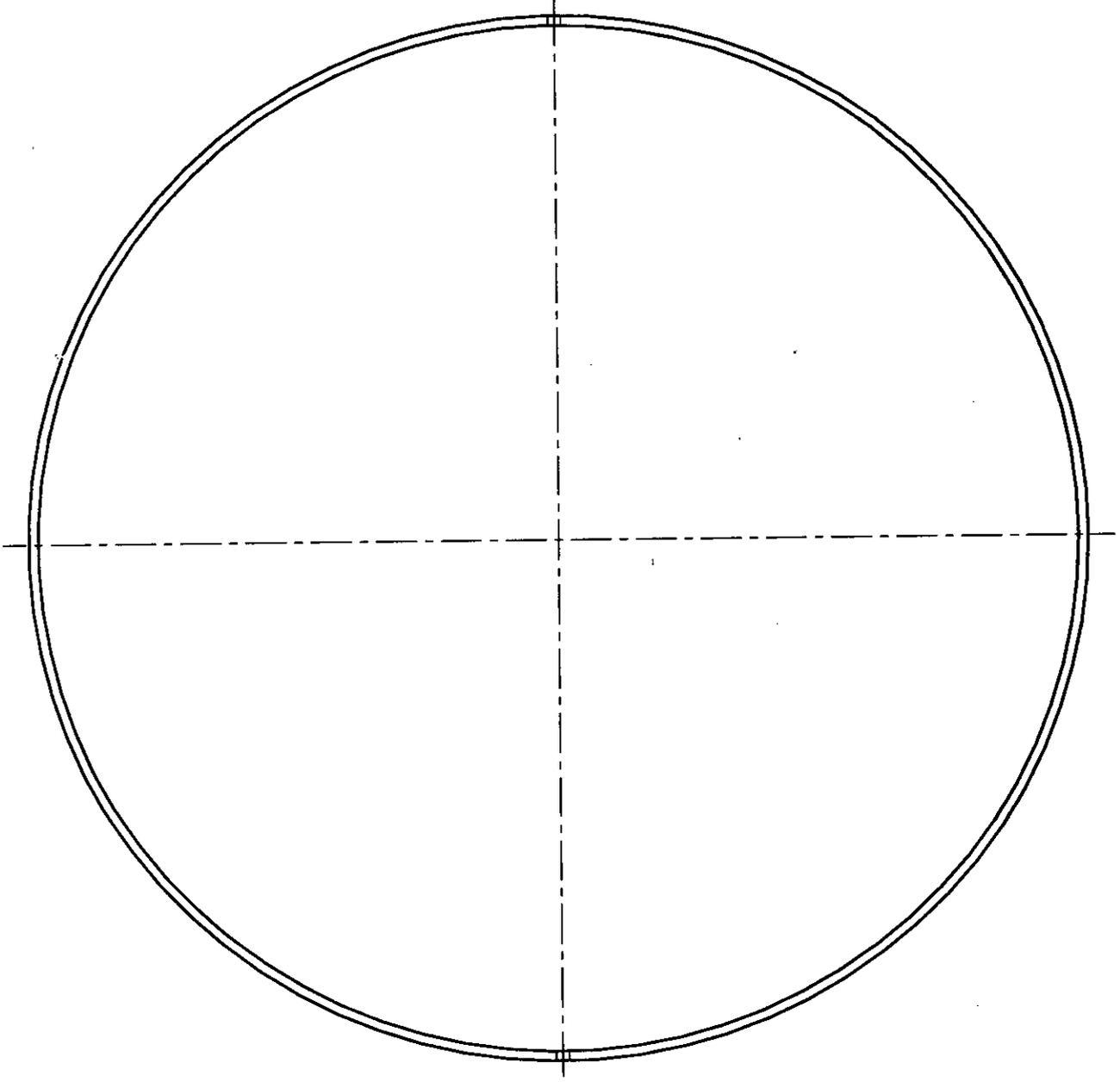
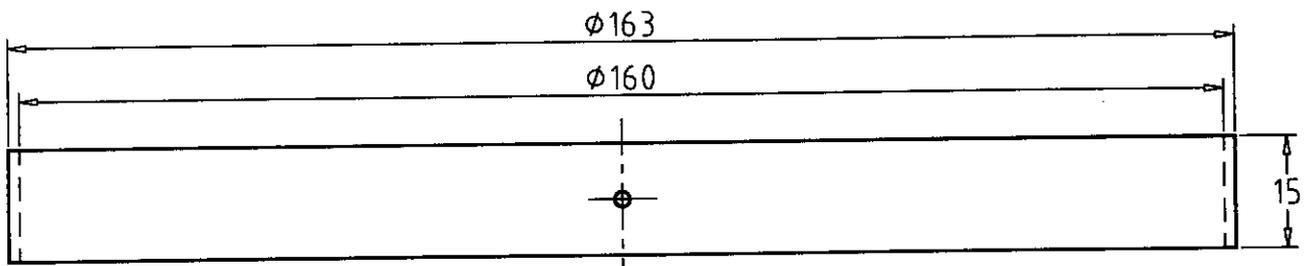
FOUR Rep. 12
Guide



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

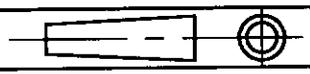
ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A 33 Nbre = 01

Echelle=1:1

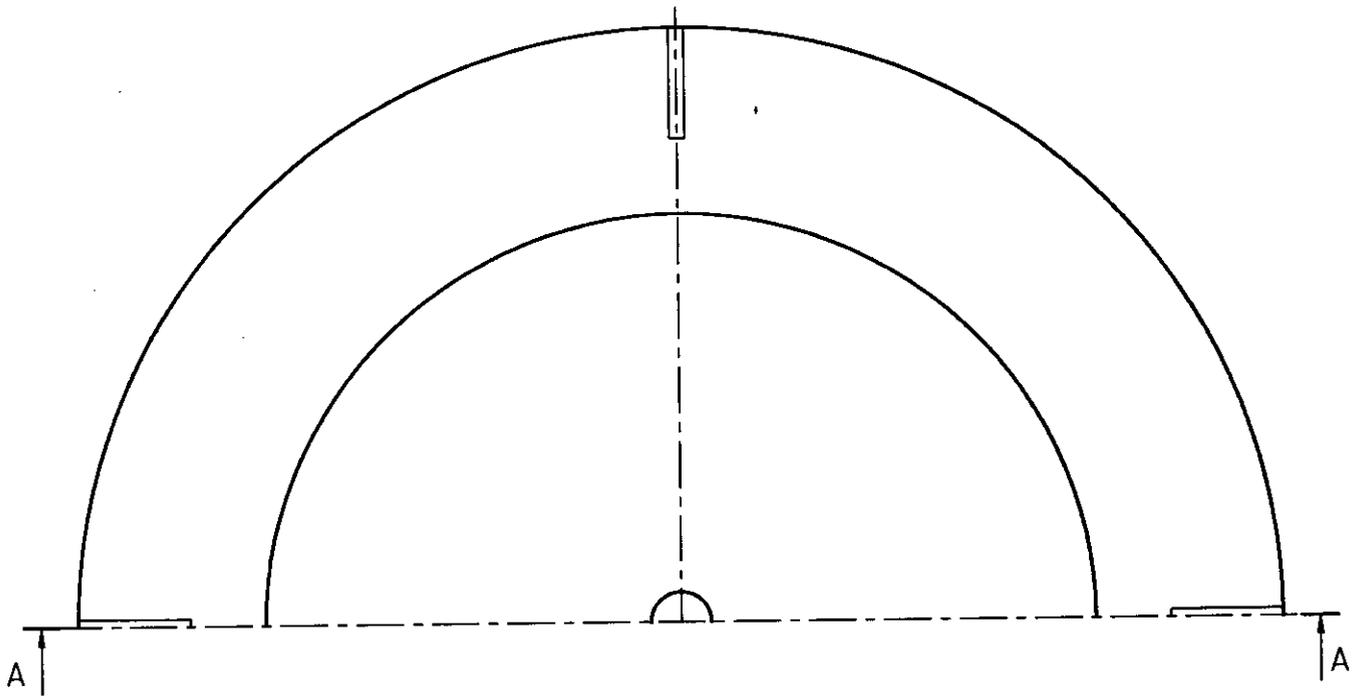
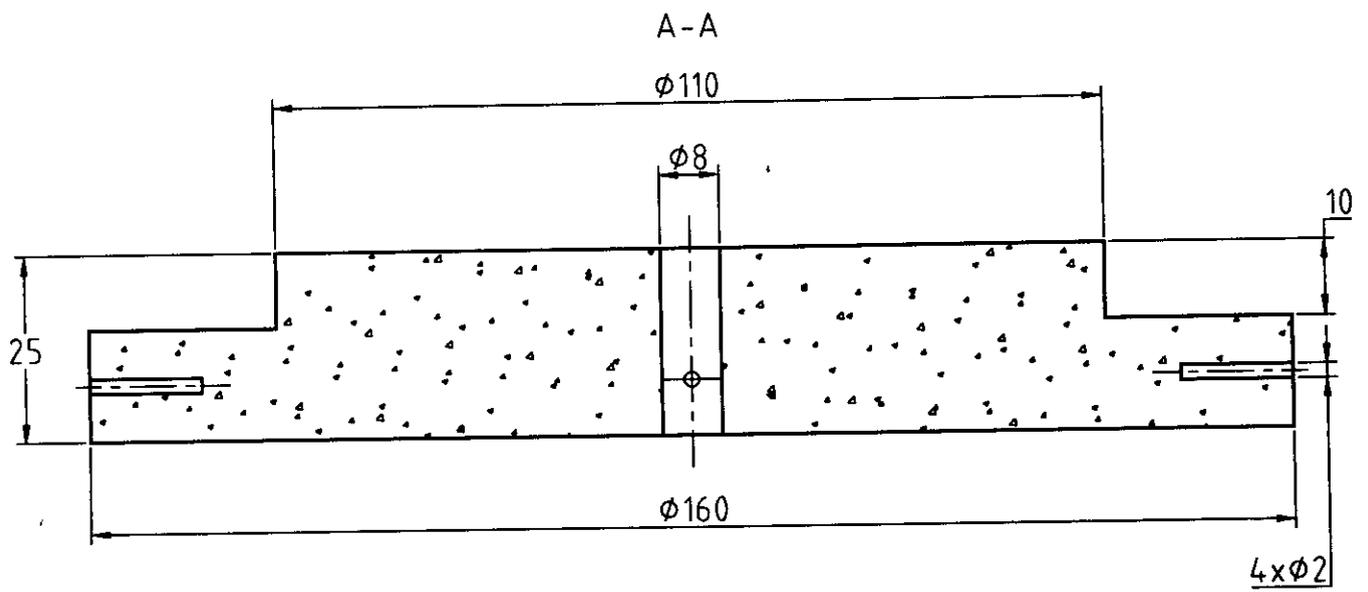
FOUR Rep. 13
Cerceau de la voûte



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

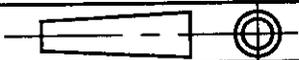
ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Réfractaire Nbre = 01

Echelle = 1:1

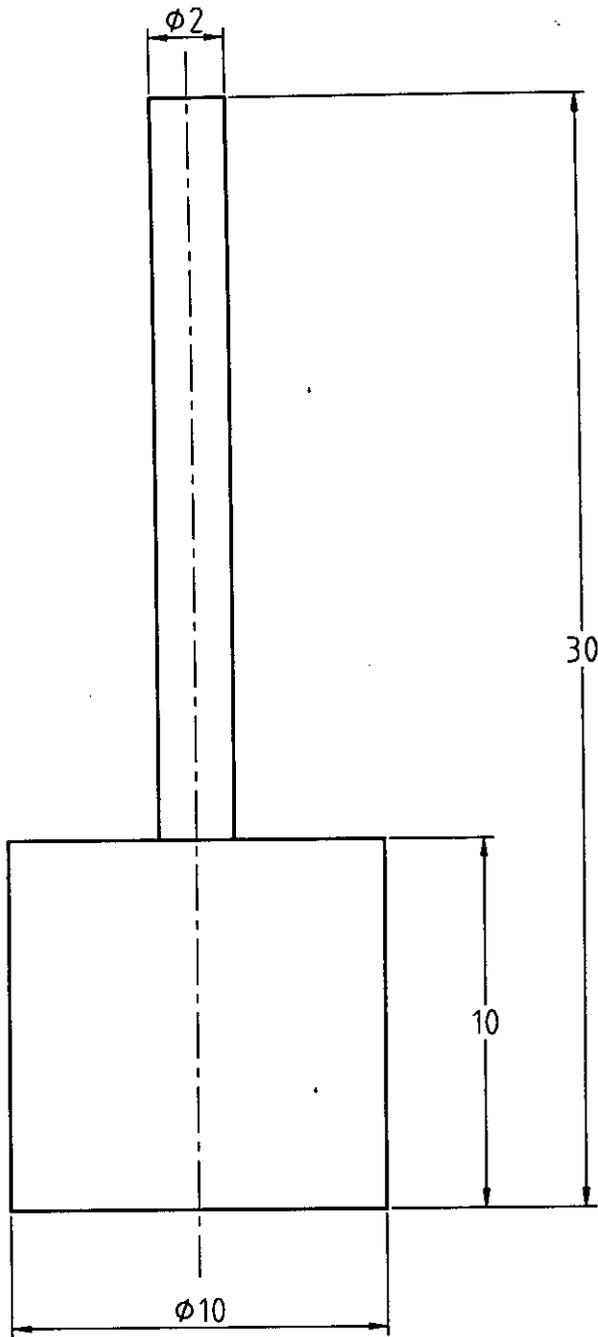
FOUR Rep. 15
voûte



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

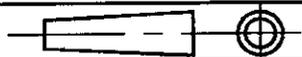
ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A 33 Nbre = 02

Echelle=5:1

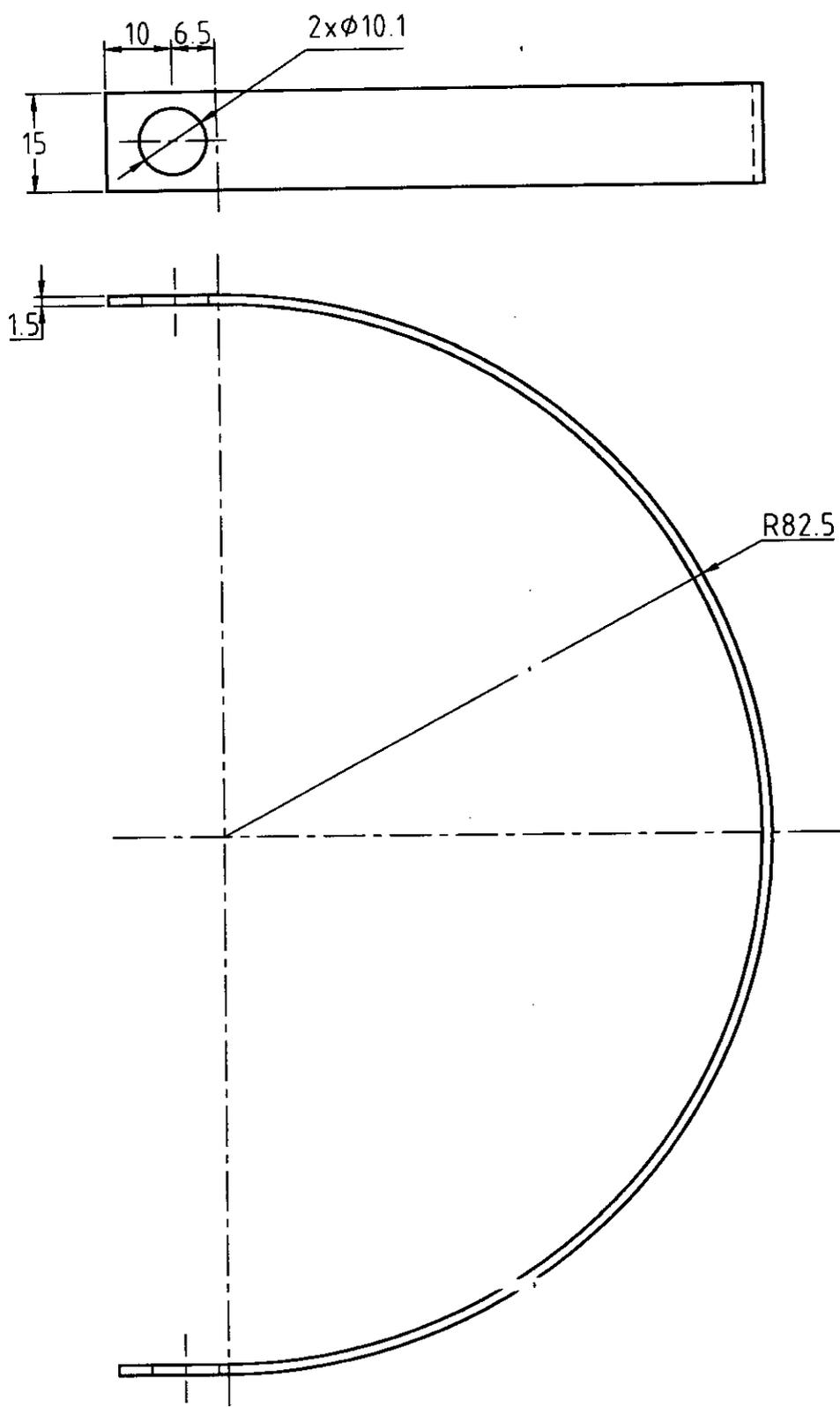
FOUR Rep. 23
Tourillon



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A 33 Nbre = 01

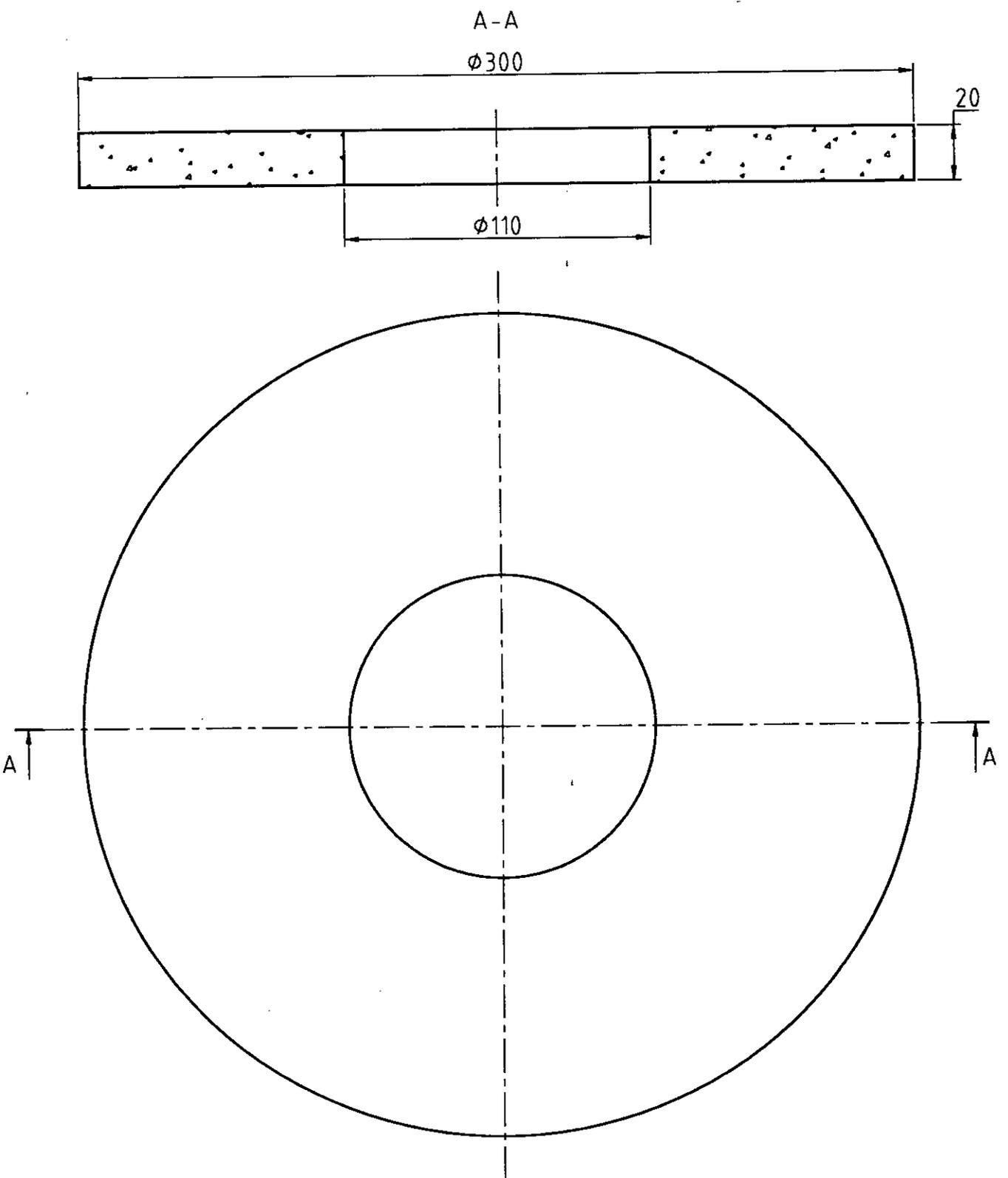
Echelle=1:1

FOUR Rep. 16
Fourche

E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

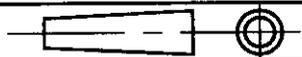
ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Réfractaire Nbre = 01

Echelle=1:2

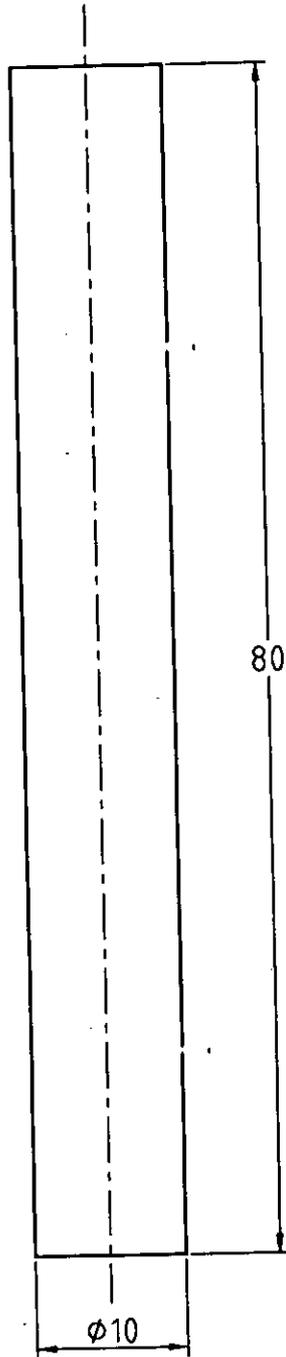
FOUR Rep. 17
 Couvercle du four



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
 Abdelmalek

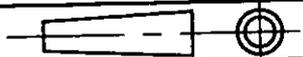
ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A 33 Nbre = 01

Echelle=2:1

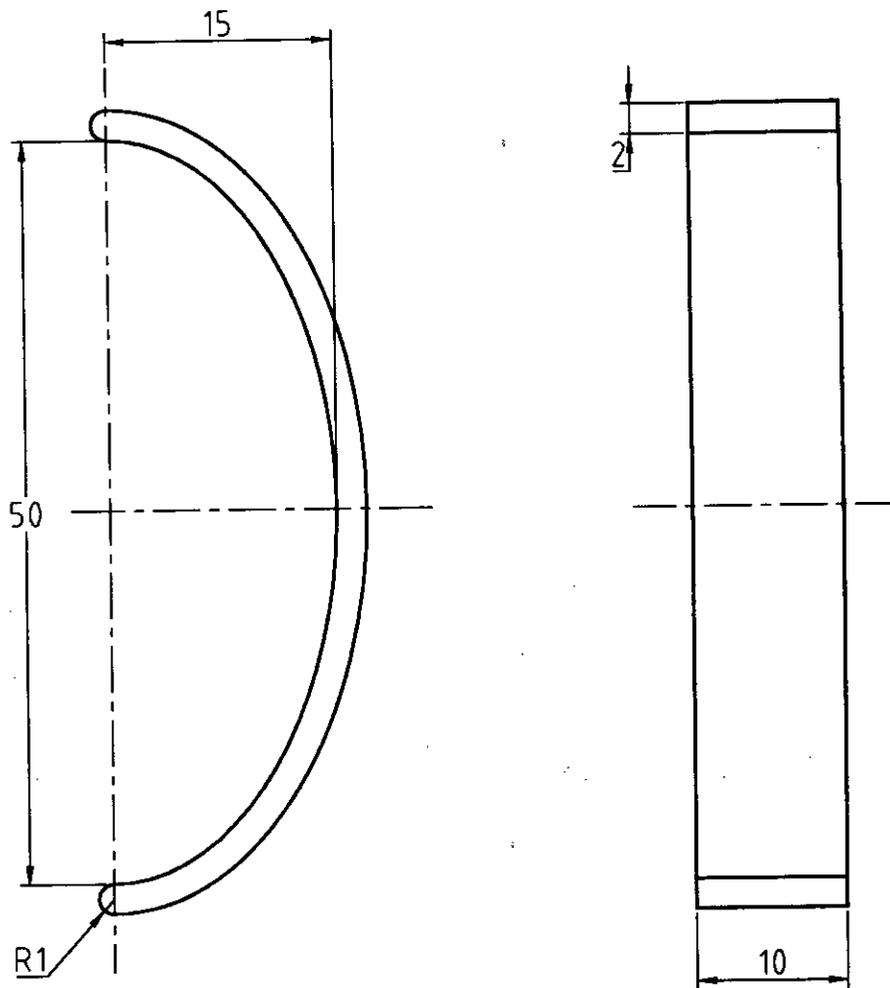
FOUR Rep. 18
Levier



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

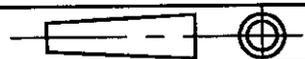
ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : A 33 Nbre = 01

Echelle=2:1

FOUR Rep. 19
Poignée



E.N.P EL-HARRACHE (ALGER)

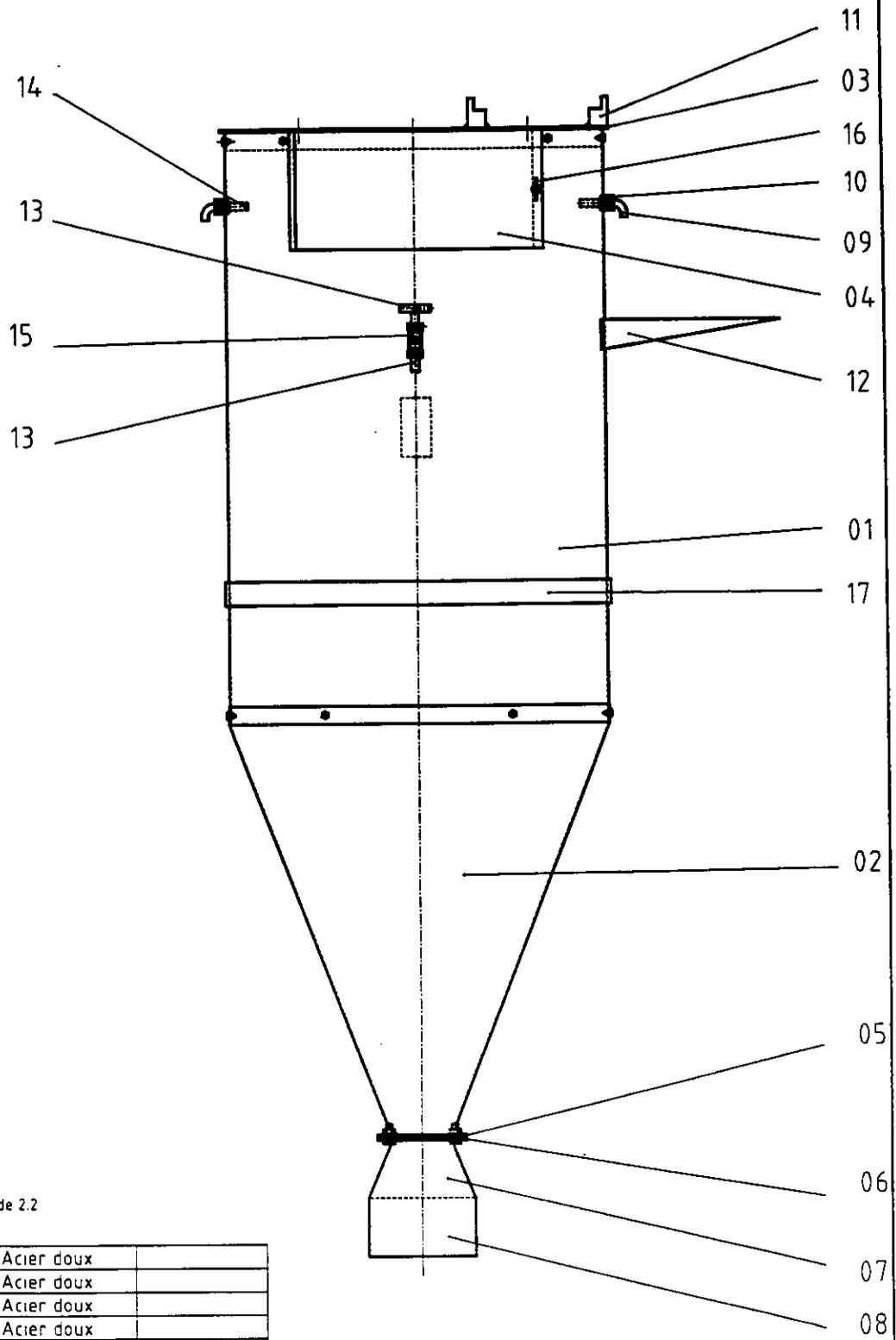
BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR

ANNEXE I

Sous-ensembles de l'Atomiseur

IV- Chambre d'atomisation



Réduction de 2.2

17	01	Ceinture	Acier doux	
16	01	Fourche	Acier doux	
15	01	Vanne	Acier doux	
14	08	Mamellon	Acier doux	
13	01	Mamellon	Acier doux	
12	01	Support	Toile noire	
11	04	Calle	Toile noire	
10	02	Raccord	Acier doux	
09	02	Coude	Cuivre	
08	01	Partie cylindrique (inf)	Toile noire	
07	01	Partie conique (sup)	Toile noire	
06	01	Culor	Toile 3mm	
05	01	Couler	Toile 3mm	
04	01	Fenêtre d'accès	Toile noire	
03	01	Soufflet	Toile noire	
02	01	Partie conique	Toile noire	
01	01	Partie cylindrique	Toile noire	
Rep	nb	Désignation	Matière	Observation

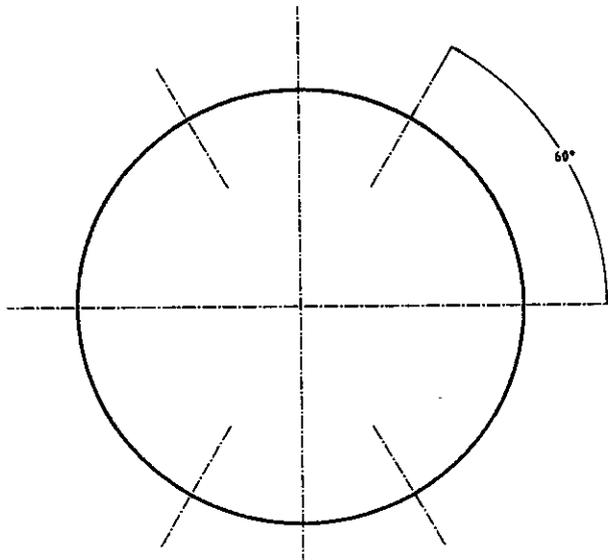
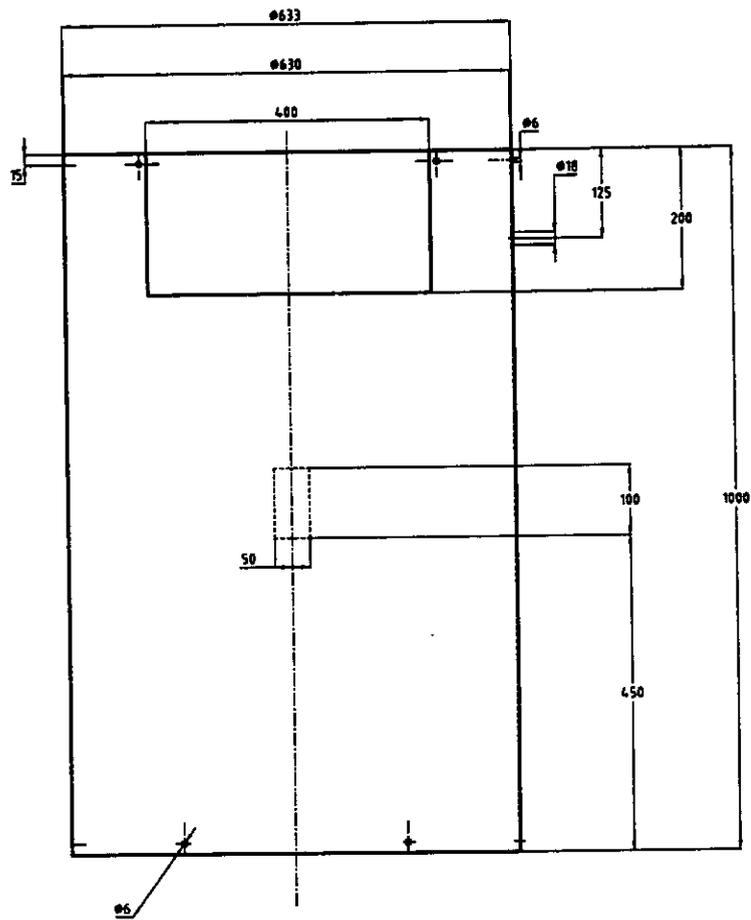
Echelle = 1/5

CHAMBRE D'ATOMISATION

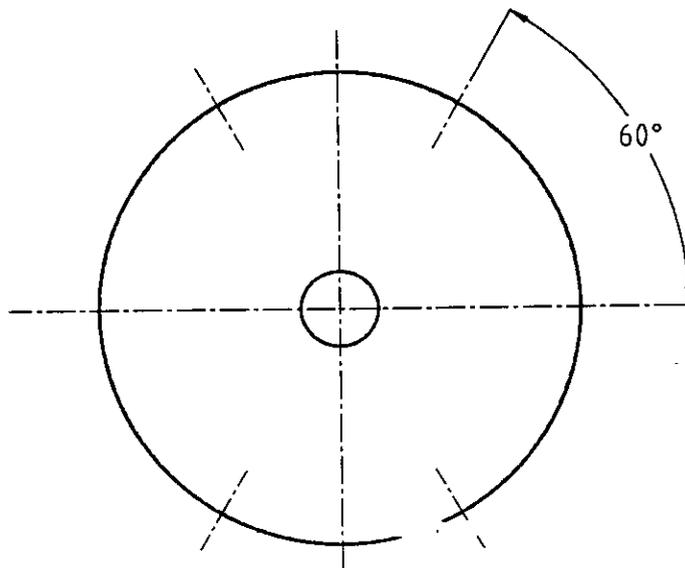
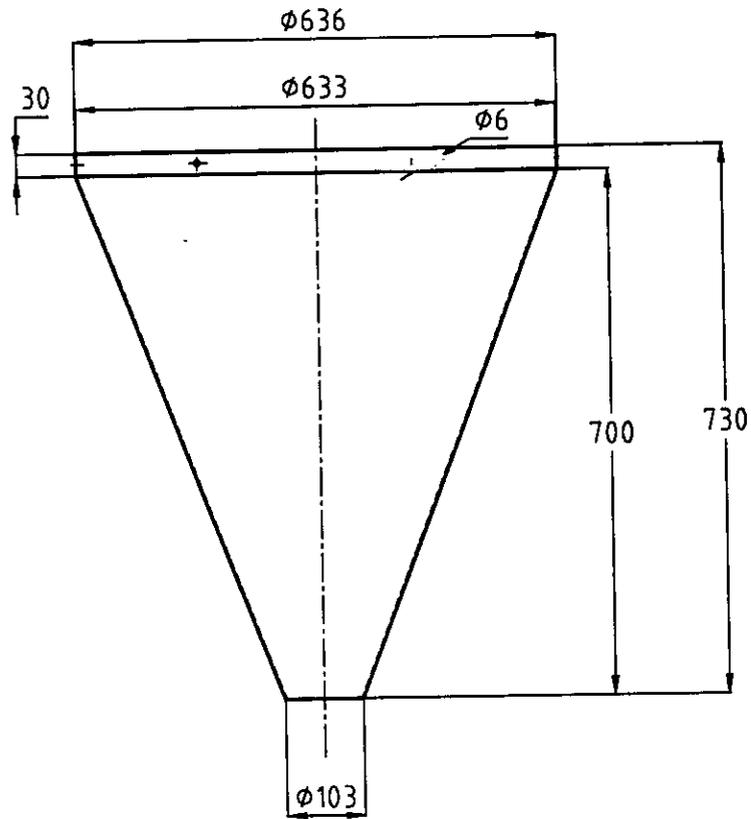
E.N.P. EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Aouelmalek

ATOMISEUR



Echelle=1:5	CHAMBRE D'ATOMISATION Rep. 01	
	PARTIE CYLINDRIQUE DE LA CHAMBRE D'ATOMISATION	
E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)		
BRITAH Abdelmalek	ATOMISEUR	



ITG = 0.1 Matière : Tole noire Nbre = 01

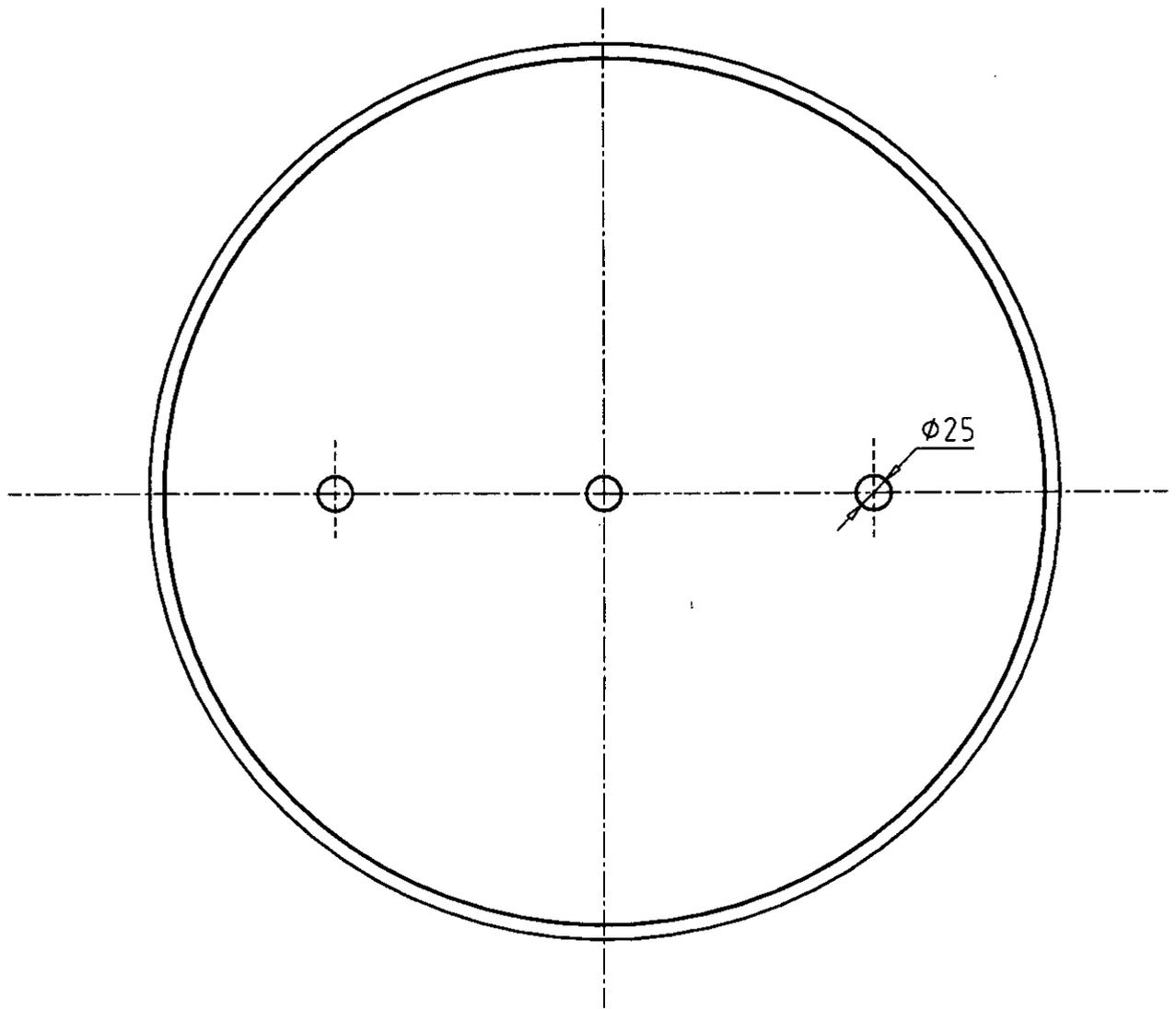
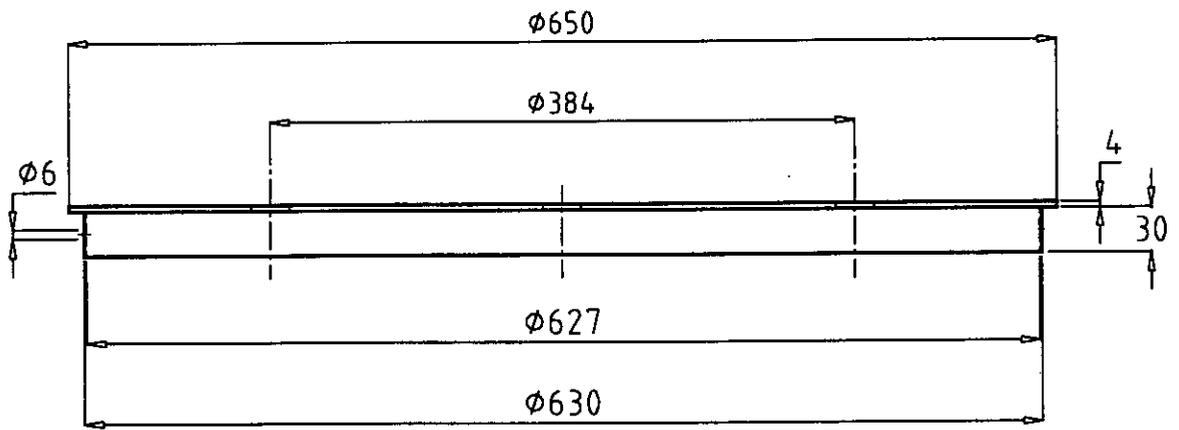
Echelle = 1:10

CHAMBRE D'ATOMISATION Rep. 02
PARTIE CONIQUE DE LA CHAMBRE D'ATOMISATION

E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Tole noire Nbre = 01

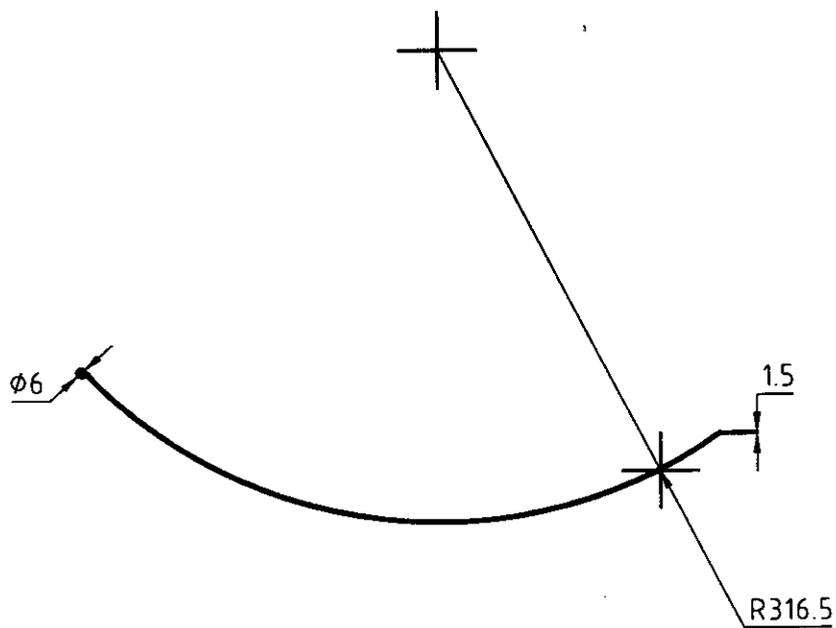
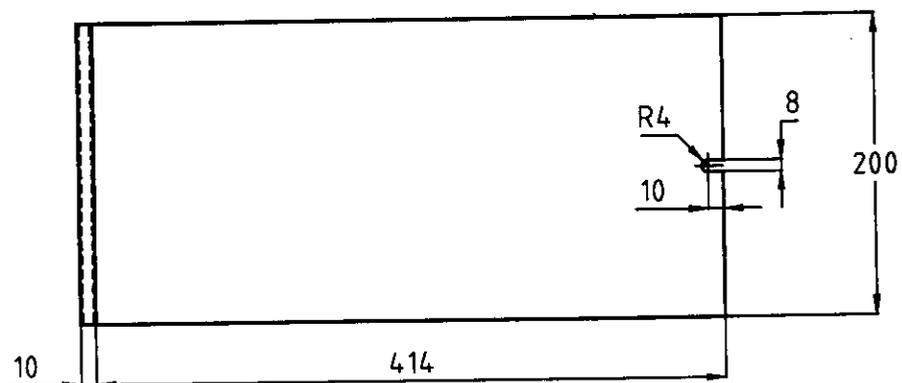
Echelle = 1:5

CHAMBRE D'ATOMISATION Rep. 03
 COUVERT DE LA CHAMBRE D'ATOMISATION

E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
 Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Tole noire Nbre = 01

Echelle = 1:5

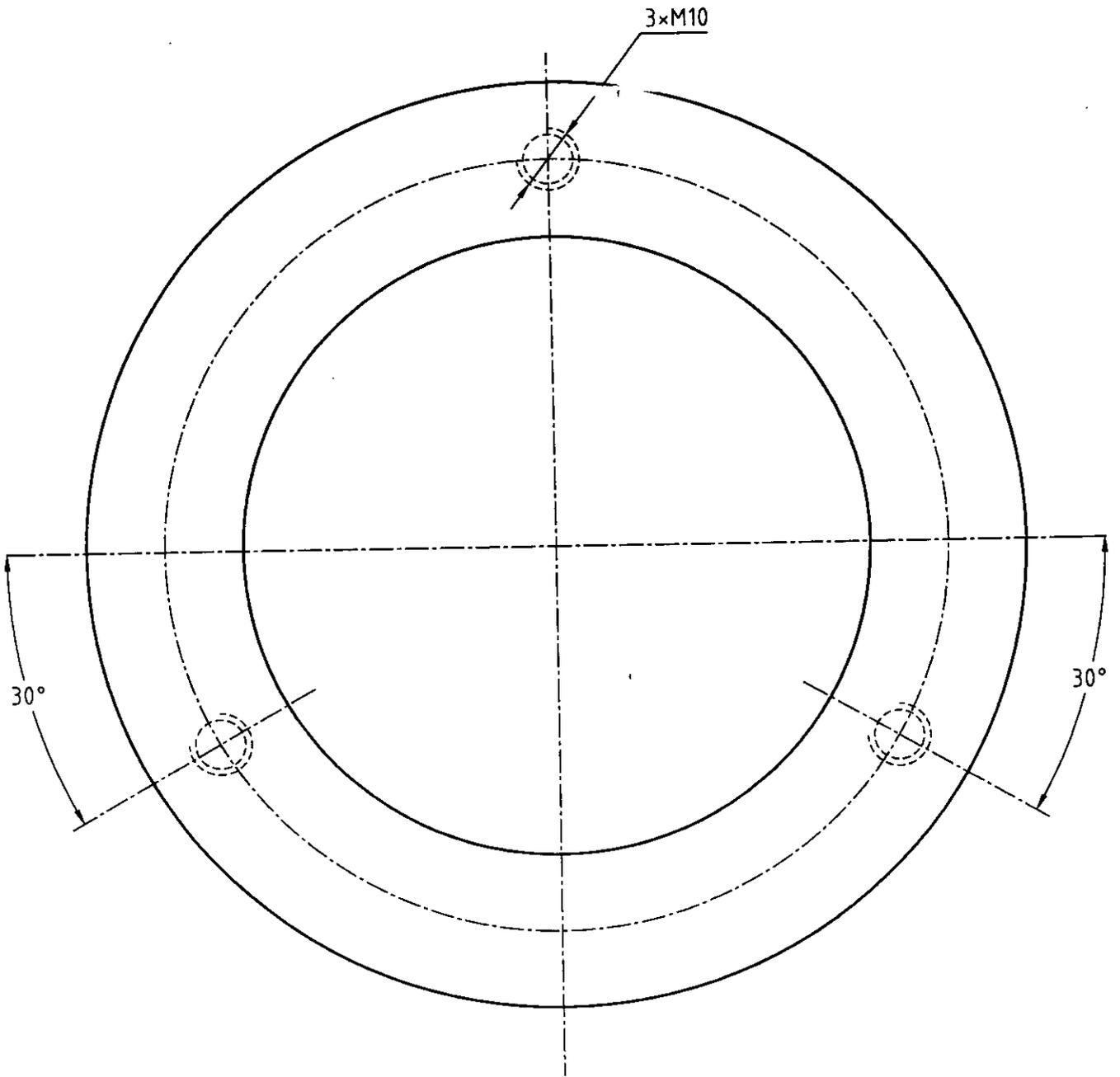
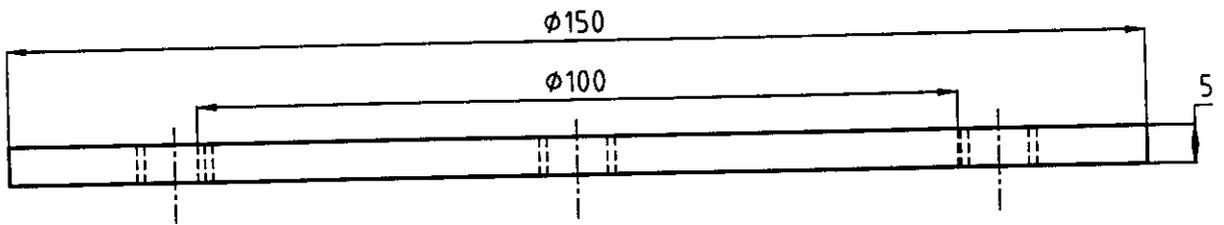
CHAMBRE D'ATOMISATION Rep. 04

FENETRE D'ACCES A LA CHAMBRE D'ATOMISATION

E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Tole 3mm Nbre = 01

Echelle = 1:1

CHAMBRE D'ATOMISATION Rep. 05
COLLIER DE LA CHAMBRE D'ATOMISATION

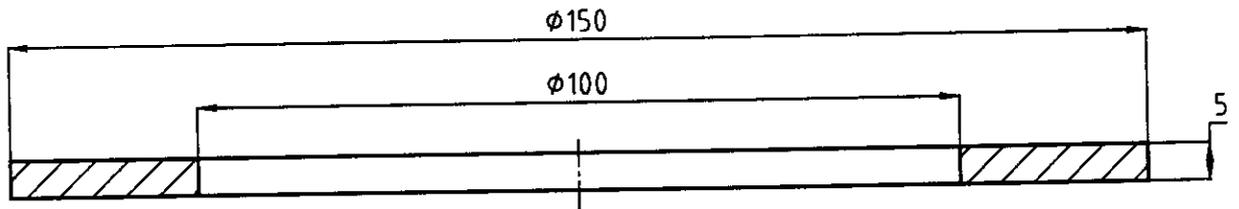


E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR

A-A



$\phi 125$

23.83°

30°

A

A

R8

R5

ITG = 0.1 Matière : Tole 3mm Nbre = 01

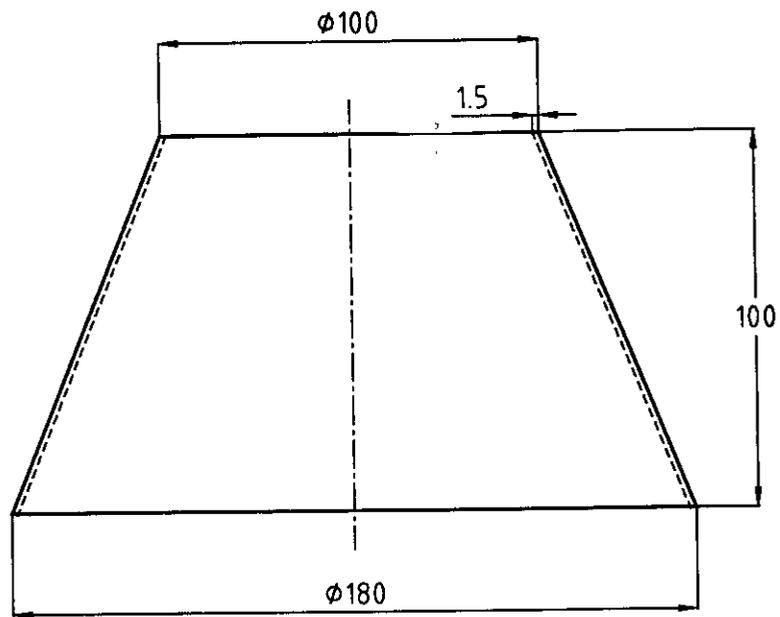
Echelle = 1:1

CHAMBRE D'ATOMISATION Rep. 06
CULOT DE LA CHAMBRE D'ATOMISATION

E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Tole noire Nbre = 01

Echelle = 1:2

CHAMBRE D'ATOMISATION Rep. 07

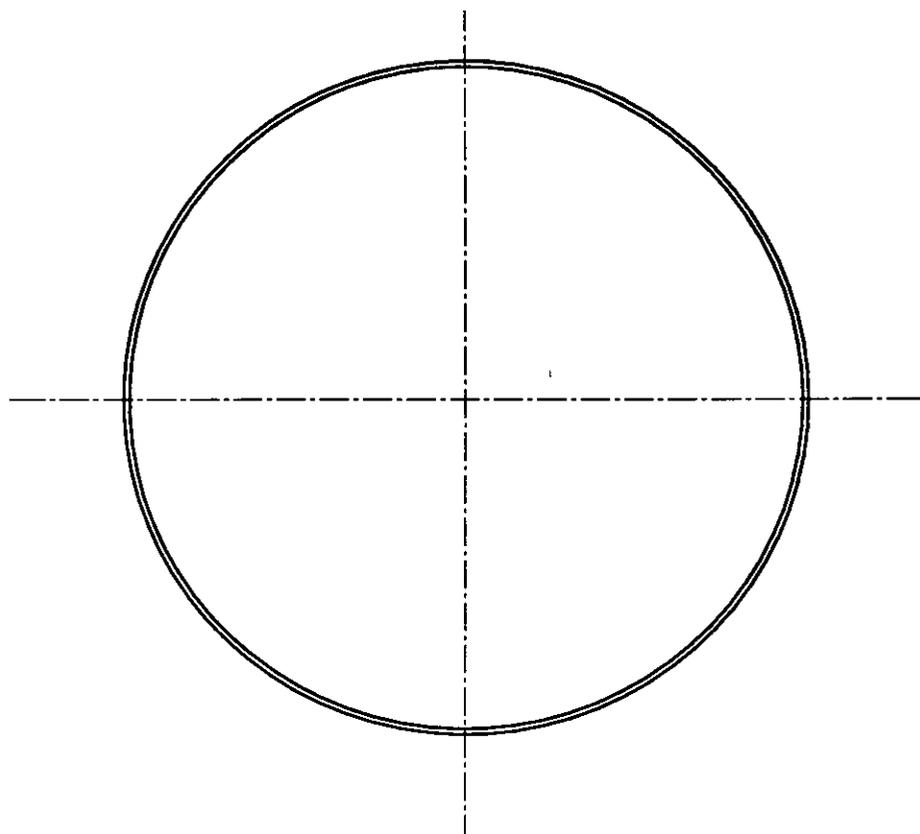
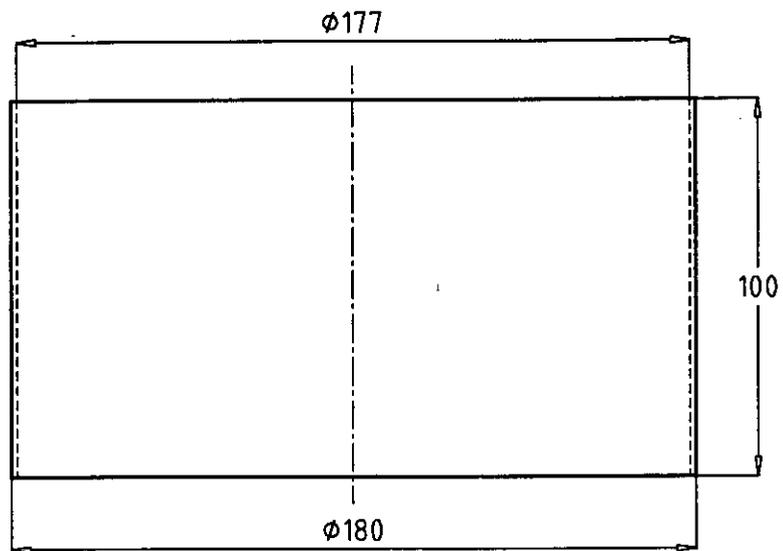


PARTIE CONIQUE (superieur) DE LA CHAMBRE D'ATOMISATION

E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR

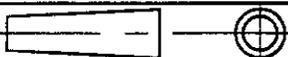


ITG = 0.1 Matière : Tole mince Nbre = 01

Echelle = 1:2

CHAMBRE D'ATOMISATION Rep. 08

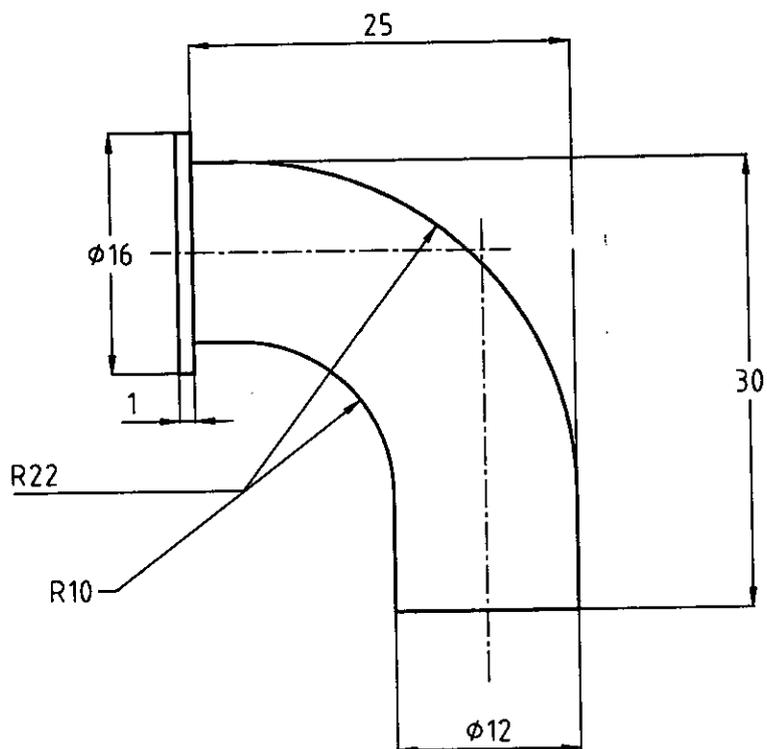
PARTIE CYLINDRIQUE (inférieur) DE LA CHAMBRE D'ATOMISATION



E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Cuivre Nbre = 01

Echelle = 2:1

CHAMBRE D'ATOMISATION Rep. 09

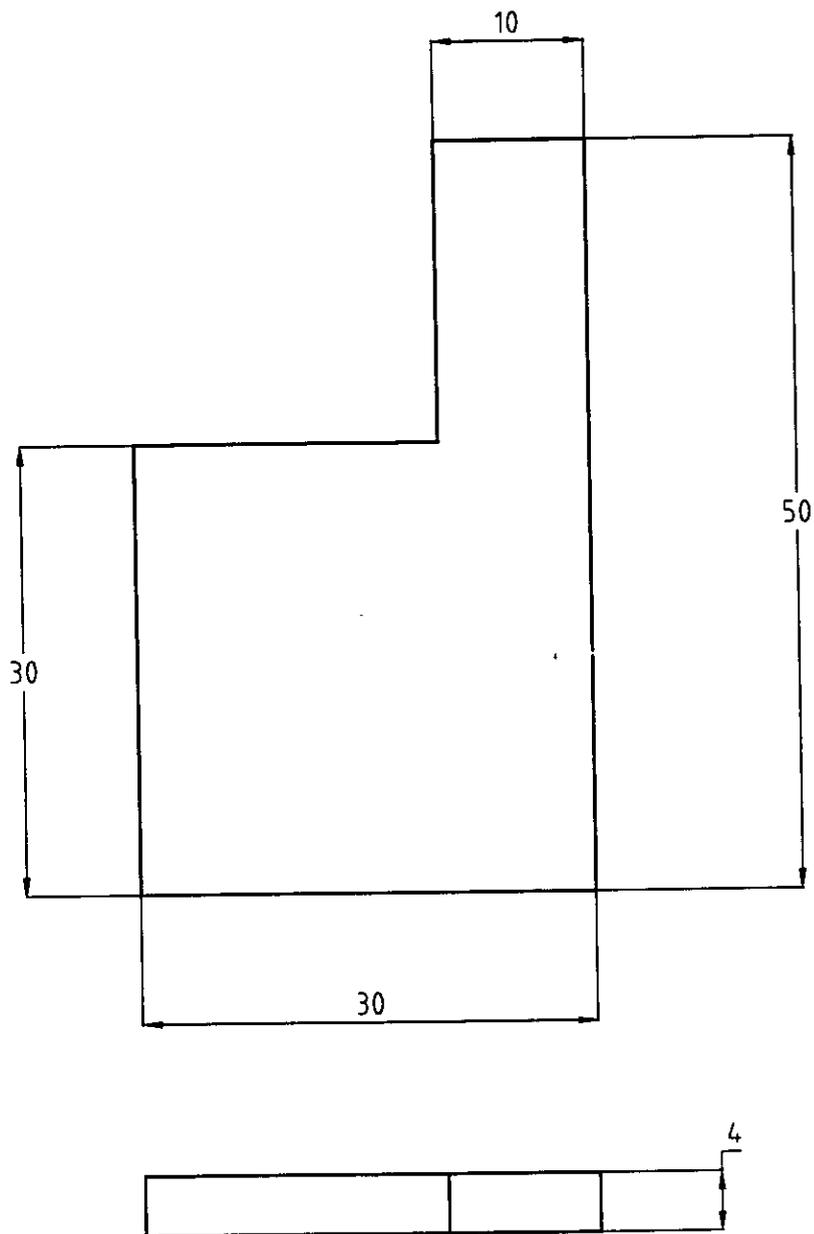
COUDE



E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Tole noire Nbre = 04

Echelle = 2:1

CHAMBRE D'ATOMISATION Rep. 11

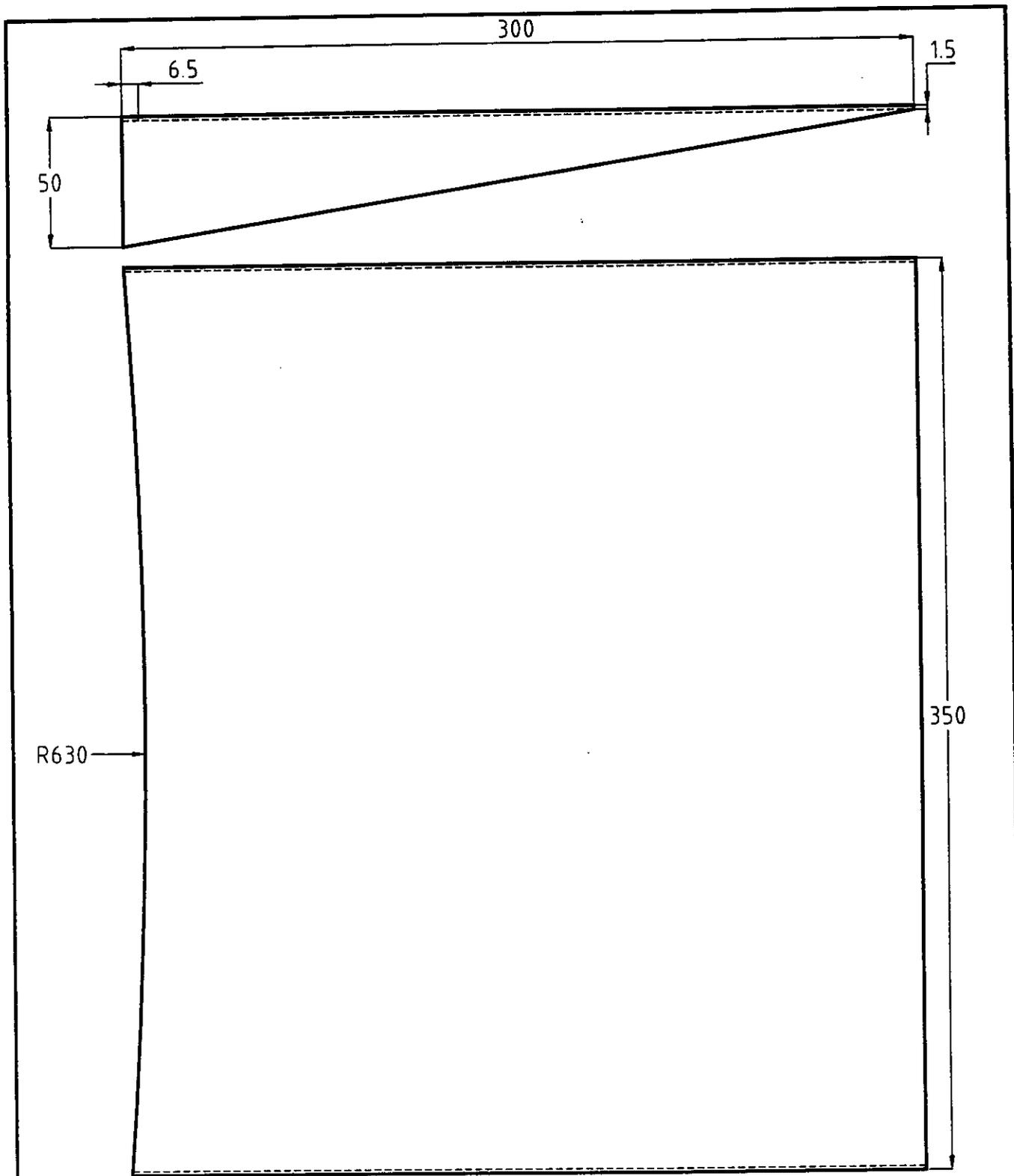
CALLE



E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Tote noire Nbre = 01

Echelle = 1:2

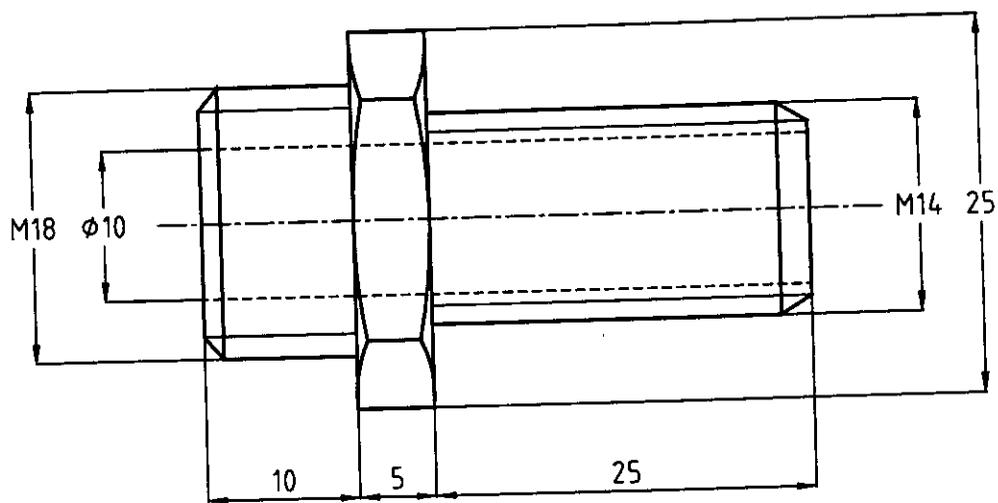
CHAMBRE D'ATOMISATION Rep. 12
Support du régulateur de la température



E.N.P El - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Acier doux Nbre = 01

Echelle = 2:1

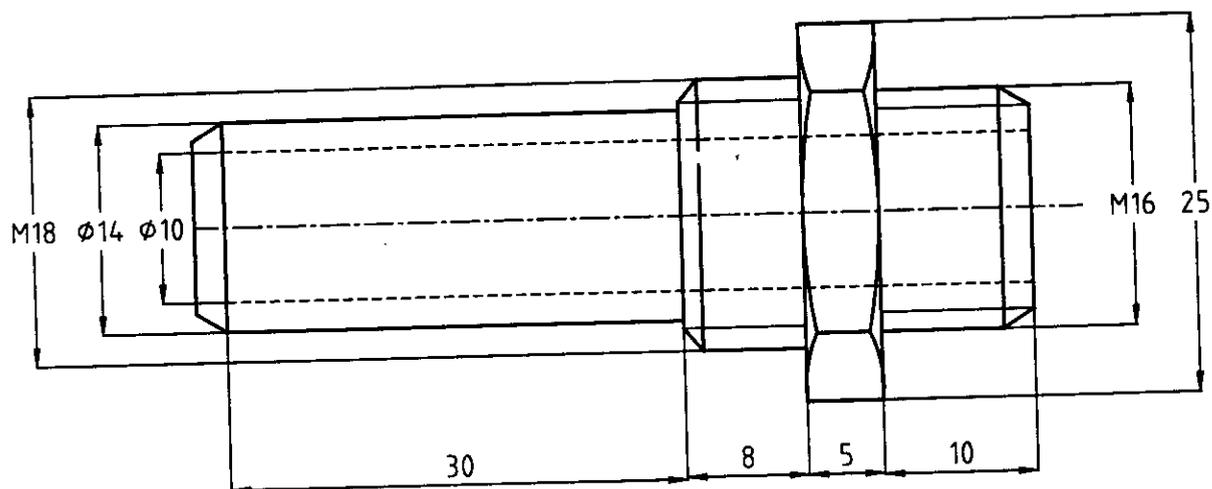
CHAMBRE D'ATOMISATION Rep. 13
MAMELLON (ENTREE ET SORTIE DE LA VANNE)



E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Acier doux Nbre = 01

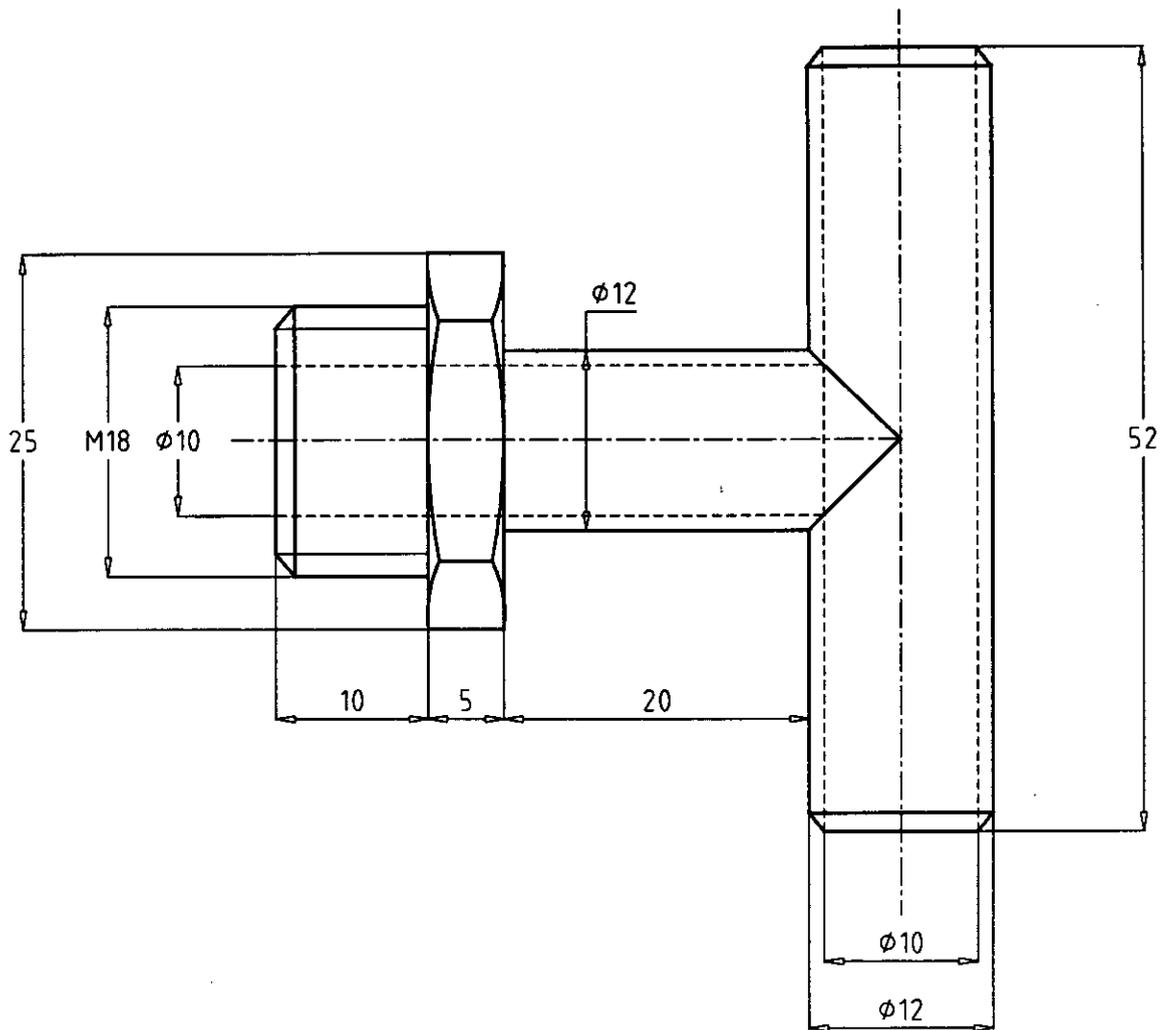
Echelle = 2:1

CHAMBRE D'ATOMISATION Rep. 14
MAMELLON (ENTREE DE LA CHAMBRE)

E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Adelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Acier doux Nbre = 01

Echelle = 2:1

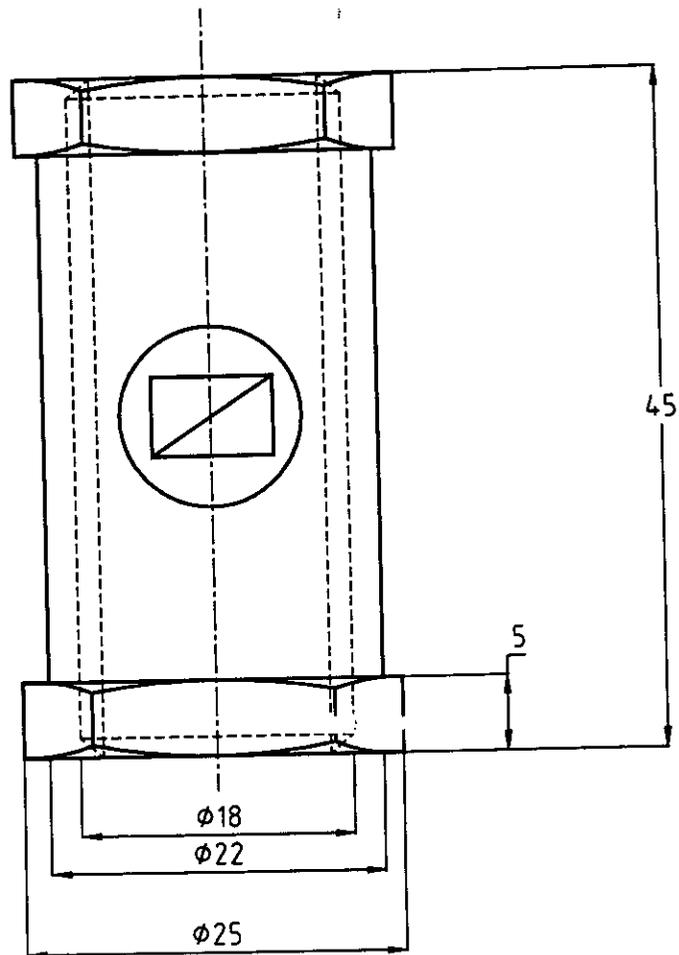
CHAMBRE D'ATOMISATION Rep. 14

Répartiteur de gaz

E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Acier doux Nbre = 01

Echelle = 2:1

CHAMBRE D'ATOMISATION Rep. 15
VANNE



E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

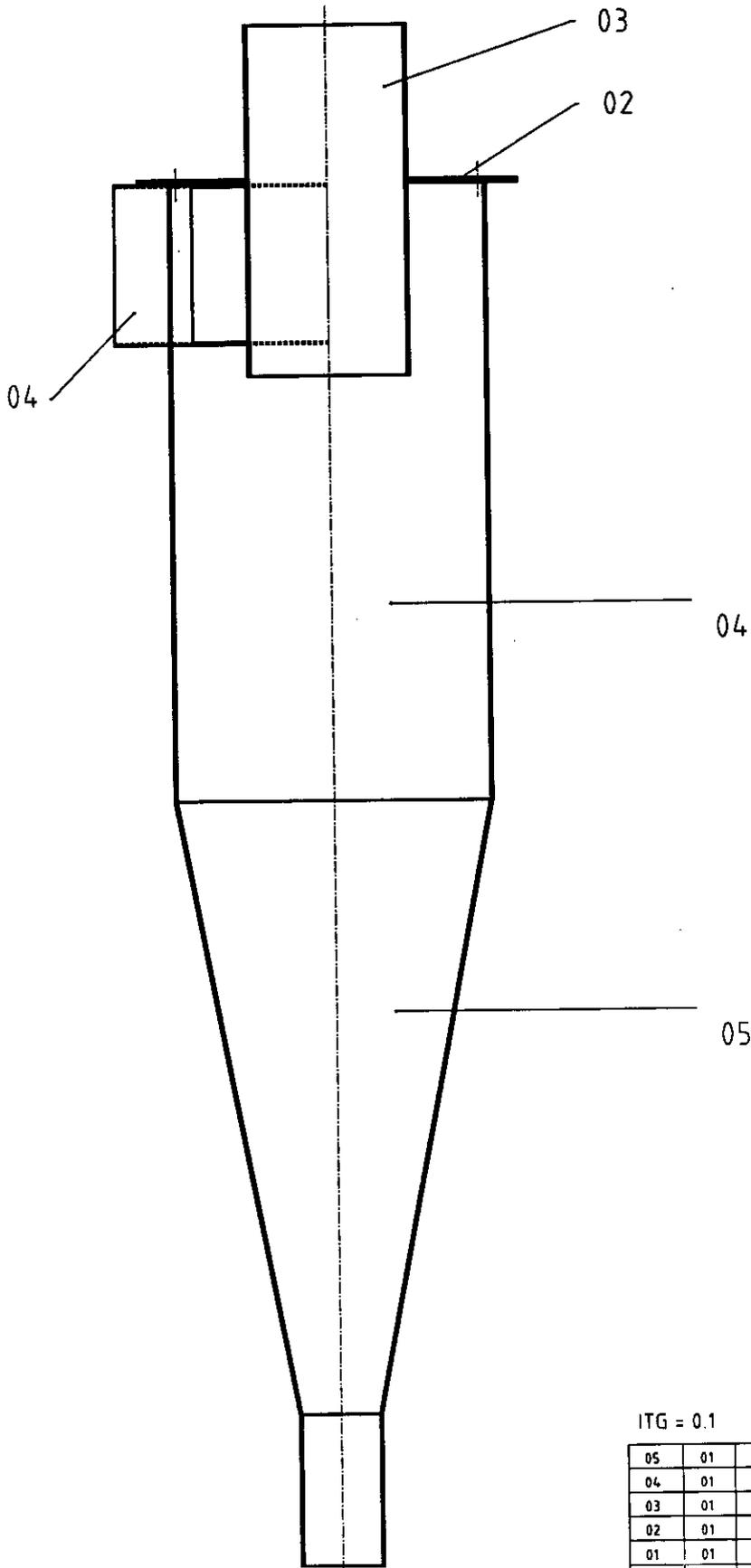
BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR

ANNEXE I

Sous-ensembles de l'Atomiseur

V- Cyclone



ITG = 0.1

05	01	Partie conique	Toile noire	
04	01	Partie cylindrique	Toile noire	
03	01	Tube d'échappement du gaz	Toile noire	
02	01	Chapeau d'échappement du gaz	Toile noire	
01	01	Conduite d'entrée du gaz	Toile noire	
Rep.	Nb.	Désignation	Matière	Observation

Echelle=1:2

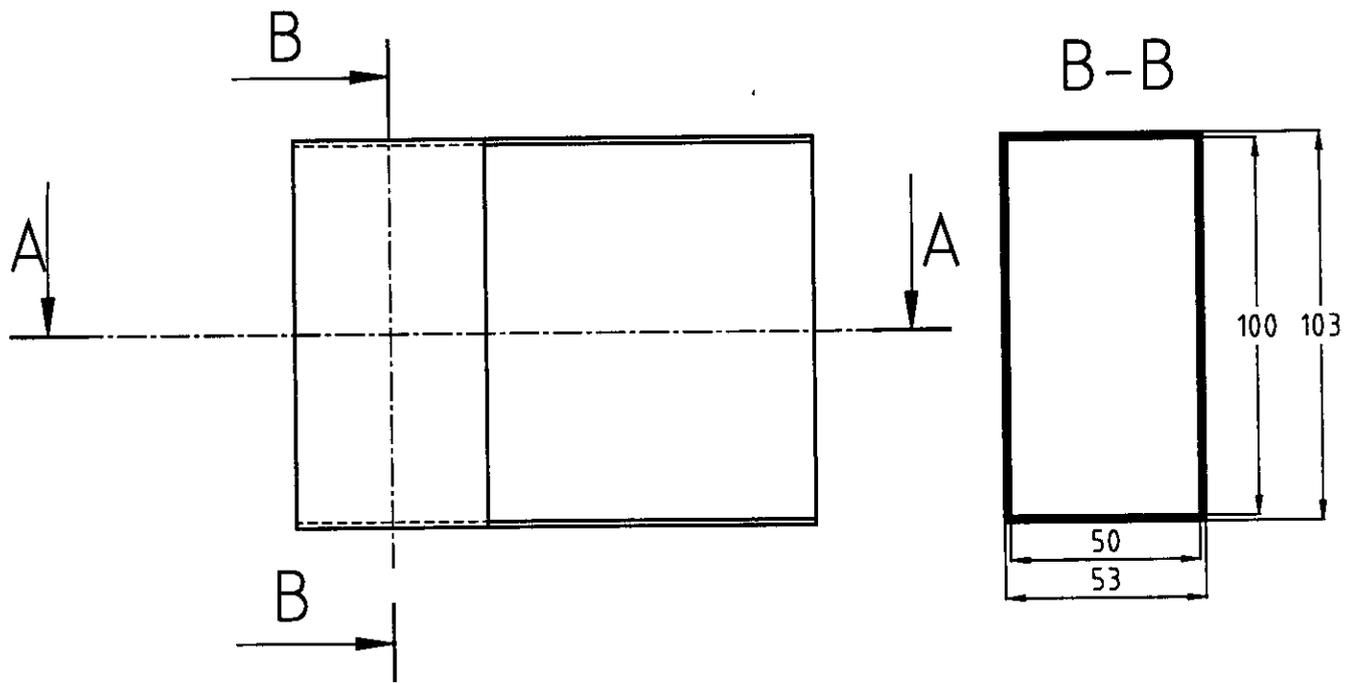
Cyclone

E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

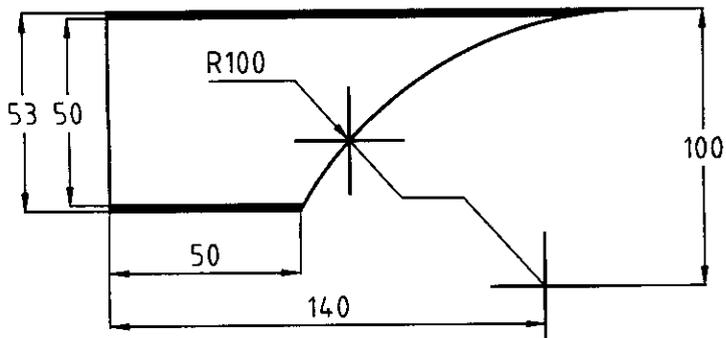
BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR

Réduction de 2.2



A-A



ITG = 0.1 Matière : Tole noire Nbre = 01

Echelle = 1:2

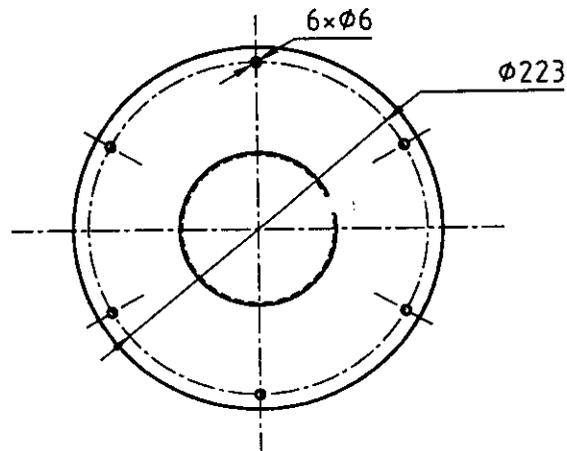
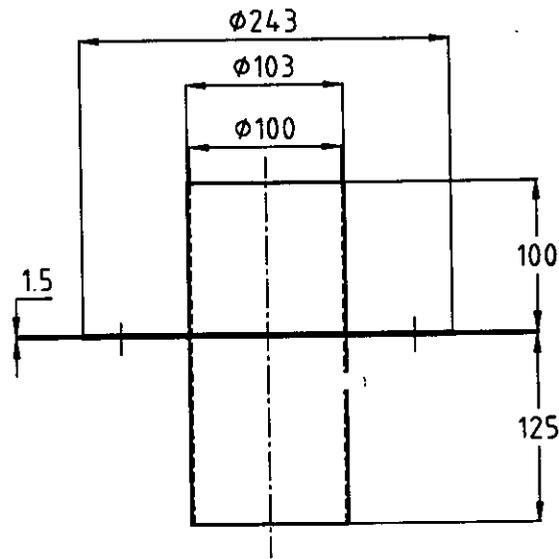
CYCLONE Rep. 01

CONDUITE D'ENTREE DU GAZ DANS LE CYCLONE

E.N.P El - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Tole noire Nbre = 01

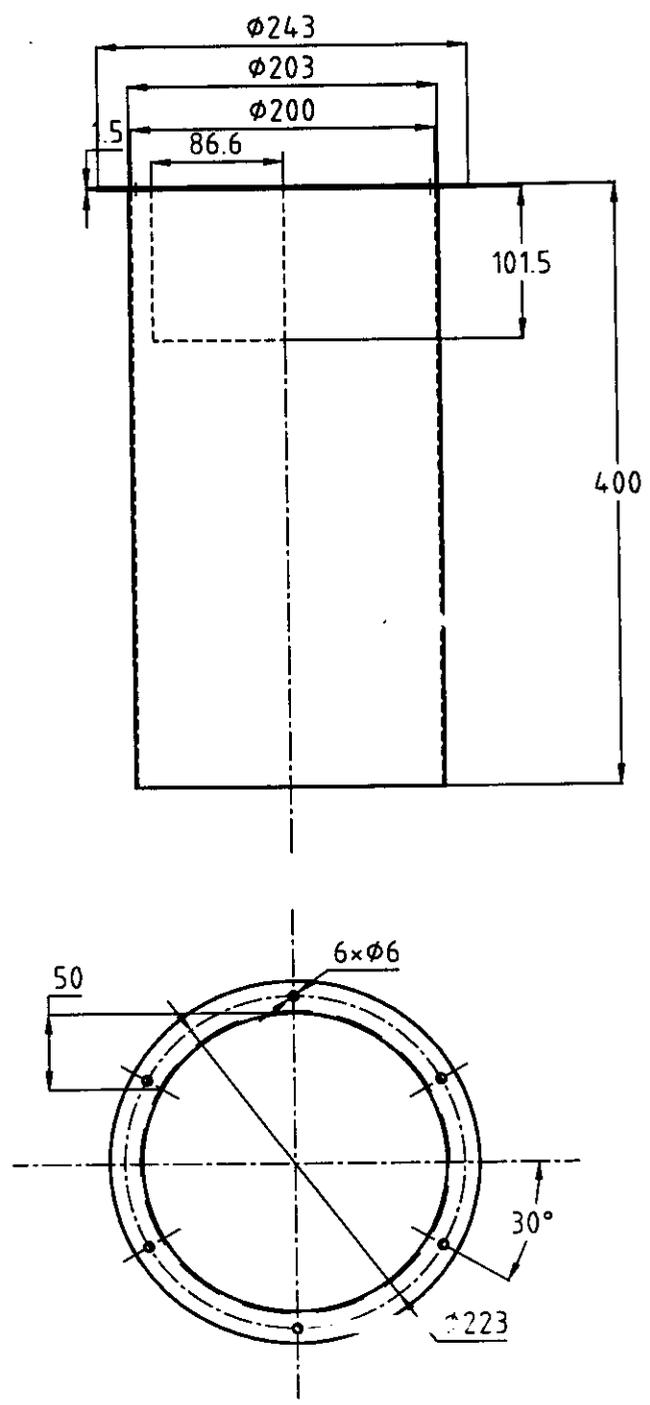
Echelle = 1:5

CYCLONE Rep. 02 et 03
CHAPEAU D'ECHAPPEMENT DU GAZ

E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Tole noire Nbre = 01

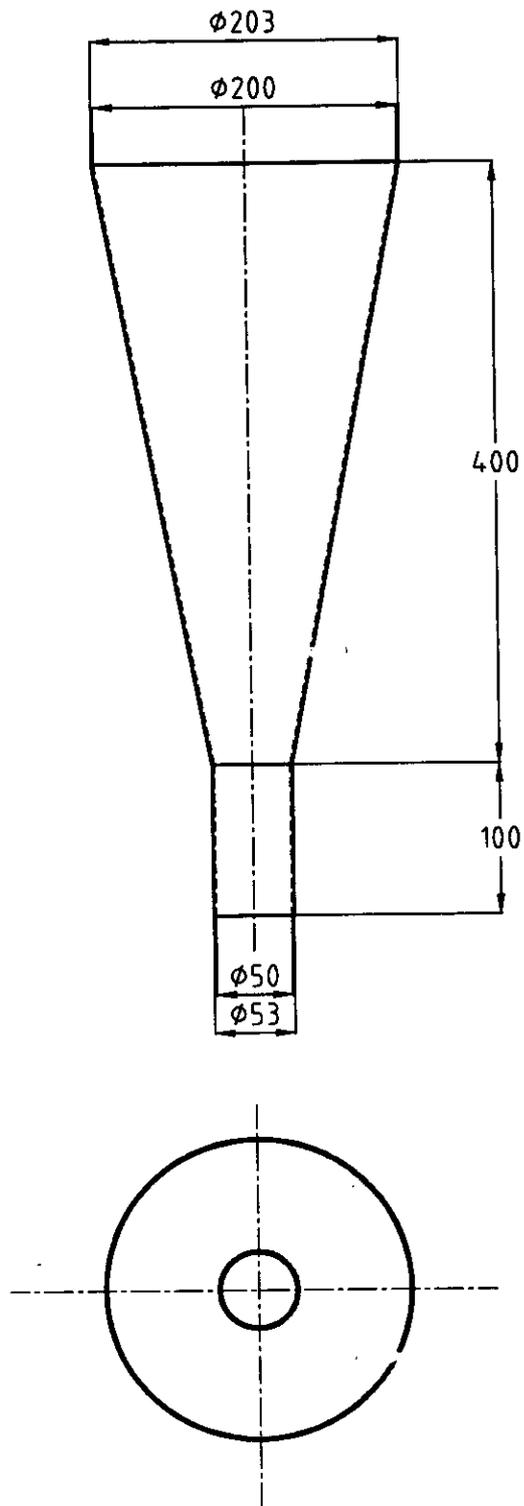
Echelle = 1:5

CYCLONE Rep. 04
PARTIE CYLINDRIQUE DU CYCLONE

E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR



ITG = 0.1 Matière : Tole noire Nbre = 01

Echelle = 1:5

CYCLONE Rep. 05
PARTIE CONIQUE DU CYCLONE



E.N.P EL - HARRACHE (ALGER)

BRITAH
Abdelmalek

ATOMISEUR

ANNEXE II

Résultats de l'Analyse Granulométrique

Annexe II

Influence des paramètres d'atomisation sur la distribution en masse des particules de poudre selon leurs dimensions par tamisage.

La poudre est séparée en fractions granulaires définies par le côté de la maille carrée du tamis comme mentionné dans le Chapitre IV (§ IV.4.2.1.1).

Les résultats de l'analyse granulométrique, (après tamisage et pesage des quantités de poudres obtenues dans chaque tamis), sont traduits en courbes définies par :

- les pourcentages des refus (ordonnées),
- les dimensions des tamis (abscisses).

I- Influence de la température du métal liquide

Taille (µm)	Fraction massique des refus (%)			
	600°C	550°C	500°C	450°C
10	0.7	0.04	0	0
20	2.93	2.02	1.61	1.46
30	4.37	2.91	2.43	2.11
40	6.05	6.34	5.93	5.68
50	7.44	6.93	6.96	5.98
63	9.68	8.88	8.18	8.2
80	10.72	9.76	9.32	9.2
100	13.18	12.87	11.86	10.55
125	13.65	13.53	13.06	11.48
160	13.54	14.26	13.01	14.35
200	9.63	10.98	12.09	13.47
250	5.99	6.71	8.98	9.55
315	1.57	2.72	3.92	4.98
400	1.45	2.05	2.65	2.99

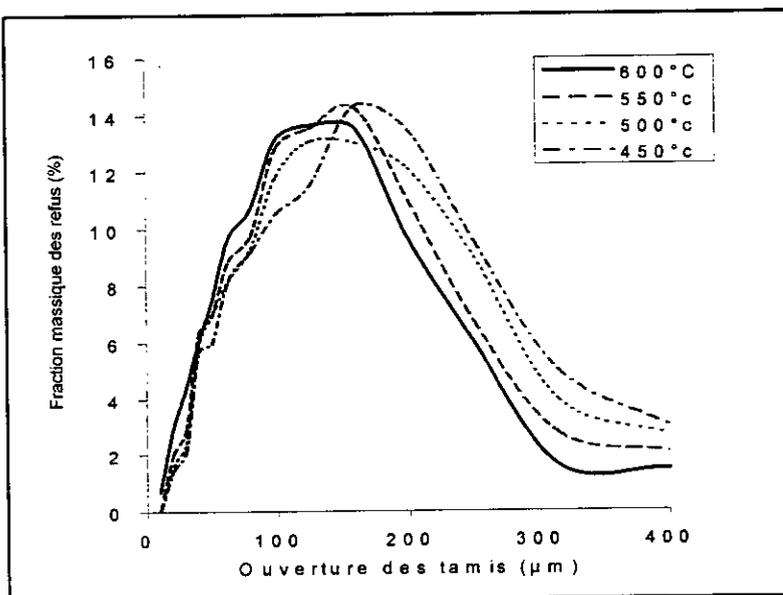


Tableau I. Pourcentage massique dans chaque tamis.

Figure 1. Distribution des refus en fonction des ouvertures des tamis.

II- Influence de l'angle du jet du gaz

Taille (µm)	Fraction massique des refus (%)		
	20°	30°	45°
10	0.35	0	6.31
20	1.22	1.61	9.12
30	4.67	2.43	11.25
40	5.43	5.93	15
50	5.84	6.96	11.12
63	7.12	8.81	9.56
80	8.18	9.32	7.94
100	10.8	11.86	7.44
125	12.59	13.06	6.5
160	13.88	13.01	5.5
200	13.03	12.09	3.81
250	9.7	8.98	3.38
315	4.09	4.77	1.94
400	3.1	1.8	1.13

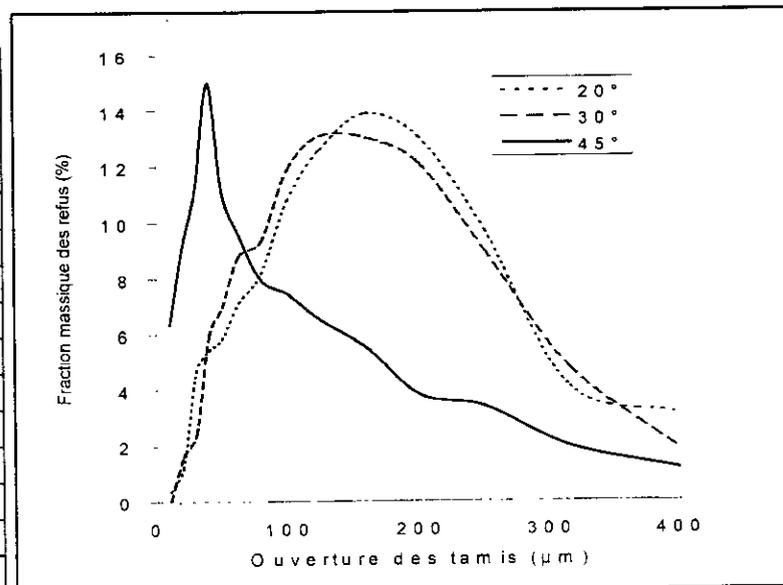


Tableau II. Pourcentage massique dans chaque tamis.

Figure 2. Distribution des refus en fonction des ouvertures des tamis.

III- Influence de la pression du gaz

Taille (μm)	Fraction massique des refus (%)			
	4,5 bars	4 bars	3,5 bars	3 bars
10	1.64	0.16	0.12	0.12
20	3.27	0.54	0.27	0.16
30	6.11	6.47	4.35	2.8
40	7.09	7.55	7.12	5.75
50	8.78	8.57	7.33	6.13
63	12	11.27	9.73	8.5
80	12.55	11.81	11.41	9.9
100	13.64	13.37	13.21	11.89
125	11.89	12.88	13.1	13.39
160	10.26	10.62	11.57	12.64
200	6	7	8.26	9.73
250	4.53	6.2	7.5	9.73
315	1.58	2.53	4.02	5.92
400	0.66	1.03	2.01	3.34

Tableau III. Pourcentage massique dans chaque tamis.

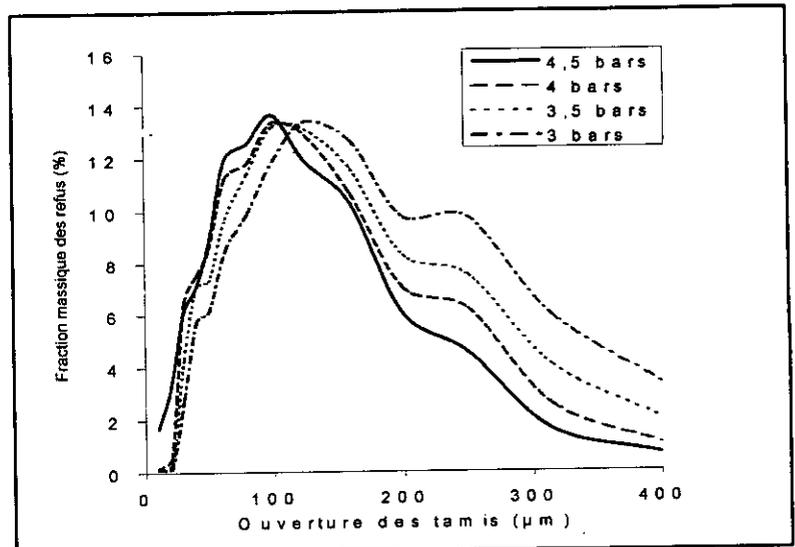


Figure 3. Distribution des refus en fonction des ouvertures des tamis.

IV- Influence du diamètre du jet liquide

Taille (μm)	Fraction massique des refus (%)			
	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
10	2.25	0	0	0
20	4.66	1.61	0.98	0.29
30	6.75	2.42	2.01	1.45
40	7.49	5.93	5.64	4.65
50	8.83	6.33	6.1	5.64
63	9.64	8.81	8.17	7.85
80	10.7	9.32	8.69	8.72
100	13.38	11.86	11.62	12.21
125	11.99	13.07	13.58	13.66
160	9.8	13.01	14.04	14.54
200	7.66	12.09	12.83	13.37
250	6.6	8.98	9.2	9.88
315	0.25	3.92	4.03	4.25
400	0	2.65	3.11	3.49

Tableau IV. Pourcentage massique dans chaque tamis.

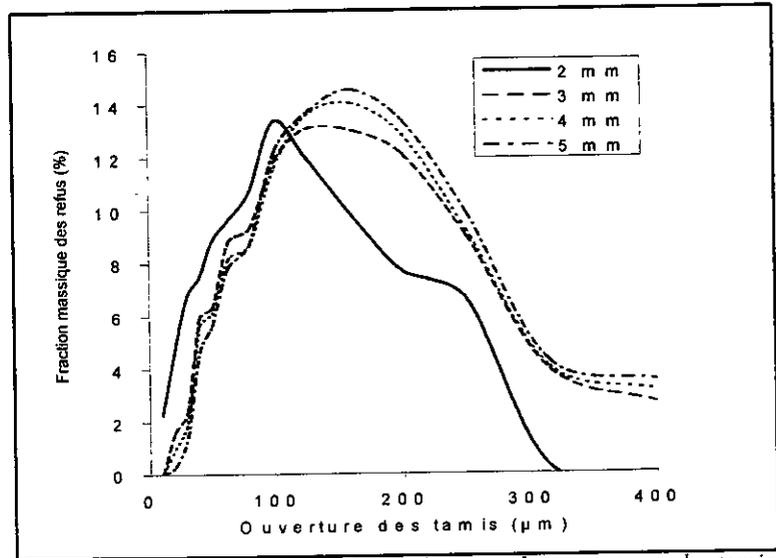


Figure 4. Distribution des refus en fonction des ouvertures des tamis.

V- Influence de la hauteur du jet liquide

Taille (μm)	Fraction massique des refus (%)			
	30 mm	70 mm	110 mm	150 mm
5	0	0	2.22	5.35
10	0	1.28	4.5	6.7
20	1.61	5.1	8.21	8.76
30	2.42	6.38	9.1	9.35
40	5.93	7.21	9.43	9.62
50	6.33	7.77	9.99	10
63	8.81	9.48	11.49	10.86
80	9.32	9.04	10.32	9.68
100	11.86	9.87	9.82	9.19
125	13.07	10.7	7.83	7.57
160	13.01	10.7	6.1	4.92
200	12.09	8.49	3.72	4.08
250	8.98	7.99	2.61	1.32
315	3.92	3.55	2.55	1.3
400	2.65	2.44	2.11	1.3

Tableau V. Pourcentage massique dans chaque tamis.

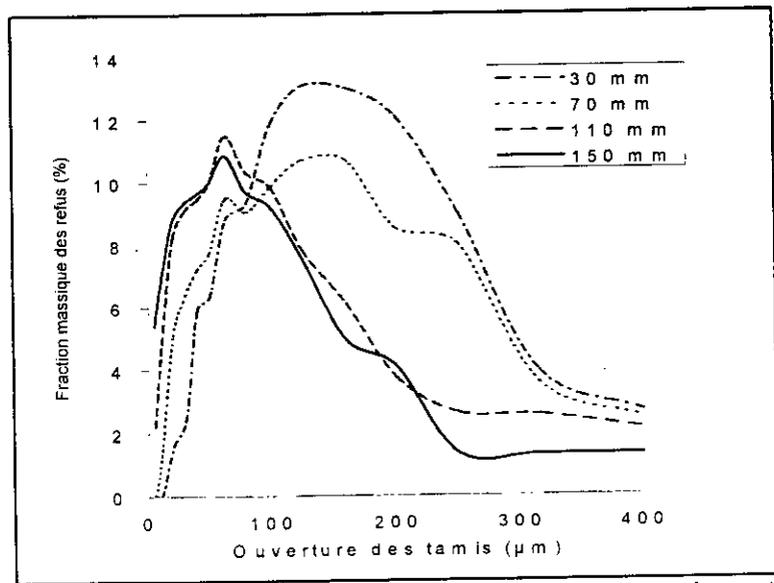


Figure 5. Distribution des refus en fonction des ouvertures des tamis.