

4/97

REPUBLIQUE ALGERIENNE POPULAIRE ET DEMOCRATIQUE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de METALLURGIE

Projet de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état

SUJET

**ETUDE COMPARATIVE DU REVETEMENT AU Mo
PAR METALLISATION SUR LES DIFFERENTES
MATRICES DE FONTE GSC
(Ferritique, ferrito-perlitique, perlitique)**

Proposé par :
Mr E. SALHI

Etudié par :
M. Hamadache

Dirigé par :
Mr E. SALHI

PROMOTION 1996-97

REPUBLIQUE ALGERIENNE POPULAIRE ET DEMOCRATIQUE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de METALLURGIE

Projet de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état

SUJET

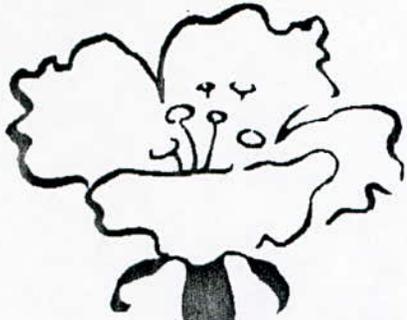
**ETUDE COMPARATIVE DU REVETEMENT AU Mo
PAR METALLISATION SUR LES DIFFERENTES
MATRICES DE FONTE GSC
(Ferritique, ferrito-perlitique, perlitique)**

Proposé par :
Mr E. SALHI

Etudié par :
M. Hamadache

Dirigé par :
Mr E. SALHI

PROMOTION 1996-97



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier vivement l'ensemble des enseignants du département de métallurgie qui ont contribué à ma formation durant notre cycle.

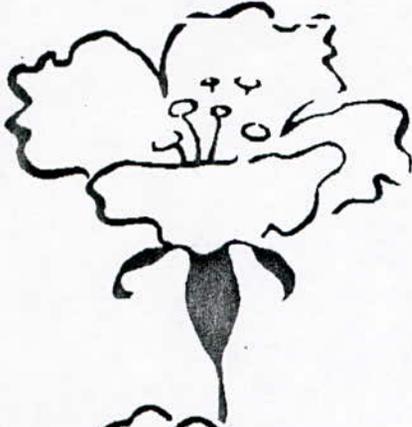
Je remercie, également, toute l'équipe du laboratoire traitement thermique et contrôle de la CVI (SNVI), en particulier, Saïd, Reda, Djamel, Rabah, Abd-elkrime, ainsi, que M^r AMRAOUI et M^r MADANI, sans oublier le responsable des archives Nacer pour leur précieuse aide.

Je n'omettrai pas de remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Aussi, je voudrai remercier le chef de département de Génie industriel M^{lle} Aboun .

Je remercie vivement Fella, Anis, Sakina, Rachid et zino ainsi que toute ma promotion pour leur aide et leur complicité.

En fin, je remercie mon promoteur M^r SALHI qui a suivi ce modeste travail, pour ses conseil s et pour le précieux temps qu'il m'a accordé.



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail,

A la mémoire de mon père,

A ma mère,

A Redouane,

A mes frères et soeurs.

MOUNA

SOMMAIRE



Sommaire

Introduction générale.....	1
Généralités bibliographique	
1. Traitements de surface et différentes techniques.....	2
1.1. Traitements de surface.....	2
1.1.1. Introduction.....	2
1.1.2. Définition d'un traitement de surface.....	2
1.1.3. Le rôle d'un traitement de surface.....	2
1.1.4. Le choix d'un traitement de surface.....	3
1.1.5. Différentes techniques de traitement de surface.....	3
1.1.6. Classement des principaux traitements.....	4
1.2. La projection thermique.....	4
1.2.1. Historique.....	4
1.2.2. Définition de la projection thermique.....	4
1.2.3. Principe de la projection thermique.....	5
1.2.4. Types de projection thermique.....	5
1.2.4.1. Projection à la flamme.....	5
1.2.4.2. Arc électrique.....	5
1.2.5. Les différents paramètres influents sur le déroulement de la métallisation.....	5
1.2.6. Rôles et avantages de la projection thermique.....	6
1.2.7. Domaines d'application de la projection thermique.....	7
2. Matériaux à revêtir et à projeter.....	8
2.1. La fonte à graphite sphéroïdale (FGS).....	8
2.1.1. Elaboration de la fonte GS.....	8
2.1.2. Caractéristique d'une fonte GS.....	8
2.1.3. Propriétés d'une fonte GS.....	9
2.1.4. Domaines d'application des fontes GS.....	10
2.2. Traitements thermiques des fontes GS.....	10
2.2.1. Recuit de ferritisation.....	10
2.2.1.1. Ferritisation directe.....	11
2.2.1.2. Ferritisation indirecte.....	11
2.2.2. Recuit de perlitisation.....	12
2.3. Matériaux projetés.....	13
2.3.1. Matériaux susceptibles à être projetés.....	13

2.3.2. Caractéristiques des matériaux projetés.....	13
2.3.3. Formation et structure d'un dépôt.....	14
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات BIBLIOTHEQUE — المكتبة Ecole Nationale Polytechnique </div>	
3. Techniques expérimentales et résultats.....	16
3.1. But du travail.....	16
3.2. Le matériau étudié.....	16
3.2.1. Composition chimique.....	16
3.2.2. Traitement de ferritisation.....	17
3.2.3. Traitement de perlitisation.....	17
3.2.4. La matrice ferrito-perlitique.....	18
3.3. Matériau projeté.....	20
3.3.1. Aperçu sur le Mo et ses caractéristiques.....	20
3.3.2. Propriétés mécaniques du Mo.....	20
3.3.3. Composition chimique du Mo utilisé.....	20
3.4. Mise en oeuvre de la projection thermique.....	22
3.4.1. Découpage des échantillons.....	22
3.4.2. Préparation des surfaces.....	22
3.4.2.1. Usinage.....	22
3.4.2.2. Sablage.....	23
3.5. La métallisation : (projection thermique à la flamme).....	24
3.6. Contrôle des dépôts.....	25
3.6.1. Préparation des échantillons.....	25
3.6.2. Analyse micrographique.....	26
3.6.2. Densité du dépôt.....	31
3.6.4. Adhérence du dépôt.....	34
3.6.5. Microdureté.....	36
4. Interprétation générale.....	38
Conclusion.....	40
Références bibliographiques.....	42

Annexe

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Un matériau travaillant dans un environnement quelconque, rencontre plusieurs contraintes de sollicitation extérieures qui peuvent l'endommager, en particulier, en surface. Ces contraintes sont dues à des agressions de nature chimiques, physiques ou mécaniques.

Dans le but d'avoir un compromis entre le coût de production et la bonne qualité du produit, l'industrie a opté pour la réalisation des multimatériaux, d'une part, pour économiser de la matière première, d'autre part, pour administrer à l'élément produit de meilleures propriétés, qui lui permettent une longévité importante.

Pour obtenir des multimatériaux conformes aux exigences demandées, plusieurs techniques ont été mises à la disposition de l'industrie, parmi elles, on a la métallisation par projection thermique.

Dans cet ordre d'idée, notre travail consiste à réaliser un dépôt de Molybdène sur trois états de surface de différentes rugosités sur trois différentes matrices d'une fonte GSC, et de faire une étude comparative entre les caractéristiques de chaque matrice.

Notre travail a été décomposé en trois grandes parties .

- Première partie : elle est réservée à la recherche bibliographique pour donner une idée générale sur les étapes suivies dans notre travail.
- Deuxième partie : on a exposé nos techniques expérimentales et les résultats obtenus
- Troisième partie : comporte une synthèse avec une interprétation des résultats.
- En fin, on termine par une conclusion générale avec quelques recommandation.

GENERALITES BIBLIOGRAPHIQUE

**TRAITEMENTS DE SURFACE
ET
DIFFERENTES TECHNIQUES**

1. Traitements de surface et différentes techniques

1.1. Traitements de surface

1.1.1. Introduction

Quand une protection s'impose, divers traitements peuvent être effectués sur des pièces en différents matériaux, soit pour leur conférer un aspect de surface agréable en même temps qu'une résistance à la corrosion atmosphérique, soit pour leur permettre de résister à des agressions telles qu'une corrosion chimique ou certaines formes de détérioration mécanique.

1.1.2. Définition d'un traitement de surface

Le terme traitement de surface est défini, dans l'encyclopédie Larrous, de la façon suivante « traitement que l'on applique en surface à une pièce métallique, soit pour en modifier les propriétés superficielles, soit pour la recouvrir d'une couche protectrice » [1 0] .

1.1.3. Le rôle d'un traitement de surface

La vente d'un produit repose sur le bas prix d'achat, la bonne qualité et la longue durée de vie. On réfléchit toujours aux moyens d'économiser la matière première, en utilisant les quantités nécessaire pour la production. Pour cela, on effectue des traitements thermiques ou de surface pour donner les propriétés souhaitées pour le respect des conditions déjà évoquées.

Le produit est amené à être utilisé dans des milieux atmosphériques, agressifs qui facilitent sa détérioration en surface.

Donc, les traitements de surface s'effectuent dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques ou chimiques d'un matériau exposé à des agressions, comme la corrosion, l'usure par frottement, la fatigue...

Les prestations apportées par les traitements sont très importantes dans de nombreux secteurs d'activités... . En mécanique plus de 50% des avaries des pièces ont pour origine un endommagement superficiel d'ou le besoin d'un traitement approprié pour renforcer la tenue de la pièce.

Exemple :

Une automobile sans traitement serait :

- Inadaptée au goût du client par la fonction aspect de la carrosserie non peinte.
- Non économique par la quantité de matière engagée.
- Non durable vis à vis de l'usure par frottement des pièces moteurs et de la corrosion atmosphérique de la structure.

cette énumération suffit pour démontrer :

- D'une part, la polyfonctionnalité des applications des traitements.
- D'autre part, le fait d'union horizontal que peuvent assurer les traitements entre différents secteurs d'activité [1] .

1.1.4. Le choix d'un traitement de surface

Les traitements de surface superficiels permettent l'adaptation des propriétés de surfaces aux contraintes de sollicitation subies par les pièces mécaniques (statique, dynamique ou thermique).

Aussi, on peut effectuer un traitement de surface pour donner plusieurs propriétés en même temps pour une pièce fabriquée ou déjà utilisée. Donc, le choix du traitement adéquat pour assurer les propriétés à obtenir doit avoir un compromis avec les paramètres considérés :

a / Concernant la nature du dépôt en relation ou non avec celle du substrat, ou bien certaines de ses caractéristiques : continuité, épaisseur, porosité, adhérence, fragilité, flexibilité, corrodabilité, dureté, conductivité électrique ou thermique, brillance, soudabilité, usinabilité, tenue à l'usure et au frottement, non toxicité... etc, sans oublier les problèmes de réalisation et du coût.

b / Concernant le traitement thermique superficiel nécessaire pour l'obtention des propriétés voulues (cémentation, chauffage, trempe, . . .).

Le choix des procédés se fait en tenant compte d'une conjonction technico-économique [10]

1.1.5. Différentes techniques de traitement de surface

a / Les traitements thermiques :

- Traitements thermochimiques de diffusion (chromisation, nitruration, carbonituration).
- Traitement thermique par transformation (trempe superficielle).

b / Les revêtements ou dépôts :

- Revêtement par voie humide (électrochimique, chimique).
- Dépôt par voie sèche thermique (projection thermique, soudure avec rechargement).
- Physique, chimique en phase vapeur.
- Ionisation par pulvérisation cathodique.

c / Traitement de conversion :

Par immersion pour la formation d'une couche complexe entre le bain et le substrat.
(Phosphatation, oxalation, oxydation anodique, sulfuration).

d / Traitements mécaniques :

Ecrouissage superficiel par action mécanique (par impact, par pression du contact) [11] .

1.1.6. Classement des principaux traitements de surface à l'échelle industrielle

Dans l'industrie, les traitements de surface sont classés d'après leurs fréquences d'utilisation :

a / Revêtements organiques :

peintures, vernis, laques.
revêtement plastique.
goudron et bitumes.

b / Revêtement minéraux : concernant l'émaillage et les revêtements réfractaires à base d'oxyde.

c / Métallisation par immersion dans un bain métallique.

d / Traitement par voie chimique (phase gazeuse, phase aqueuse).

f / Dépôts électrolytiques [10] .

1.2. La projection thermique

1.2.1. Historique

En 1909, le docteur SHOOP aperçut les traces du plomb laissées par l'impact d'une balle sur un mur, de là, il eut l'idée de faire un revêtement par projection du métal fondu . Les premiers appareils à métalliser furent basés sur le principe de fondre le métal avant de le projeter sur les pièces à métalliser.

En 1913, il remplace la poudre par du fil métallique.

En 1914, le pistolet à fil a amplement prouvé sa supériorité. Il s'est sans cesse perfectionné, il est devenu outil de maniement facile et sûr. Depuis cette époque, le procédé s'est considérablement amélioré évoluant, peu à peu, vers la méthode actuelle qui permet l'utilisation industrielle de la métallisation par projection thermique [10]

1.2.2. Définition de la projection thermique

La projection thermique est une technique qui permet de mettre en oeuvre un grand nombre de revêtements capables de couvrir une large gamme de fonctionnalité. Toutefois,

dans de nombreux cas, les utilisations ou les épaisseurs sont limitées par les contraintes résiduelles qui apparaissent au cours du processus [10] .

1.2.3. Principe de la projection thermique

C'est une technique consistant à projeter, en fines particules sur une surface préalablement préparée, un produit d'apport solide fondu au moyen d'une source de chaleur et est projeté sur la pièce par l'intermédiaire d'un matériel utilisant l'énergie de combustion d'un mélange Oxy-gaz, d'un arc électrique ou d'un jet de plasma [10] .

1.2.4. Types de projection thermique

Les procédés de projection thermique commercialisés peuvent être divisés en deux catégories suivant la source d'énergie utilisée :

1.2.4.1. Projection à la flamme

La projection thermique utilisant l'énergie thermique provenant de la combustion de gaz est connue sous le nom de projection flamme .

Les matériaux qui ne se subliment pas et qui fondent à des températures à 2800°C peuvent être projetés à la flamme .

Les matériaux utilisés sont des métaux ou des alliages métalliques qui se présentent sous forme de fils, de cordons, de baguettes ou de poudres.

Les matériaux utilisés pour chaque forme de métal projeté sont :

- 1- Matériel flamme pour fils, cordons ou baguettes.[annexe 1, 2]
- 2- Matériel flamme-poudre : on rencontre les
 - Torche à gaz.
 - Pistolets à poudre subsonique.
 - Pistolet à poudre hypersonique [12] .

1.2.4.2. Arc électrique

Fonctionne à base d'énergie électrique. L'arc électrique est une source d'énergie qui permet à la projection thermique d'augmenter de façon notable sa panoplie de procédé .

On trouve deux familles de matériel qui utilisent cette énergie :

1. Le pistolet à arc électrique entre deux fils .
2. Le pistolet plasma [12] .

1.2.5. Les différents paramètres influents sur le déroulement de la métallisation

a- Influence de la distance de projection :

Si la projection est faite à l'air, lors du contact particules-molécules d'air à la sortie de la flamme ces particules commencent à refroidir, donc, pour assurer l'arrivée de la particule à l'état liquide sur le substrat il faut que la distance soit adéquate.

Si la distance de projection est trop courte, les particules du matériau projeté n'ont pas le temps de fondre complètement avant d'arrivée à la surface, et le substrat va chauffer par suite du contact avec les gaz trop chauds, donc, l'adhérence serait incomplète d'où risque d'arrachement du dépôt. Par contre, si la distance de projection est trop grande, la particule risque de se solidifier avant son arrivée et rebondit hors du substrat .

b- Retour de flamme :

A l'allumage, ou en cours de fonctionnement, le pistolet s'éteint en produisant un claquement, car la flamme a été transportée dans la chambre de mélange des gaz qui continuent à brûler. Ce phénomène est connu sous le nom de « Retour de flamme ». Ce phénomène est causé par :

- Oubli du montage d'une pièce de chalumeau.
- Ouverture de robinet trop rapide par rapport à l'allumage.
- Encrassement des buses.
- Monodétendeur donnant des débits irréguliers

c- Oxydation du métal projeté :

Ce phénomène a comme origine :

- Le mélange de combustion est trop riche en oxygène.
- L'air comprimé contient des particules d'eau en suspension.
- Le pistolet est tenu trop près ou trop loin de la pièce à recharger.
- Le fil du métal d'apport est fondu très près de l'extrémité de la buse.

Donc pour éviter ces problèmes on a tendance à :

- Vérifier le débit des gaz.
- Vérifier le filtrage de l'air comprimé.
- Vérifier la vitesse d'avance du fil ou de la poudre dans le pistolet [7] .

1.2.6. Rôles et avantages de la projection thermique

Le rôle de la métallisation est très diversifié et varié. Il est appliqué dans de nombreux domaines et remplit plusieurs fonctions :

- Protection contre la corrosion.
- Eviter la mise au rebut en sauvant les pièces mécaniques usées.
- Accroître la dureté superficielle exposée aux agressions atmosphériques, mécaniques ou chimiques.
- Améliorer les pièces neuves par l'apport d'un métal en renforçant aux endroits indispensables la résistance au frottement.
- Utilisation pour décoration, isolation électrique, thermique . . .
- Remise en état des pièces mécaniques vitales et fort coûteuses (rechargement des pièces avec des matériaux appropriés sur les parties détériorées).

Les avantages de la projection thermique :

- Rapidité d'emploi, très économique.
- Réalisable en toutes épaisseurs. (tout en évitant un écaillage).
- Réalisation pour tous métaux et spécialement en acier à haute résistance.
- N'élève pas la température du support, peu de déformation, pas de traitement thermique nécessaire après métallisation .
- Le coefficient de frottement est très bas [7] .

1.2.7. Domaines d'application de la projection thermique

Il existe plusieurs domaines d'application de la projection thermique. Si on suit le cycle du fonctionnement d'une pièce (Figure 1), on remarque d'après le schéma que les pièces usées nécessitent un traitement de surface pour améliorer leur rénovation.

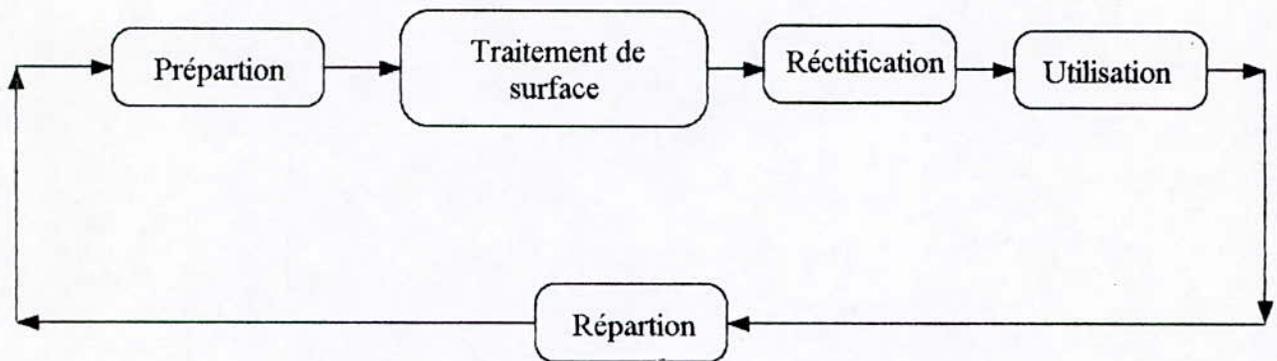


figure 1 : cycle de travail d'une pièce.

On rencontre ce procédé dans :

a- Industrie automobile :

- Portées de roulements, bagues.
- Rechargement de piston.
- Rechargement des cylindres des cages de roulement de noyaux.
- Rechargement du palier du vilebrequin.
- Rechargement du carter de boîte de vitesse.
- Rechargement du bloc moteur fissuré.
- Rechargement des fourchettes des boîtes à vitesses.

b- Les machines-outils, fonderie, forge :

- Reglage de coussinets et de butées.
- Remise à la cote des pièces auxquelles il manque de la matière soit à la coulée, soit par erreur d'usinage.
- Rechargement des bans de machines présentant des soufflures.
- Rechargement des portées d'emmanchement ou logement de clavettes.

c- Sidérurgie.

d- Marine [7] .

**MATERIAUX A REVETIR
ET
A PROJETER**

2. Matériaux à revêtir et à projeter

La projection thermique est réalisée sur n'importe quel matériau usé ou nécessitant une protection surfacique avec des matériaux possédant des propriétés meilleures que celles du matériau à revêtir ou bien de base.

2.1. La fonte à graphite sphéroïdale (F.G.S)

2.1.1. Elaboration de la fonte G.S

D'après l'U.F.R (usine de fonderie de Rouiba), la fonte G.S est élaborée dans deux fours à arc électrique et trois fours de maintien à induction magnétique, avec une capacité de 20 tonnes pour les fours à arc électrique ; à partir d'une charge constituée de :

- 70% de fonte neuve (1^{ère} fusion).
- 20% de retour de fonte (rebut de fonderie).
- 10% d'acier extra doux.

Après la fusion qui demande 2 heures environ, et après un décrassage, nous avons introduit la fonte liquide dans le four à induction (four de maintien). Afin de pouvoir corriger les écarts hors tolérances de la composition chimique préconisée, une analyse au spectromètre s'effectue avant la coulée dans la poche de 2 tonnes.

Pour réajuster la composition chimique, on ajoute les composés suivants :

- Graphite à 99% de carbone.
- Ferro-Silicium Fe-Si à 80% de Si .
- Ferro-Manganese Fe-Mn à 70% de Mn.

La fonte obtenue est du type lamellaire. Pour aboutir à la fonte G.S on utilise le procédé sandwich qui consiste à placer l'alliage au magnésium Ferro-Silico-Magnésium (Fe-Si-Mg) dans une cavité ménagée latéralement favorable pour le rendement du Mg qui est un agent nodulant.

Il faut prévoir une faible teneur en Silicium dans la fonte initiale car ce type d'alliage donne une teneur élevée en Si. La fonte est ensuite versée de telle manière que le jet du métal atteigne le fond [4].

2.1.2. Caractéristiques d'une fonte G.S

La fonte G.S ne diffère pas trop d'une fonte grise qui est considérée comme un alliage qui se solidifie entièrement dans le système stable, autrement dit, dont tout le carbone eutectique précipite sous forme de carbone élémentaire ou graphite. Pour la fonte G.S comme son nom l'indique, l'eutectique précipite sous forme de carbone ou graphite sphéroïdal cristallise dans le réseau hexagonal (H).

En général, la fonte G.S est constituée de 3% de carbone, 1.5 à 4% de Si, le phosphore à 0.08%, le soufre à 0.02% et le Manganèse qui varie entre 0.2 et 0.8% . Les éléments susceptibles de nuire à la sphéroïdisation du graphite sont : Ti, Pb, Sn, As, Bi... Vu l'importance du taux du Silicium dans la fonte qui est de l'ordre de 2.5% . La fonte G.S

est considérée comme un alliage ternaire (Fe-C-Si) d'où on obtient un diagramme pseudo-binaire en fixant la teneur du Silicium à 2.4% (figure 2) [5] .

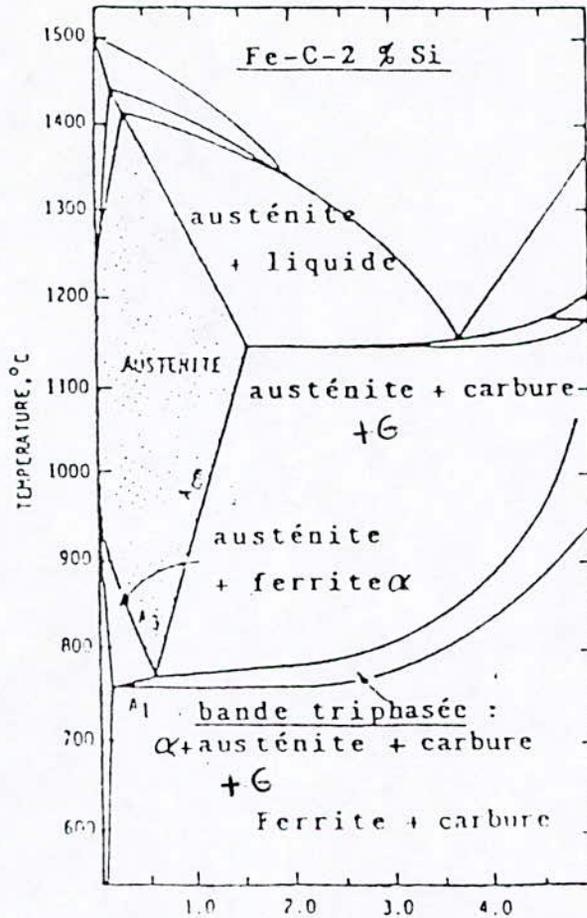


fig 2 : Diagramme pseudo-binaire Fe-C-Si à 2.4 % de Si.

2.1.3. Propriétés d'une fonte G.S

Pour une fonte à graphite sphéroïdal, la forme sphéroïdale provoque l'effet d'entaille le plus faible car la résistance et la ductilité de la fonte à graphite sphéroïdal atteignent ainsi à peu près les deux tiers de celles d'une matrice non entaillée.

1. Une matrice perlitique avec sphéroïdes bien formés correspond à une résistance à la traction de 60 à 75 kg/mm² et à un allongement à la rupture de 1 à 5% .
2. Une matrice complètement ferritique on a une résistance à la traction de 45 à 50 kg/mm² et un allongement pouvant atteindre et même dépasser 25% .
3. Pour une matrice mixte (ferrito-perlitique) les caractéristiques mécaniques prennent des valeurs intermédiaires [5] .

Aussi il faut noter que la composition et surtout la teneur en Silicium ont une influence importante sur les propriétés mécaniques.

Exemple :

Si la teneur en Si est grande avec une teneur en C élevée et une teneur en Mn basse, on peut obtenir une matrice ferritique à l'état brut de coulée, Cette ferrite est plus dure et moins ductile. D'autre part, la résistance à la traction est surtout la ductilité peuvent être gravement détériorées par la présence de sphéroïdes mal formés.

2.1.4. Domaines d'applications des fontes G.S

Parmi les applications les plus importantes des fontes G.S, on doit citer les vilebrequins pour moteurs d'automobiles et moteurs diesel, cette technique est mise en oeuvre depuis 1953 dans l'une des trois grandes usines d'automobiles américaines ; depuis lors d'autres ont suivi .

Les cylindres de laminoirs, les roues dentées et engrenages, de toute sorte, constituent d'autres débouchées très importantes.

La fonte G.S est utilisée de plus en plus pour toutes sortes de pièces dans la construction des automobiles, des tracteurs, des machines agricoles, et plus généralement des machines mécaniques, électriques, etc... [5] .

2.2. Traitements thermiques des fontes GS

On procède à un traitement thermique dans l'intention d'obtenir telles ou telles propriétés, ou bien, favoriser une propriété au détriment d'une autre.

Si on suit la composition chimique la plus utilisée sans l'augmentation de la teneur du Si, la fonte G.S, à l'état brut de coulée, possède une matrice ferrito-perlitique dont la ferrite est disposée en auréole autour des sphéroïdes de graphite entourée de perlite.

Pour l'obtention d'une matrice ferritique ou bien perlitique on fait des recuits de ferritisation ou de perlitisation.

2.2.1. Recuit de ferritisation

On fait un recuit de ferritisation dans le but d'abaisser la dureté, et améliorer la plasticité.

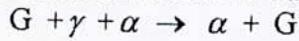
Ce recuit se pratique sur des pièces à l'état brut de coulée dont la matrice est ferrito-perlitique.

En fin de traitement on doit obtenir une matrice totalement ferritique.

Il existe deux types de ferritisation :

2.2.1.1. Ferritisation directe

On fait un maintien dans la bande triphasée, autrement dit, entre $A_{1 \text{ min}}$ et $A_{1 \text{ max}}$ ce qui provoque la transformation de l'austénite en ferrite suivant la réaction :



Le carbone dissocié de la perlite va migrer vers le graphite pour cela il lui faut un temps suffisant. le cycle de traitement consiste en un chauffage jusqu'à une température θ :

$$(A_{1 \text{ min}} < \theta < A_{1 \text{ max}})$$

sui d'un maintien de quelques heures, puis d'un refroidissement lent jusqu'à $A_{1 \text{ min}}$ dans le four, puis un refroidissement à l'air libre (figure a).

On peut faire une austénitisation et ceci dans le but d'homogénéiser la structure et décomposer les carbures secondaires pendant 1h . Puis un refroidissement dans le four jusqu'à une température θ ($A_{1 \text{ min}} < \theta < A_{1 \text{ max}}$) pendant quelques heures (figure b) [8] .

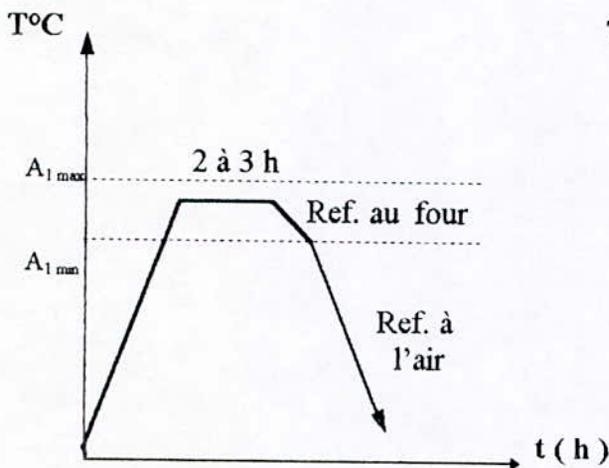


Fig a : Cycle de ferritisation directe sans austénitisation

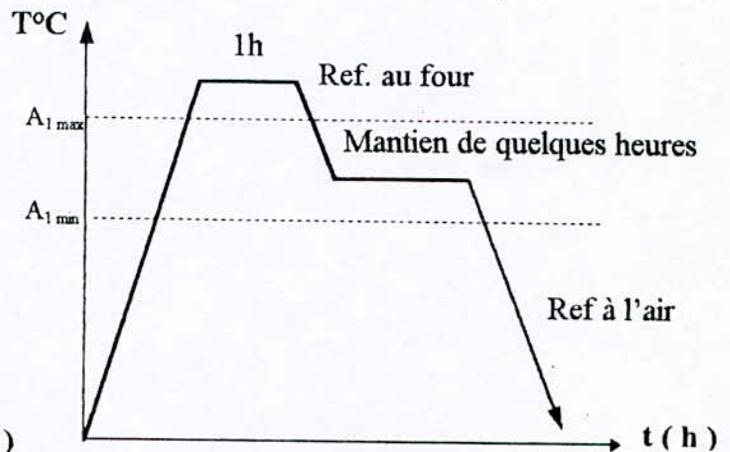
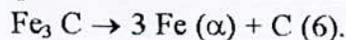


Fig b : Cycle de ferritisation directe avec austénitisation

2.2.1.2. Ferritisation indirecte

Ce traitement est différent du traitement précédent, car dans ce cas on fait un maintien à une température θ au dessous de quelques degrés de $A_{1 \text{ min}}$, dans ce cas : la perlite ($Fe_3 C, \alpha$) \rightarrow α + carbone libre (figure a).

La transformation se fait par la décomposition de la cémentite en ferrite + carbone libre, ou ce dernier peut former soit des germes de graphite qui grossissent ou bien, il migre vers les anciens germes de graphite à travers la ferrite selon la réaction suivante :



On peut effectuer une austénitisation avant le maintien dans le cas où on a des carbures de solidification ou plus qu'il n'en faut de perlite (figure b) [8] .

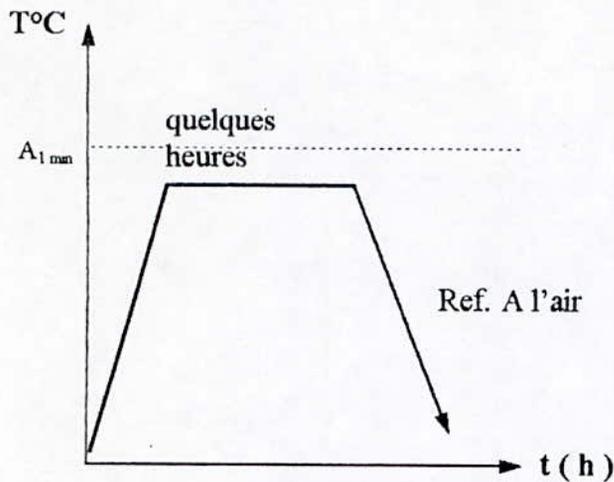


Fig a: Cycle de ferritisation indirecte sans austénitisation .

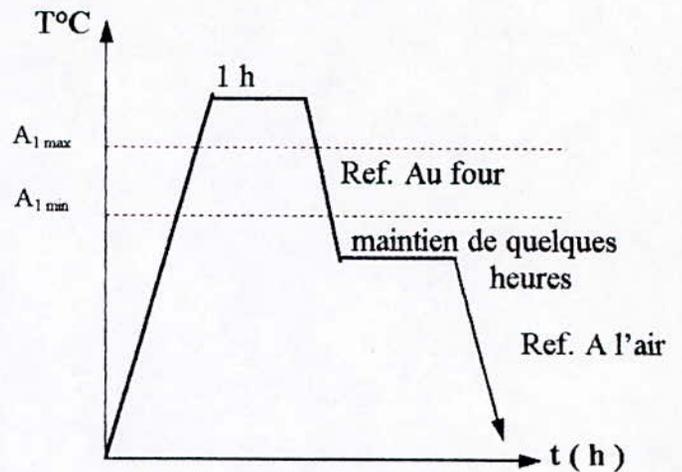


Fig b: Cycle de ferritisation indirecte avec austénitisation .

2.2.2. Recuit de perlitisation

Le but d'un recuit de ferritisation est l'obtention d'une résistance plus élevée à la traction et une plus grande dureté. Les fontes perlitiques sont recommandées lorsqu'on veut appliquer un traitement physico-chimique de durcissement superficiel.

Ce traitement thermique se fait par un maintien à une température de 840 à 860 °C pendant quelques heures . 1 heure par 25 mm d'épaisseur suivi d'un refroidissement à l'air libre (figure ci dessous)

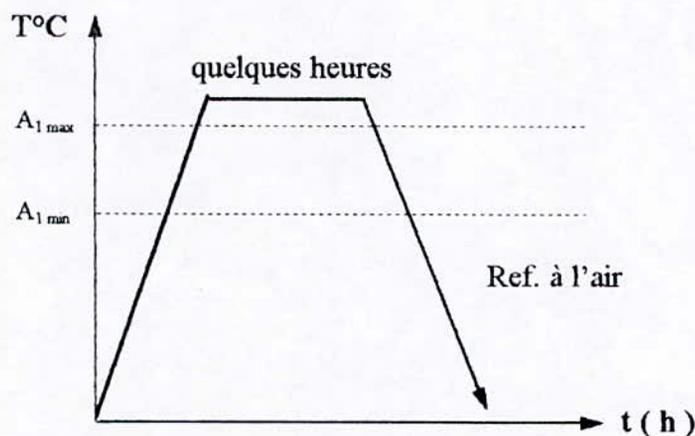


Fig : Cycle de traitement de perlitisation

La formation de la perlite correspond à la transition du système stable au système instable. Au cours du refroidissement il faut un laps de temps qui doit être insuffisant pour la ferritisation .

La matrice austénitique à 100% n'est pas stable dans le domaine $\alpha+\gamma$ + graphite et à partir d'une certaine température la germination de la cémentite est immédiatement suivie par la décomposition de l'austénite en perlite. Lorsque le refroidissement dans la bande triphasée est lent, la ferritisation directe commence, mais sans pouvoir s'achever. pour cela il faut prévoir un temps rapide pour traverser cette bande en utilisant l'air agité jusqu'à une température inférieure à $A_{1\text{ min}}$ [8] .

2.3. Matériaux projetés

2.3.1. Matériaux susceptibles à être projetés

Les matériaux projetables doivent, en principe, répondre aux impératifs ci dessous :

- Avoir une phase liquide stable.
- Avoir un domaine de phase liquide s'étendant sur un intervalle assez large (environ 500 °C entre les points de fusion et d'ébullition).
- Etre compatible avec l'atmosphère ambiante et les gaz de projection.

Quand on choisit un matériau pour réaliser la métallisation il faut prendre en considération les facteurs suivants :

- Rôle du revêtement : résistance à l'usure, à la corrosion, barrière thermique, lubrification.
- Température d'utilisation (s'il y a lieu d'utiliser dans un milieu de haute température) .
- Compatibilité avec le substrat.
- L'épaisseur du dépôt à ne pas dépasser.
- Exigences de finition et l'état de surface du dépôt [6] .

2.3.2. Caractéristiques des matériaux projetés

Pour savoir si le dépôt réalisé par métallisation est efficace il faut contrôler les facteurs qui le caractérisent comme :

- La structure;
- L'adhérence;
- La densité (porosité);
- La dureté.
- La résistance à l'usure;
- Le coefficient de frottement;
- Les caractéristiques électriques , et thermiques pour certaines applications [10].

2.3.3. Formation et structure d'un dépôt

Les particules projetées s'écrasent sur le substrat en laissant une superposition de couches (qu'est l'allure du dépôt réalisé par projection thermique) (figure 3).

Le diamètre (D) des particules, en s'écrasant, peut être évalué par rapport au diamètre (d) initial par le traitement théorique Madesjski [10] simplifié :

$$D/d = 1,29 (\rho v d)^{0,2} / \mu \quad [10]$$

avec ρ : densité du liquide .

μ : viscosité du liquide .

v : vitesse d'impact de la particule .

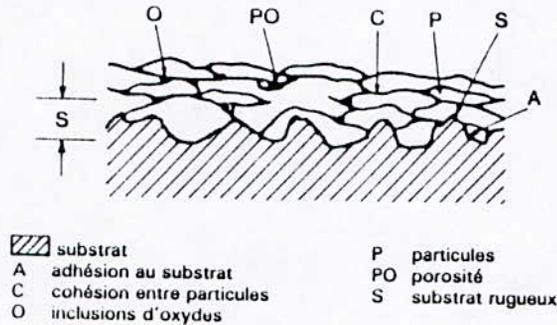


Fig 3 : Coupe d'un dépôt obtenu par projection thermique.

Lors de la fusion dans le jet de gaz chaud, il faut tenir compte du coefficient de transfert thermique, la conductivité thermique et la température de fusion suivant la relation suivante :

$$S (\Delta T k)^2 / v \mu = L^2 D^2 / 16 \rho \quad [10]$$

avec :

S : distance de projection .

k : conductivité thermique

v : vitesse du jet de gaz .

ΔT : gradient de température .

μ : viscosité du jet .

L : capacité thermique de la particule par unité de volume à la température de fusion .

D : diamètre moyen de la particule .

ρ : densité de la particule .

Ainsi il faut que le temps de séjour de la particule dans le jet de gaz et la taille de la particule sont importants pour que la fusion complète soit, correcte .Il est déterminé à partir de la vitesse des gaz .

Sur la figure 4 on voit ces paramètres qui illustre leurs importances lors d'une réalisation d'un dépôt .

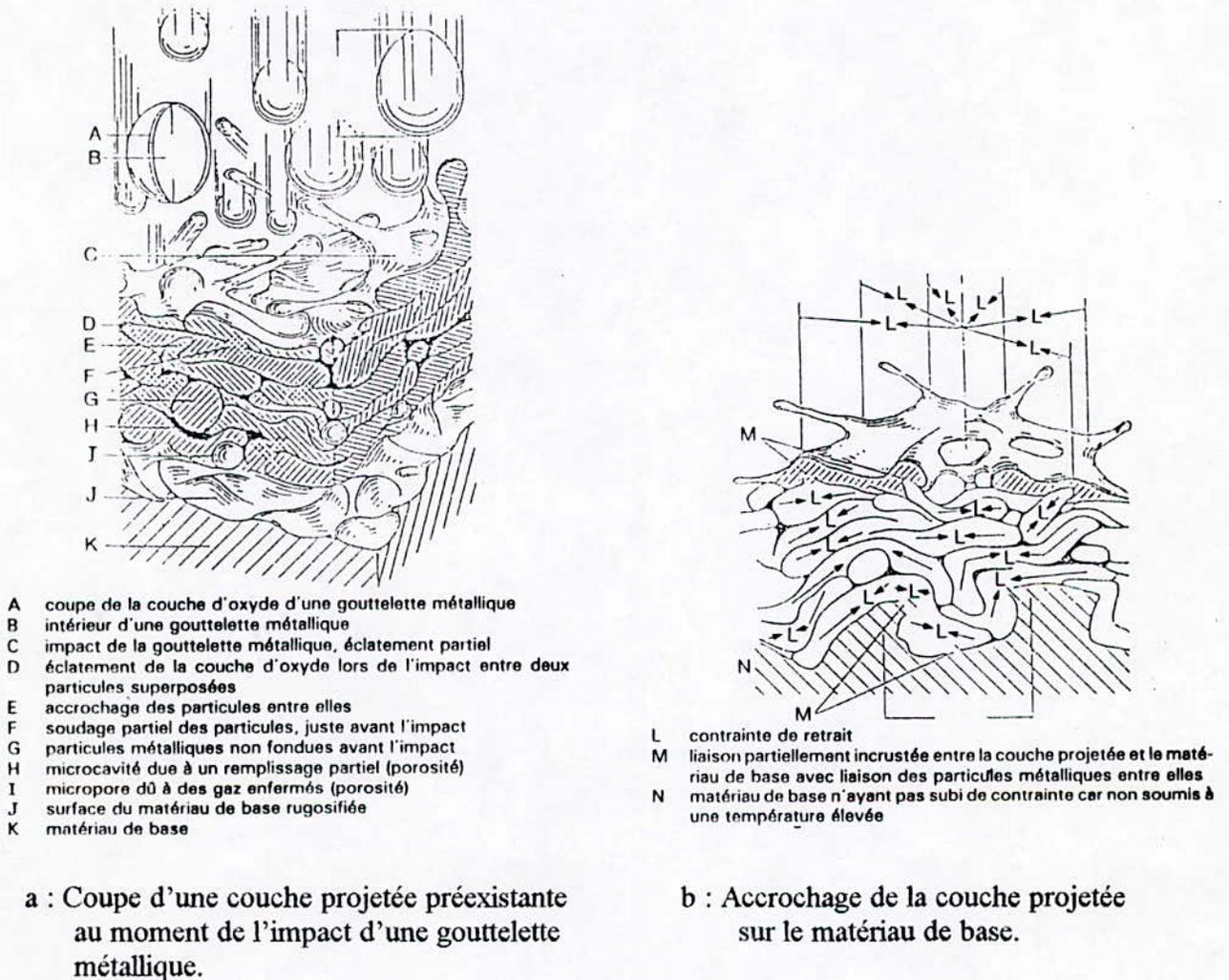


Fig 4 : Aspect d'une gouttelette lors de l'impact.

**TECHNIQUES EXPERIMENTALES
ET
RESULTATS**

3. Techniques expérimentales et résultats

3.1. But du travail

le but de notre travail est d'avoir un compromis entre le bas prix de production et la bonne qualité du produit. Pour cela, on a effectué une étude des caractéristiques des différentes matrices de fontes GS après revêtement au molybdène pour déterminer les différents paramètres favorisant la métallisation (épaisseur, densité, rugosité,...) sur les différentes matrices: ferritique, ferrito-perlitique, perlitique.

3.2. Le matériau étudié

On dispose d'une fonte à graphite sphéroïdal obtenue à l'état brut de coulée, sa matrice est ferrito-perlitique.

Pour l'obtention d'une matrice ferritique et une matrice perlitique, on a effectué des traitements thermiques de ferritisation et de perlitisation.

(Cette fonte a été élaborée à l'unité de Fonderie de Rouiba).

3.2.1. Composition chimique

C'est une fonte nommée GSC de structure ferrito-perlitique, sa composition chimique est donnée dans le Tableau 1: (% massique) [8]

Eléments	% C	% Si	% Mn	% S	% P	% Cu	C _{eq}
GSC	3.48	2.55	0.30	0.016	0.052	0.02	4.33

Tableau 1 : Composition chimique de la fonte GSC.

les propriétés mécaniques de cette fonte sont représentées dans le tableau 2 [8]

Propriétés	R _{e0.2} N / mm ²	R _m N / mm ²	A%	Z%	K da J / cm ²	HB
GSC	406	592	10.6	9.3	0.42	221

Tableau 2 : Propriétés mécaniques de la fonte GSC

D'après le diagramme pseudo-binaire [Chapitre I], la bande triphasée est limitée entre $A_{1 \min} = 715^{\circ}\text{C}$ et $A_{1 \max} = 765^{\circ}\text{C}$. Dans cette bande, on trouve de la ferrite, la perlite, le graphite et des carbures.

Pour l'obtention des matrices ferritique et perlitique, on va se référer au diagramme Fe-C-Si pour la réalisation des traitements déjà vus dans le chapitre II (Fig 2).

3.2.2. Traitement de ferritisation

Le cycle qu'on a suivi pour faire un traitement thermique de ferritisation est un cycle direct avec austénitisation, schématisé par la figure 1.

On fait un chauffage suivi d'un maintien de 1 heure dans le four à la température $T^{\circ} = 860^{\circ}\text{C}$, puis on fait un refroidissement dans le four jusqu'à la température $T^{\circ} = 750^{\circ}\text{C}$ qui sera la température de maintien pendant 1 heure et 30 minutes à 2 heures, après on fait refroidissement à l'air libre, on obtient la matrice illustrée sur la figure 2 :

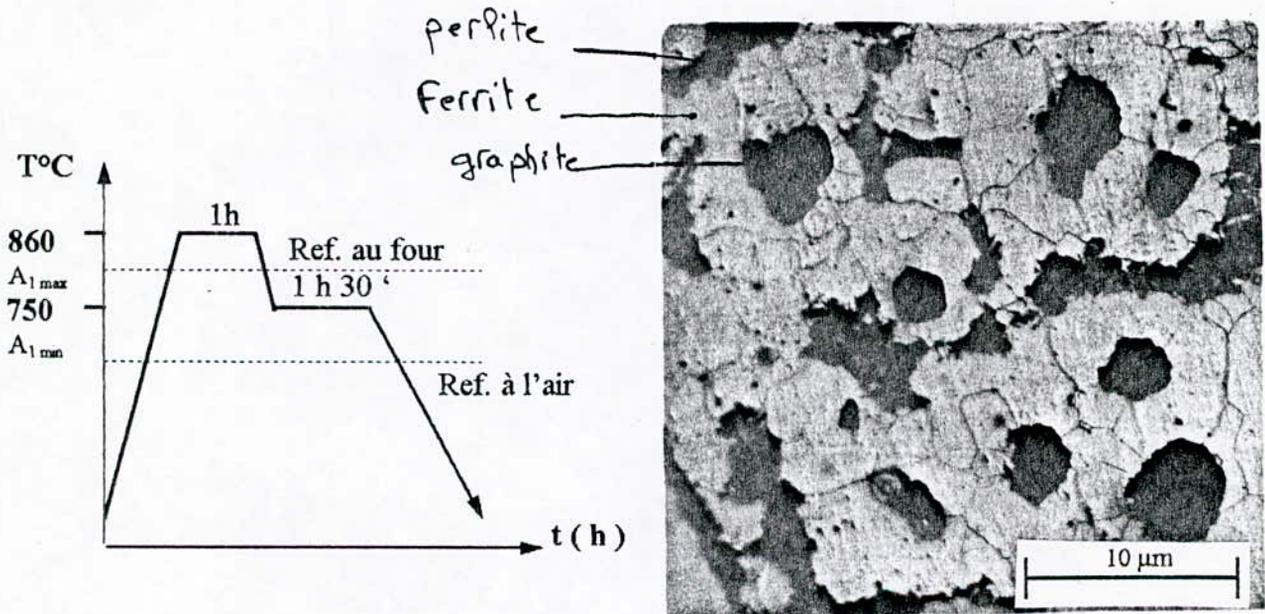


Fig 1 : Cycle de traitement de ferritisation.

Fig 2 : La matrice ferritique de la fonte GSC.

On a obtenu une matrice à 95% de ferrite, en mesurant la dureté Brinell de cette matrice on a trouvé 141 HB.

3.2.3. Traitement de perlitisation

Le cycle suivi pour une bonne perlitisation est représenté à la figure 3.

Pour obtenir cette structure, on a effectué un chauffage à la température $T^{\circ} = 880^{\circ}\text{C}$

avec un temps de maintien de 2 à 3 heures suivi d'un refroidissement dans le four jusqu'à $A_{1max} + 10^{\circ}\text{C}$, puis on fait sortir les pièces du four et on continue le refroidissement à l'air agité pour traverser la bande triphasée rapidement, dans le but d'empêcher le carbone de diffuser entre les joint de grains vers le graphite, pour éviter l'apparition de la ferrite, puis le refroidissement à l'air libre à partir de la température $T^{\circ} = 600^{\circ}\text{C}$.

La matrice obtenue est à 95% de perlite comme l'indique la figure 4, la dureté Brinell de cette matrice est de 289 HB en moyenne.

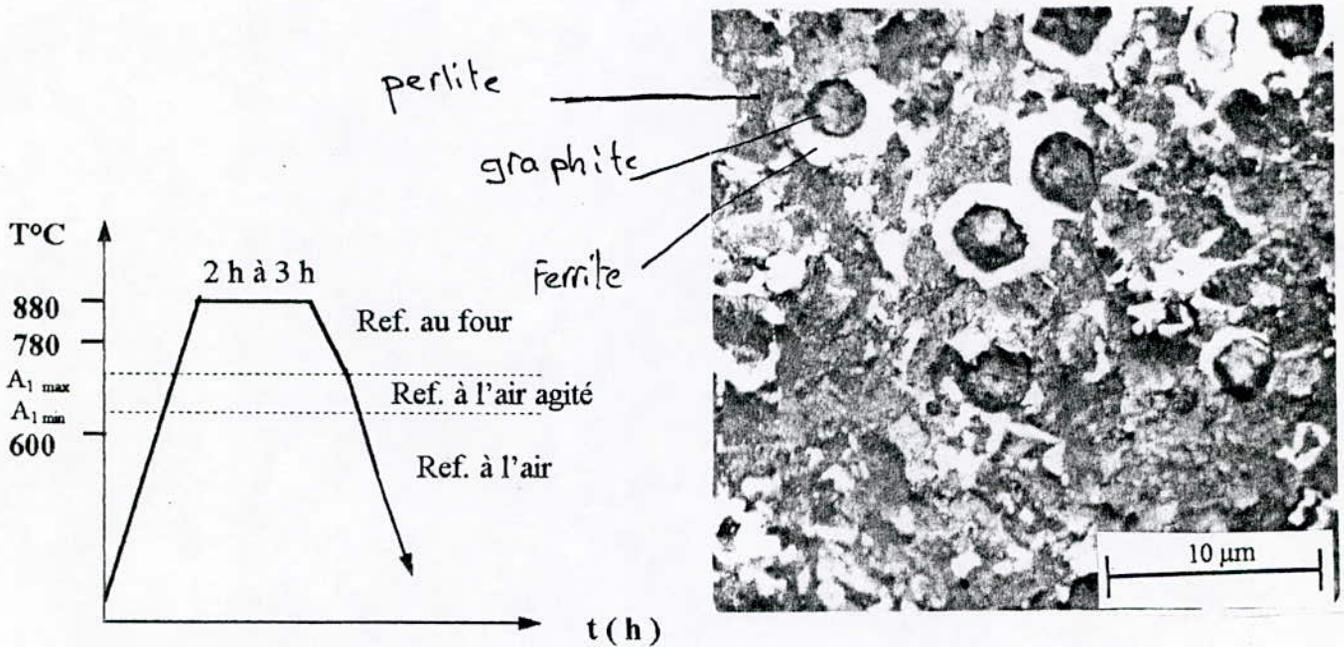


Fig 3: Cycle de traitement de perlitisation.

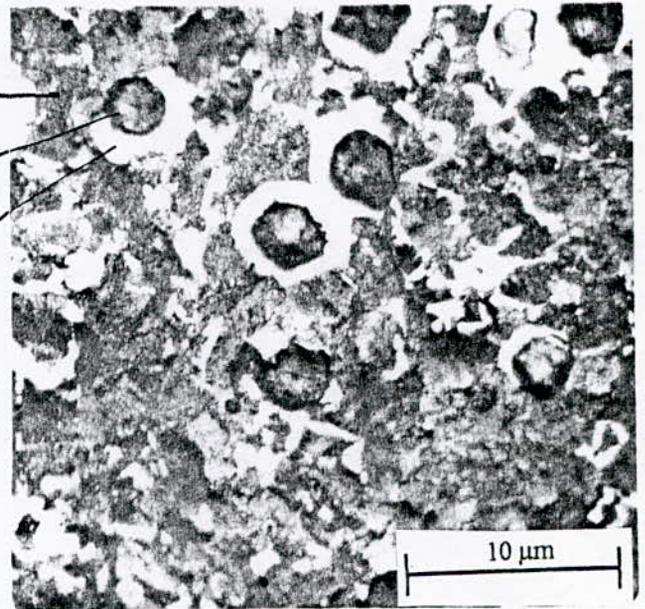


Fig 4 :La matrice perlitique de la fonte GSC.

3.2.4. La matrice ferrito-perlitique

Cette matrice est obtenue à l'état brut de coulée (figure 5). C'est une fonte à graphite sphéroïdal, dans un fond ferrito-perlitique, présentant une morphologie d'oeil de boeuf (Bull's eyes). La dureté de cette matrice est de 221 HB.

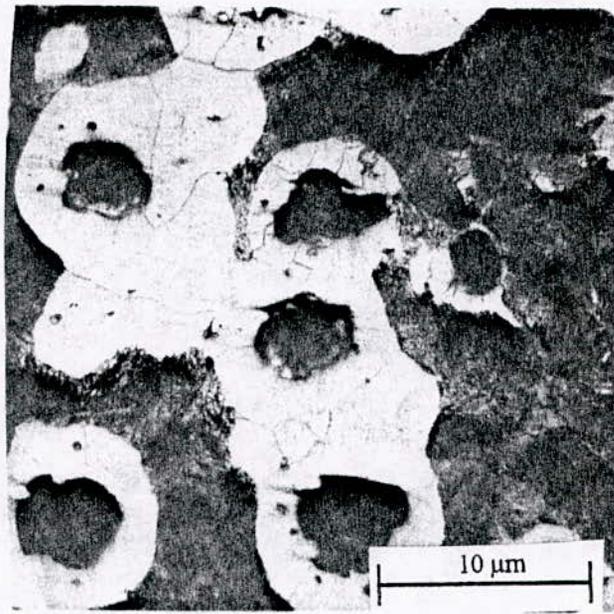


Fig 5 : Structure ferrito-perlitique.

3.3. Matériau projeté

3.3.1. Aperçu sur le molybdène et ses caractéristiques

Le molybdène (Mo) est un métal relativement peu répandu sur la terre, extrait du minerai, la molybdénite MoS_2 , sa masse volumique est de $10,22 \text{ g/cm}^3$, c'est un métal blanc argenté.

La température de fusion du Mo est la plus élevée après l'osmium, le rhénium, le tungstène et le tantale, elle est évaluée à 2623 plus ou moins 8°C , et une température d'ébullition de 4627 plus ou moins 20°C .

Il présente une bonne conductivité thermique et électrique. Il cristallise dans le réseau cubique centré (CC).

3.3.2. Propriétés mécaniques du Mo

- Son module d'élasticité: à 20°C320 000 MPa.
à 1500°C240 000 MPa.
à 2000°C160 000 MPa.
- Module de rigidité à 20°C120 000 MPa.
- Coefficient de compressibilité à 20°C0,35 Pa.
- Coefficient de poisson à 20°C0,32.

Pour ce qui est de la dureté, la résistance à la traction et la ténacité du Mo dépendent toutes de l'état initial :

- Brut de coulée ou de frittage.
- Ecroui.
- Restauré.
- Recristallisé.

Donc, la dureté du Mo est de 180 HV à l'état brut de coulée et de 270 HV par écrouissage. Sa résistance à la rupture par traction est de 300 jusqu'à 500 MPa pour une pièce brut de coulée, et de 2 000 MPa pour une pièce écrouie. La dureté du Mo projeté par flamme peut atteindre 400 à 850 HV suivant le taux d'oxydation [10]

Le Mo présente une bonne résistance à la corrosion par les acides non oxydants, car le Mo s'oxyde très rapidement dans l'air au dessus de 600°C , car la couche formée MoO_3 commence à se sublimer à cette température, donc, plus de couches protectrices formées à une température au dessous de 600°C [11]

3.3.3. Composition chimique du Mo utilisé

Le Mo qu'on a utilisé se compose de 97.48 % de Mo et de 2.52 % de Fe. La méthode utilisée pour la détermination de la composition chimique est la méthode EDAX (Analyse X dispersive en énergie) [11]

La macrodureté du fil du Mo de diamètre 2,5 mm tréfilé est de 298 HV.

C'est un fil obtenu par tréfilage.

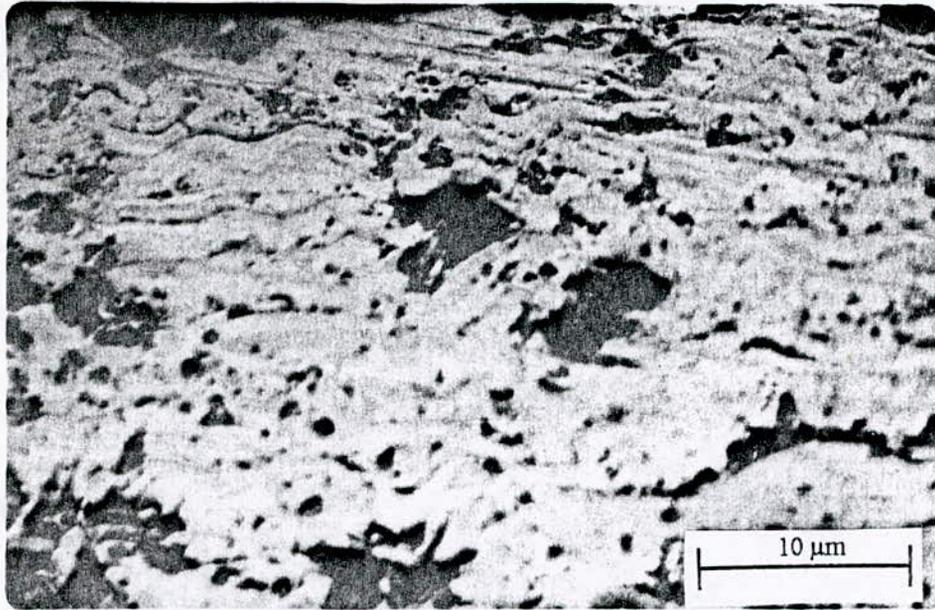


Fig 6 : Photo d'un dépôt du Mo.

3.4. Mise en oeuvre de la projection thermique

Avant de procéder à la métallisation on doit passer par des étapes de préparation des substrats à revêtir.

3.4.1. Découpage des échantillons

Après l'obtention des différentes matrices de fonte GSC réalisées par traitement thermique, on découpe un nombre suffisant d'échantillons de chaque matrice de forme cubique et cylindrique (éprouvette cylindrique)

Les sections des échantillons sont destinées à subir une métallisation à différentes épaisseurs sur lesquels des tests d'arrachement seront prévus, ainsi que des filiations de microdureté sur la coupe transversale.

3.4.2. Préparation des surfaces

La préparation des surfaces a été réalisée par deux techniques permettant d'avoir trois états de surface pour chaque matrice. Les techniques utilisées sont l'usinage et le sablage.

3.4.2.1. L'usinage

Cette préparation du substrat a été effectuée par le fraisage à différents paramètres de coupe (tableau 3). On s'est limité à deux états de surface avec deux paramètres de coupe pour chaque matrice. Après, on a mesuré la rugosité de chaque état de surface par un profilomètre.

Les paramètres de coupe et les rugosités des surfaces des différentes matrices sont représentés sur le tableau 3.

Va : vitesse d'avance en [mm/ min];

Vc : vitesse de coupe en [m/min];

Nc : vitesse de coupe en [t/min];

Ra : la rugosité de la surface.

surface	état de surface S ₁			Rugosité Ra (μm)	état de surface S ₂			Rugosité Ra (μm)
	Vitesse Va mm/min	Vc m/min	Nc t/min		Va mm/min	Vc m/min	Nc t/min	
Matrice ferritique	800	90	355	1.67	400	251	1000	0,78
Matrice ferrito-perlitique	800	90	355	1.67	400	251	1000	0,78
Matrice perlitique	800	125	500	1.53	250	251	1000	0,77

Tableau 3 : Etat de surface.

Il faut noter que pour les surfaces usinées, le temps entre l'usinage et la projection thermique ne doit pas dépasser deux heures, car on a risque de contamination, d'oxydation ou de corrosion, d'où présence d'impuretés (graisses, huiles...) ou des oxydes.

L'usinage doit être suivi par un nettoyage pour mieux enlever les impuretés et réaliser la projection juste après .

3.4.2.2. Le sablage

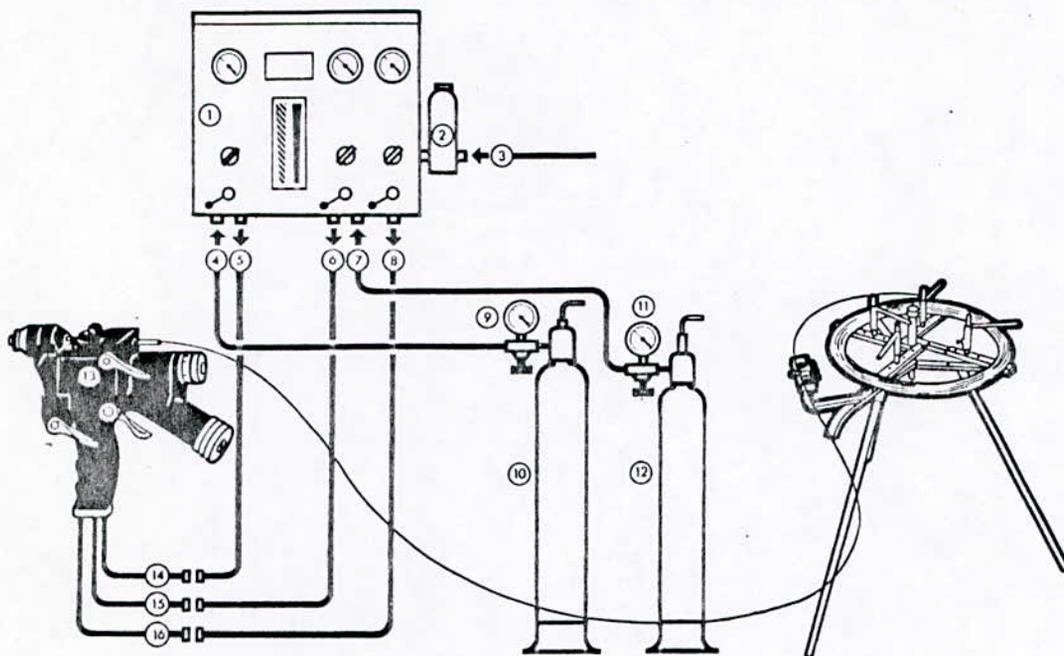
On introduit des pièces métalliques à l'intérieur d'une cabine orientée sous un jet de sable qui est véhiculé par pression d'air comprimé, et est projeté sur les surfaces à métalliser (annexe 3). Le sable circule à l'intérieur de la cabine en circuit fermé.

On obtient un état de surface assez rugueux. Cette rugosité a été mesurée et évaluée à 6,30 μm.

(Toutes les préparations ont été réalisées au CVI (SNVI)).

3.5. La Métallisation : (projection thermique à la flamme)

Pour réaliser le dépôt du molybdène sur les différents substrats des différentes matrices de la fonte GSC, on a utilisé le dispositif schématisé sur la figure 7.



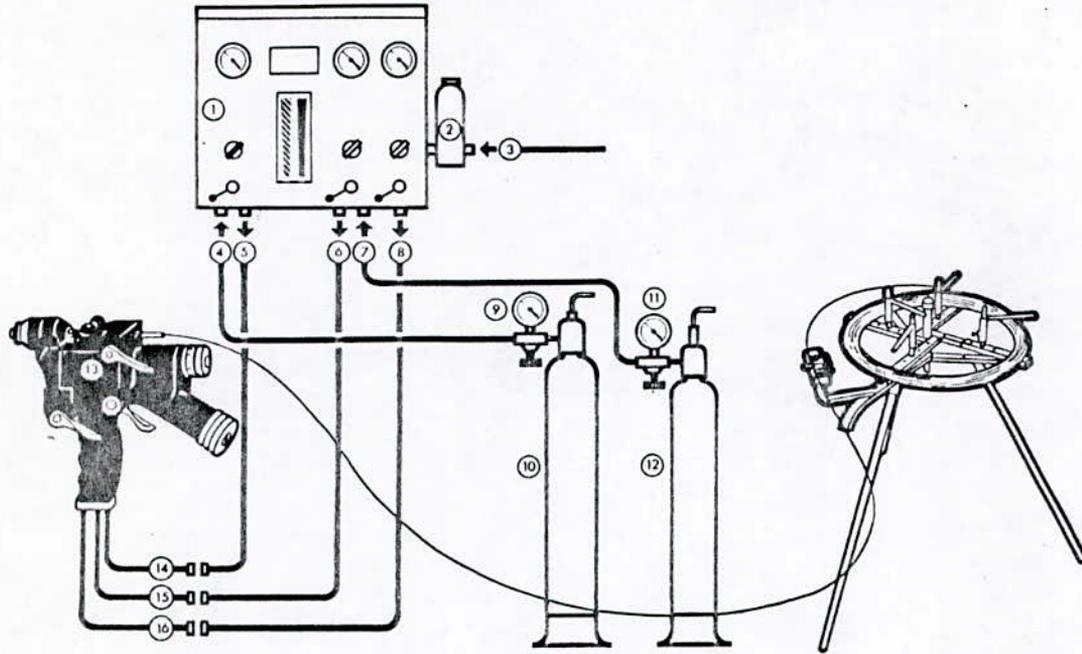
1. Tableau de réglage.
2. Epurateur d'air.
3. Arrivée d'air.
4. Raccord rapide d'arrivée d'oxygène.
5. Raccord rapide de sortie d'oxygène.
6. Raccord rapide de sortie acétylène.
7. Raccord rapide d'arrivée acétylène.
8. Raccord rapide de sortie air.
9. Manodétendeur d'oxygène - 1^{ère} détente.
10. Bouteille d'oxygène.
11. Manodétendeur d'acétylène - 1^{ère} détente.
12. Bouteille d'acétylène.
13. Pistolet métalliseur.
14. Raccord rapide d'oxygène au pistolet.
15. Raccord rapide d'acétylène au pistolet.
16. Raccord rapide d'air au pistolet.
17. Tuyauterie complète.

Fig 7 : Schéma de l'installation du matériel de métallisation.

Le poste de projection thermique représenté sur la figure 7 peut être utilisé aussi bien pour traiter des pièces exposées à diverses agressions (anticorrosion), que dans un

3.5. La Métallisation : (projection thermique à la flamme)

Pour réaliser le dépôt du molybdène sur les différents substrats des différentes matrices de la fonte GSC, on a utilisé le dispositif schématisé sur la figure 7.



1. Tableau de réglage.
2. Epurateur d'air.
3. Arrivée d'air.
4. Raccord rapide d'arrivée d'oxygène.
5. Raccord rapide de sortie d'oxygène.
6. Raccord rapide de sortie acétylène.
7. Raccord rapide d'arrivée acétylène.
8. Raccord rapide de sortie air.
9. Manodétendeur d'oxygène - 1^{ère} détente.
10. Bouteille d'oxygène.
11. Manodétendeur d'acétylène - 1^{ère} détente.
12. Bouteille d'acétylène.
13. Pistolet métalliseur.
14. Raccord rapide d'oxygène au pistolet.
15. Raccord rapide d'acétylène au pistolet.
16. Raccord rapide d'air au pistolet.
17. Tuyauterie complète.

Fig 7 : Schéma de l'installation du matériel de métallisation.

Le poste de projection thermique représenté sur la figure 7 peut être utilisé aussi bien pour traiter des pièces exposées à diverses agressions (anticorrosion), que dans un

atelier pour la réalisation des rechargements. Il peut être manuel ou bien automatisé. Les débits des fluides nécessaires à une telle installation sont les suivants :

- Gaz combustibles (acétylène), la pression utilisée est de 1 bar ;
- Gaz comburant (oxygène), la pression utilisée est de 1,6 bar;
- Air comprimé filtré, la pression utilisée est de 4 bar.

(Ces paramètres sont conçus pour le Mo seulement).

L'élément opérateur dans ce dispositif est le pistolet. Le type de pistolet utilisé est le pistolet à fil.

Le pistolet à fil se compose de deux parties, une partie où la combustion a lieu et une partie permettant l'entraînement du fil. Le matériau à projeter se déplace à travers une buse ou il sera fusionné . La combustion du gaz se fait à l'aide d'une flamme et provoque la fusion du fil qui sera projeté, à l'aide de l'air comprimé, sur le substrat sous forme de gouttelette.

Les épaisseurs des dépôts qu'on a réalisé sont 20 μm , 100 μm , 300 μm , pour chaque état de surface de chaque matrice, le nombre d'échantillon effectués est 27.

3.6. Contrôle des dépôts

Lors de la réalisation d'un dépôt, on s'intéresse à trois paramètres essentiels.

- L'épaisseur du dépôt (dans le cas d'une épaisseur importante, on a un risque d'écaillage du dépôt) ;
- Qualité du dépôt (porosité, dureté) ;
- L'adhérence (qui est fonction de l'état de surface du substrat).

Une fois la métallisation réalisé, on procède au contrôle des dépôts obtenus, pour mettre en évidence les paramètres déjà évoqués

3.6.1. Préparation des échantillons

Les échantillons ont été découpés et enrobés, puis polis à différents papiers abrasifs (100, 180, 320, 1000), pour la finition, on a utilisé le feutre avec une pâte diamètre de 6 μm de diamètre. Après lavage et séchage, les échantillons ont subis une attaque chimique à l'aide d'un réactif au nital de composition chimique :

$$\begin{aligned}\text{Volume de HNO}_3 &= 5 \text{ cm}^3 \\ \text{Volume de CH}_3\text{CH}_2\text{OH} &= 95 \text{ cm}^3\end{aligned}$$

La durée de l'attaque est de 10 secondes en moyenne.

L'attaque chimique est utilisée dans le but d'identifier les différentes matrices par rapport au dépôt.

3.6.2. Analyse micrographique

L'analyse micrographique a été effectuée à l'aide d'un microscope optique « AXIOMAT. ZEISS » à différents grossissements (100, 250, 500, 1000).

Pour mettre en évidence les contrastes interfaciaux (substrat-dépôt), on a fait une prise de photo sur la coupe transversale des échantillons (Fig 8a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l) pour un grossissement 250.

Cette analyse micrographique nous a permis de faire quelques premières remarques sur la qualité du dépôt (porosité, épaisseur, adhérence).

Epaisseur = 20 μm

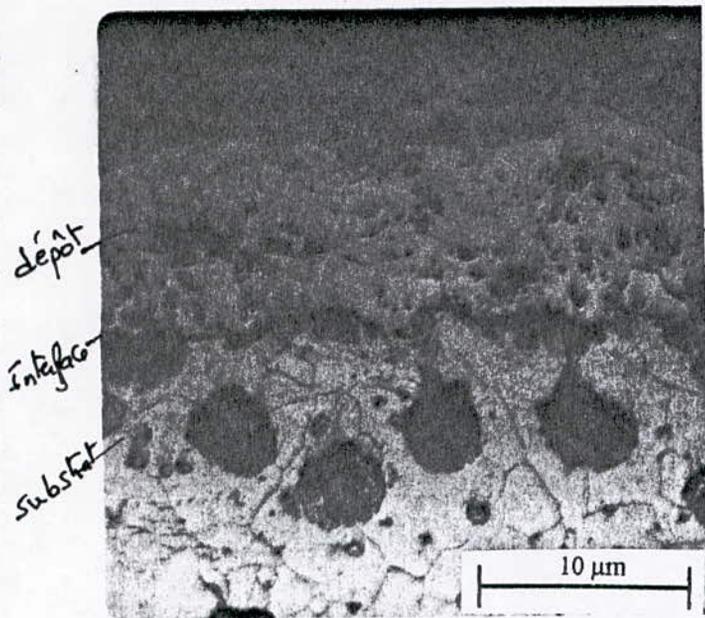


Fig 8 a : Matrice ferritique
Sablage, Ra = 6.29.

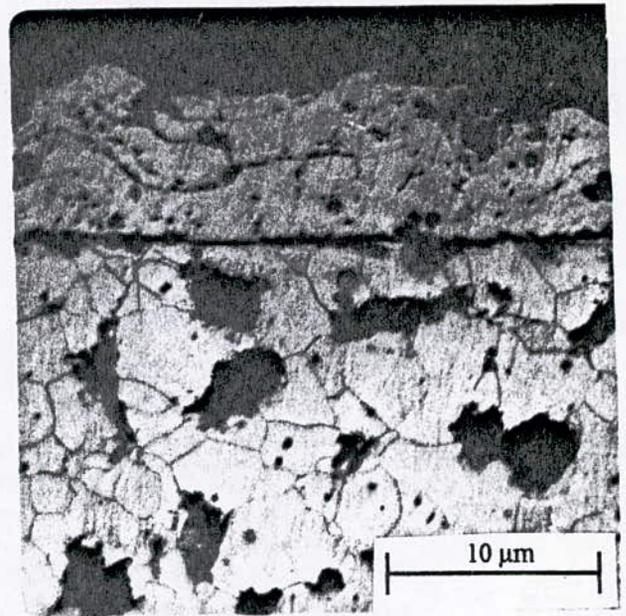


Fig 8 b : Matrice ferritique
Usinage, Ra = 1.67.

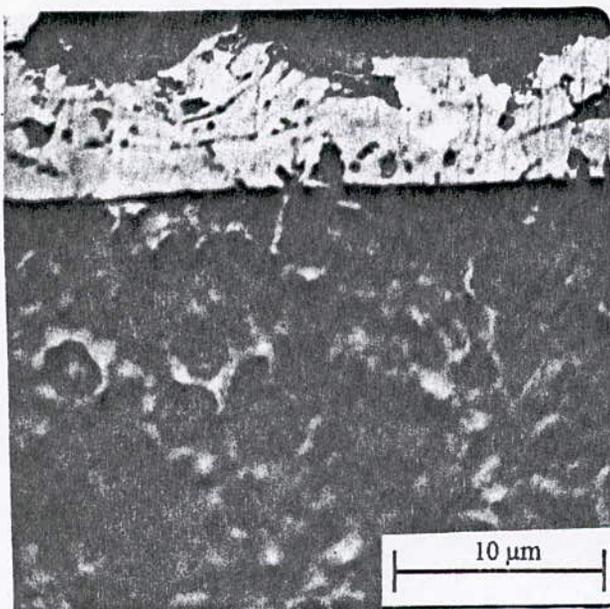


Fig 8 c : Matrice perlitique
Usinage, Ra = 1.53.

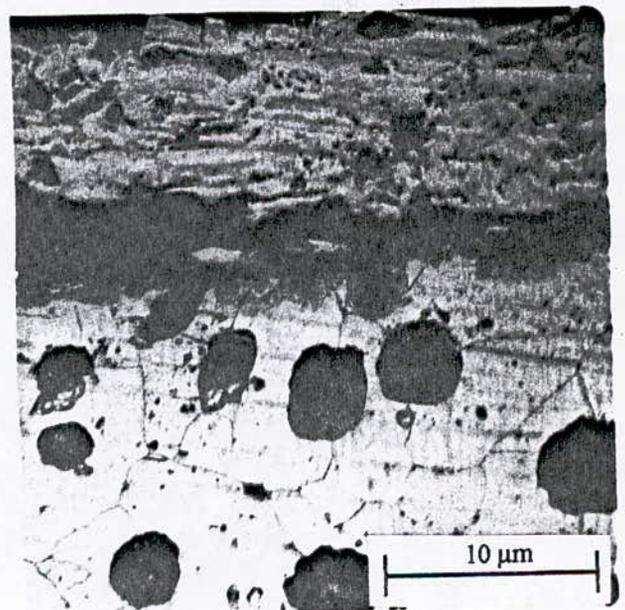


Fig 8 d : Matrice ferritique
Usinage, Ra = 0.78.

Epaisseur = 100 μm

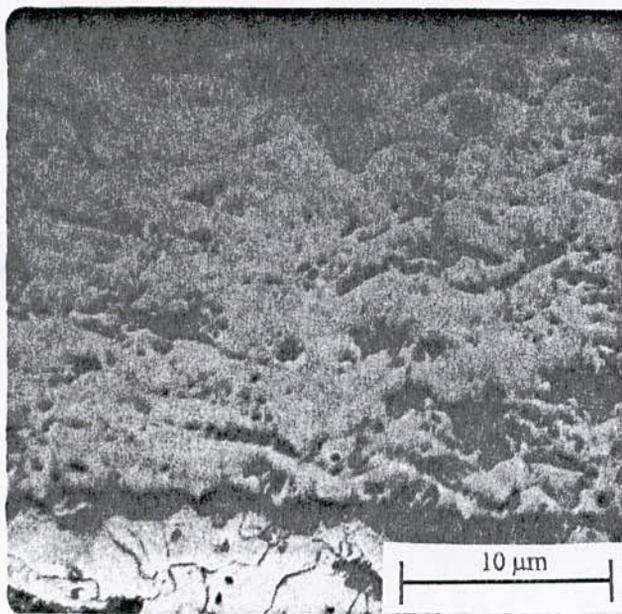


Fig 8 e : Matrice ferritique
Sablage, Ra - 6.29.

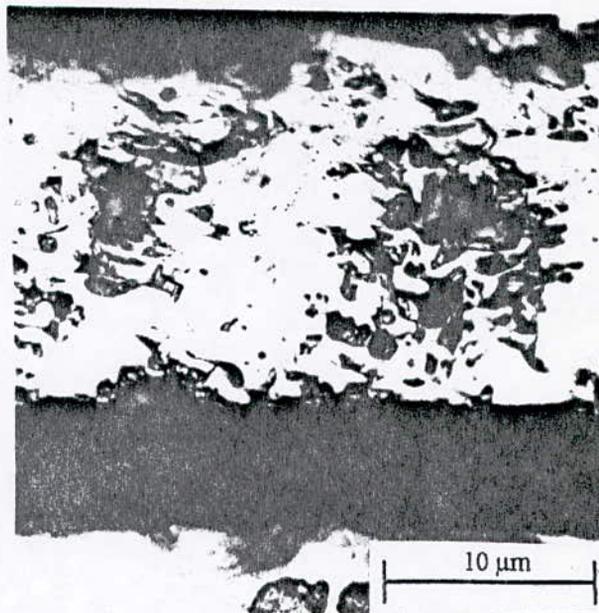


Fig 8 f : Matrice ferrito-perlitique
Usinage, Ra - 0.78.

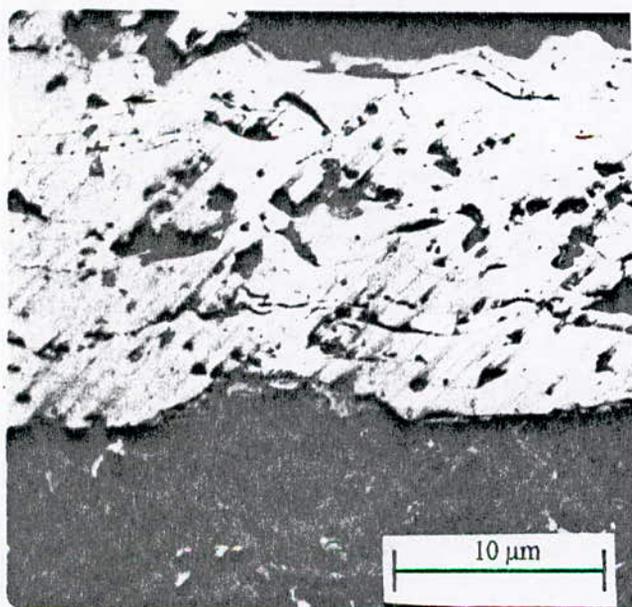


Fig 8 g : Matrice perlitique
Usinage, Ra = 1.53.

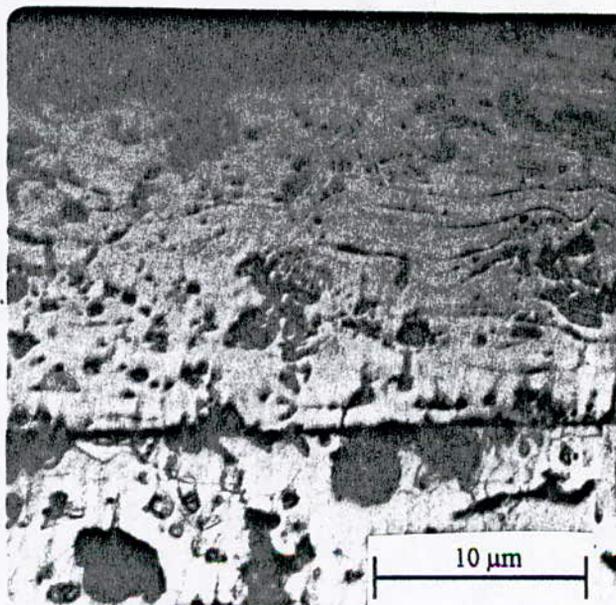


Fig 8 h : Matrice ferritique
Usinage, Ra = 1.67.

Epaisseur = 300 μm

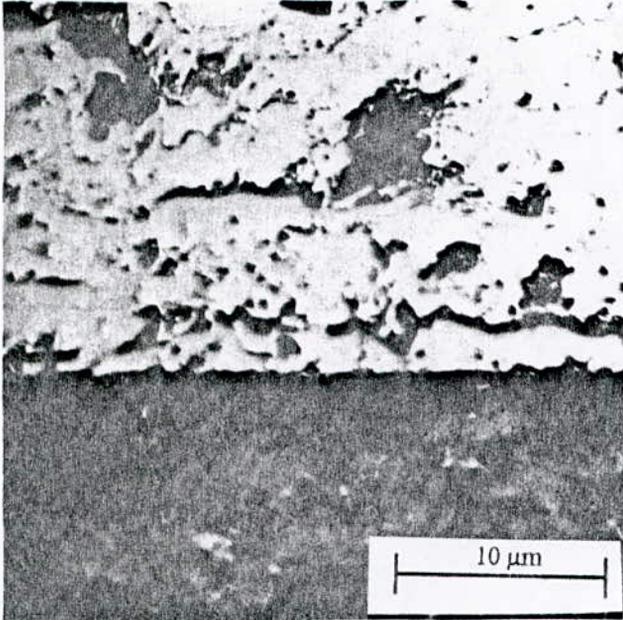


Fig 8 i : Matrice perlitique
Usinage, $R_a = 1.53$.

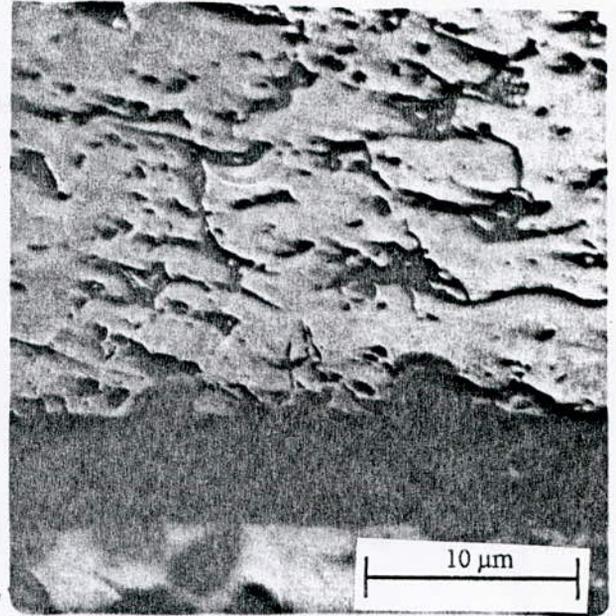


Fig 8 j : Matrice ferrito-perlitique
Usinage, $R_a = 0.78$.

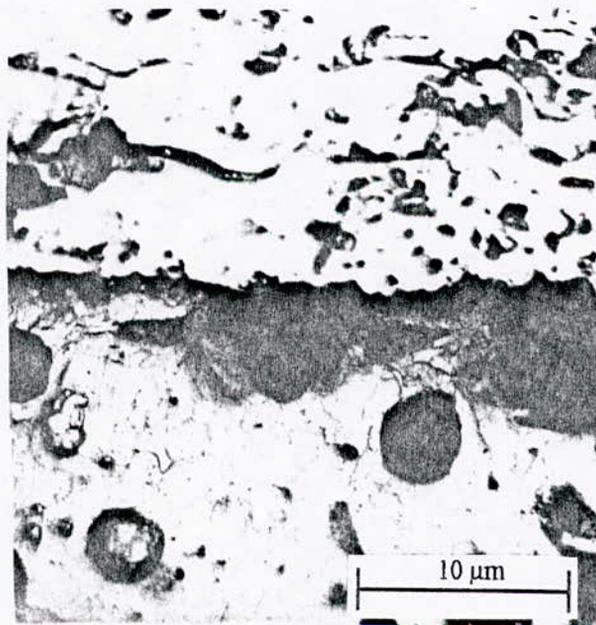


Fig 8 k : Matrice ferrito-perlitique
Sablage, $R_a = 6.29$.

Épaisseur = 300 μm

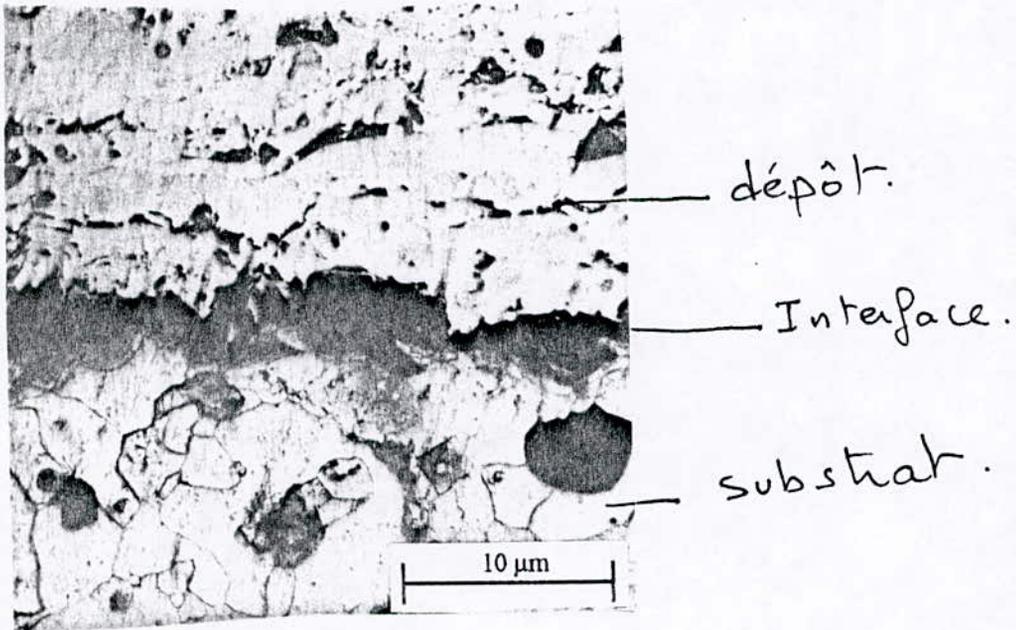


Fig 8 l : Matrice ferritique
Sablage, Ra = 6.29.

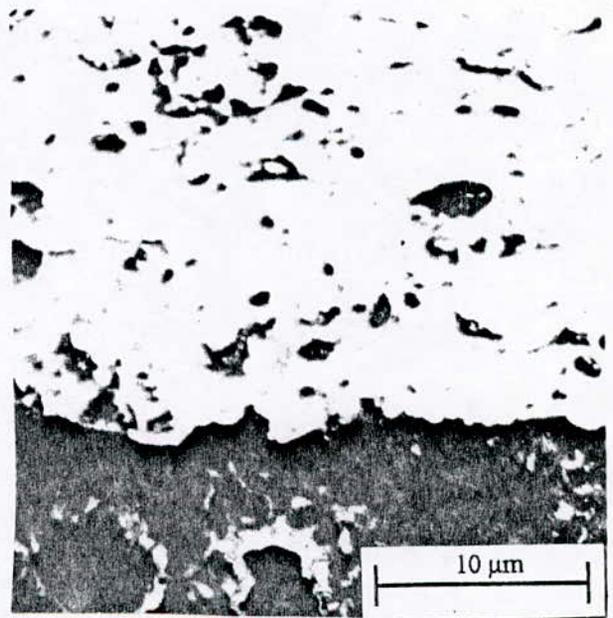


Fig 8 m : Matrice perlitique
Sablage, Ra = 6.29.

3.6.3. Densité du dépôt

Après une observation au microscope optique, on a remarqué la présence des porosités dans le dépôt (Figure 9).

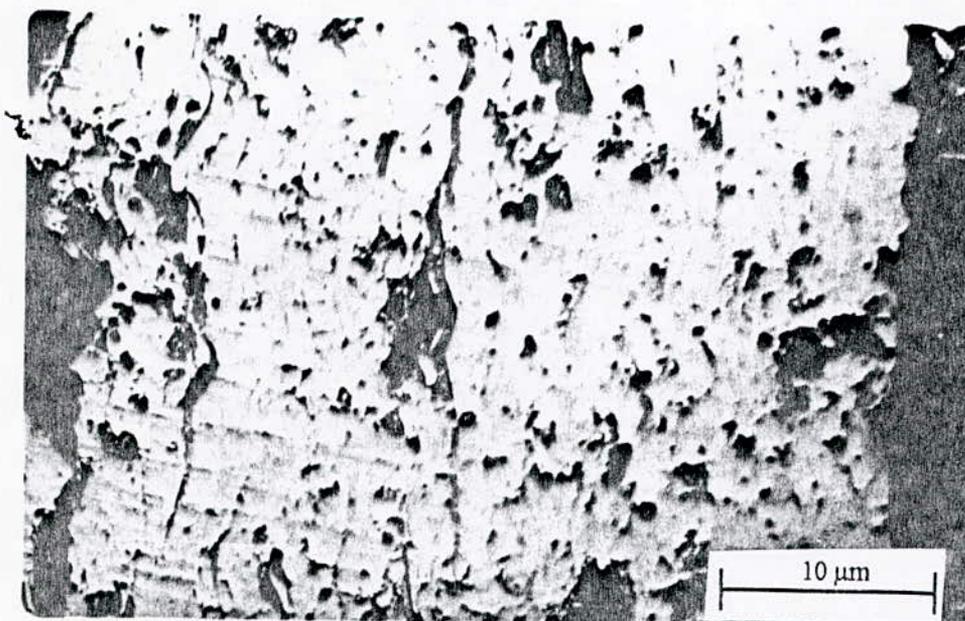


Fig 9-a: Photo 1.

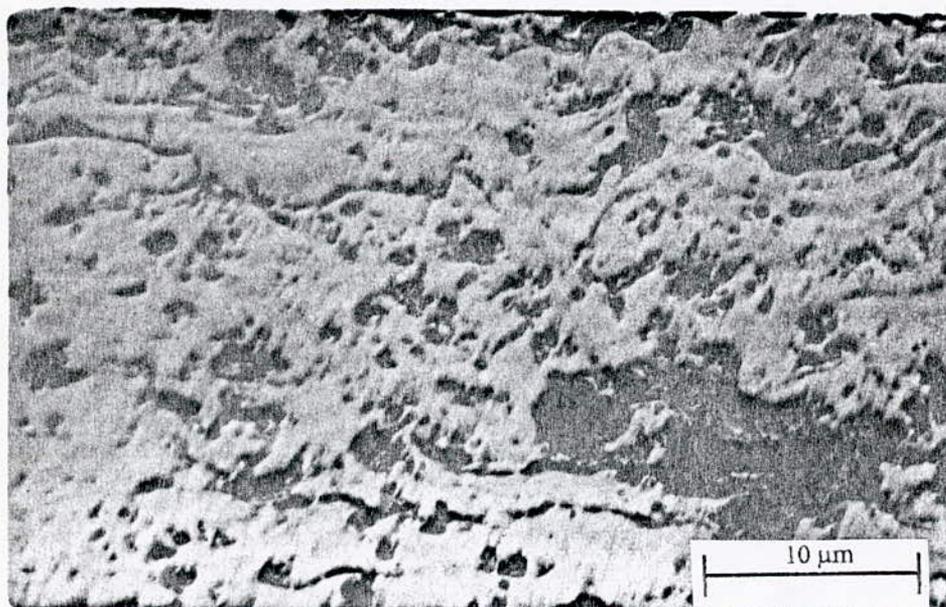


Fig 9-b : Photo 2.

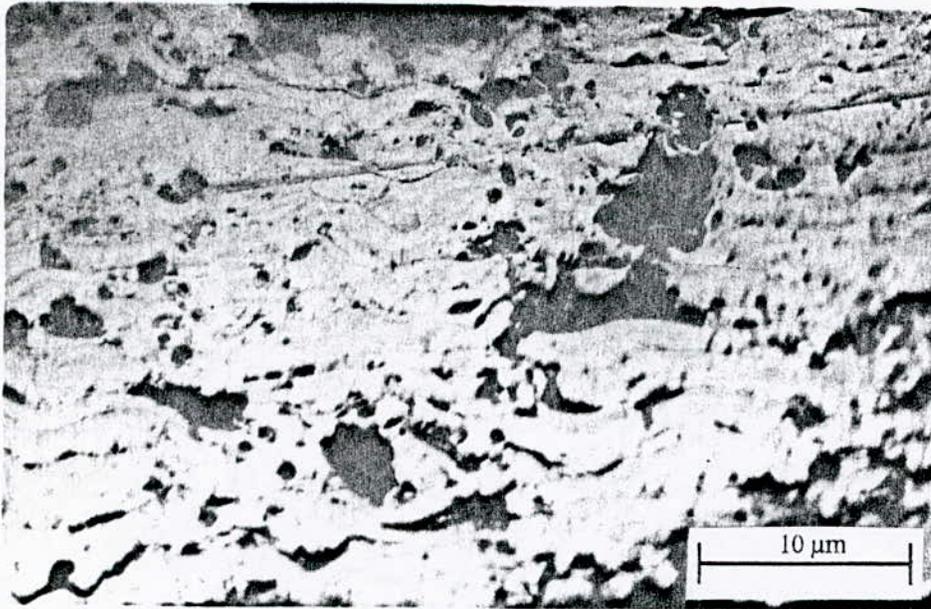


Fig 9-c : Photo 3 .

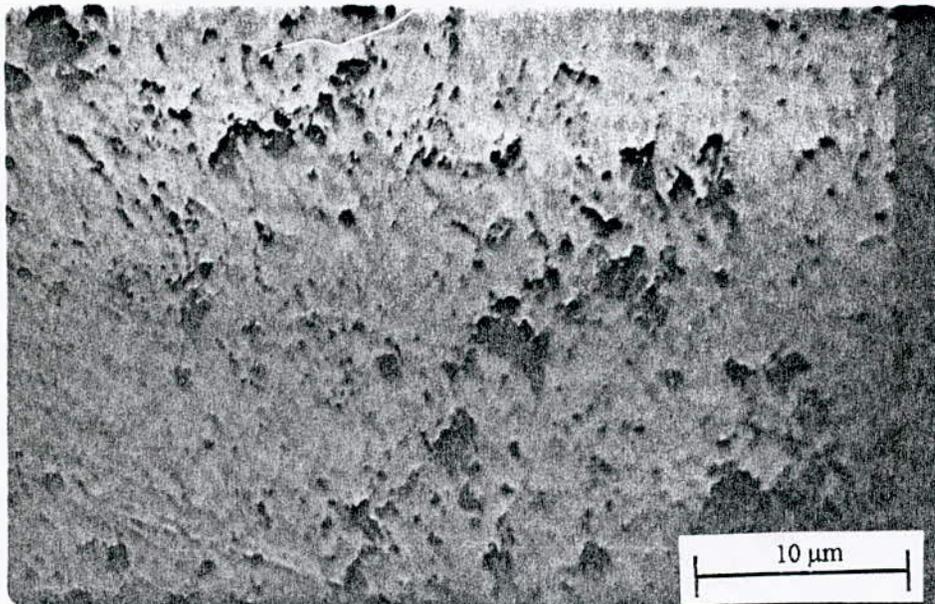


Fig 9-d : Photo 4.

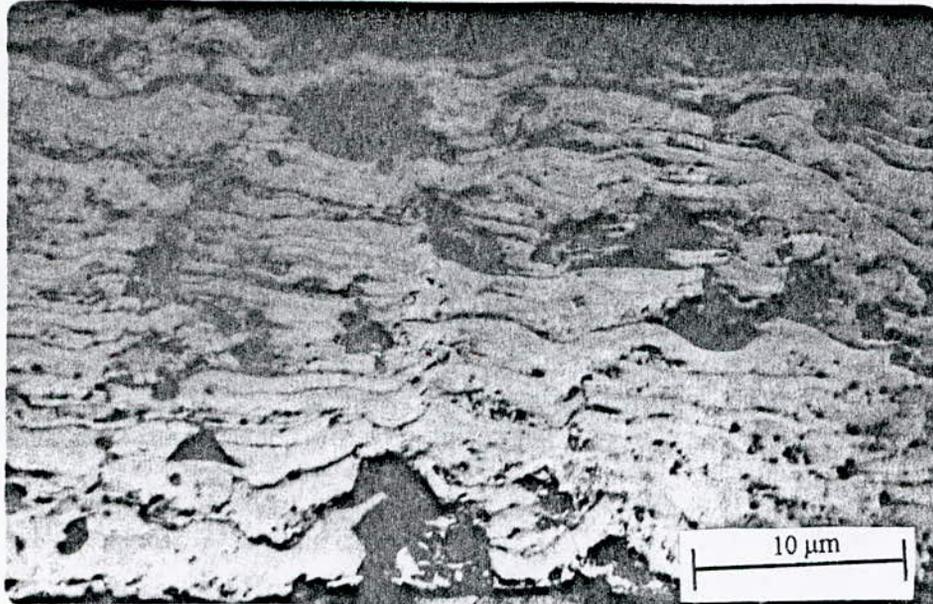


Fig 9-e : Photo 5.

Le nombre de porosité diffère d'une photo à une autre, ainsi, on a opté pour effectuer une analyse quantitative.

Le principe est de mettre une grille de 5x5 mm² (figure 10) sur une photo représentant le dépôt, et de compter le nombre de noeud coïncidant avec des pores(n_p), et à partir du nombre total des noeuds (n_T) on calcule le pourcentage (%) des pores dans chaque dépôt d'après la règle suivante.

$$\% x_p = n_p / n_T \cdot 100 .$$

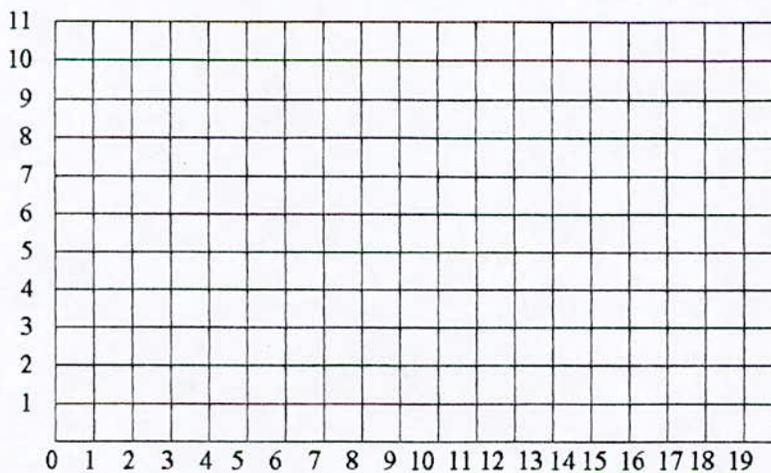


Fig 10 : Grille d'analyse quantitative.

n° de photo	n_p	n_T	% x_p
1	34	315	10.79
2	71	360	19.72
3	55	360	15.27
4	27	345	7.82
5	53	336	15.77

Tableau 4 : Analyse quantitative des porosités.

3.6.4. Adhérence du dépôt

Pour voir si l'adhérence du dépôt est assez importante, on a opté pour un test d'arrachement dans le but d'estimer la contrainte maximale d'arrachement. La colle utilisée est N200 adhésive.

Pour cela, on a utilisé des éprouvettes de 50 mm de long et de 8 mm plus ou moins un de diamètre avec un dépôt de 0.5 mm sur la section de l'éprouvette (figure 9).

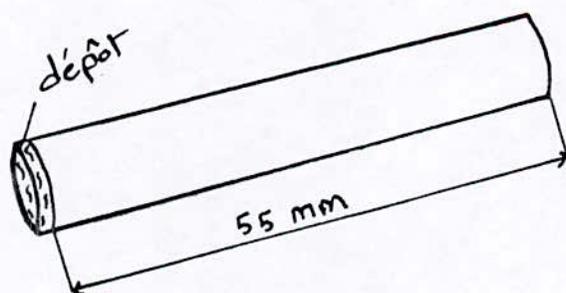


Fig 9 : Eprouvette de traction.

Le principe est de coller une éprouvette (1) avec un dépôt de Mo à une éprouvette (2) sans dépôt, et à l'aide d'une machine de traction on voit si le dépôt va céder ou pas, et on prélève la charge d'arrachement du dépôt (figure 10).

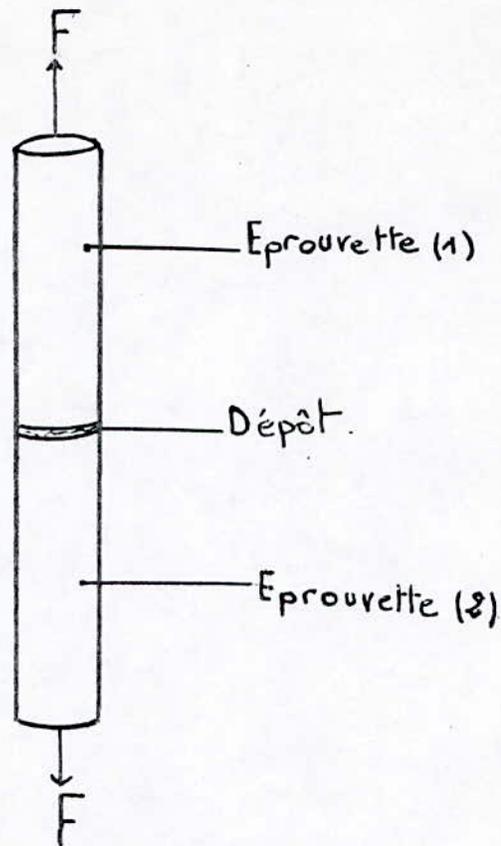


Fig 10 : Essai d'arrachement du dépôt.

Notre choix d'échantillon est tombé sur ceux qui ont ^{représente} une bonne interface (après observation au microscope), et ceux qui ont une épaisseur importante (300 μm) réalisés sur des surfaces sablées.

Le test, après plusieurs essais, a donné les résultats suivants (tableau 5).

Matrice	Charge (daN)	Contrainte (daN/ mm ²)	Contraintes moyenne (daN/ mm ²)	Charge moyenne (daN)
Ferrito-perlitique	71.10	1.39	1.38	70.23
	69.50	1.41		
	70.10	1.36		
Perlitique	66.50	1.33	1.34	67.20
	68.10	1.36		
	67.00	1.34		
Ferritique	71.50	1.43	1.43	71.53
	72.00	1.44		
	71.10	1.42		

Tableau 5 : Charges et contraintes d'arrachement.

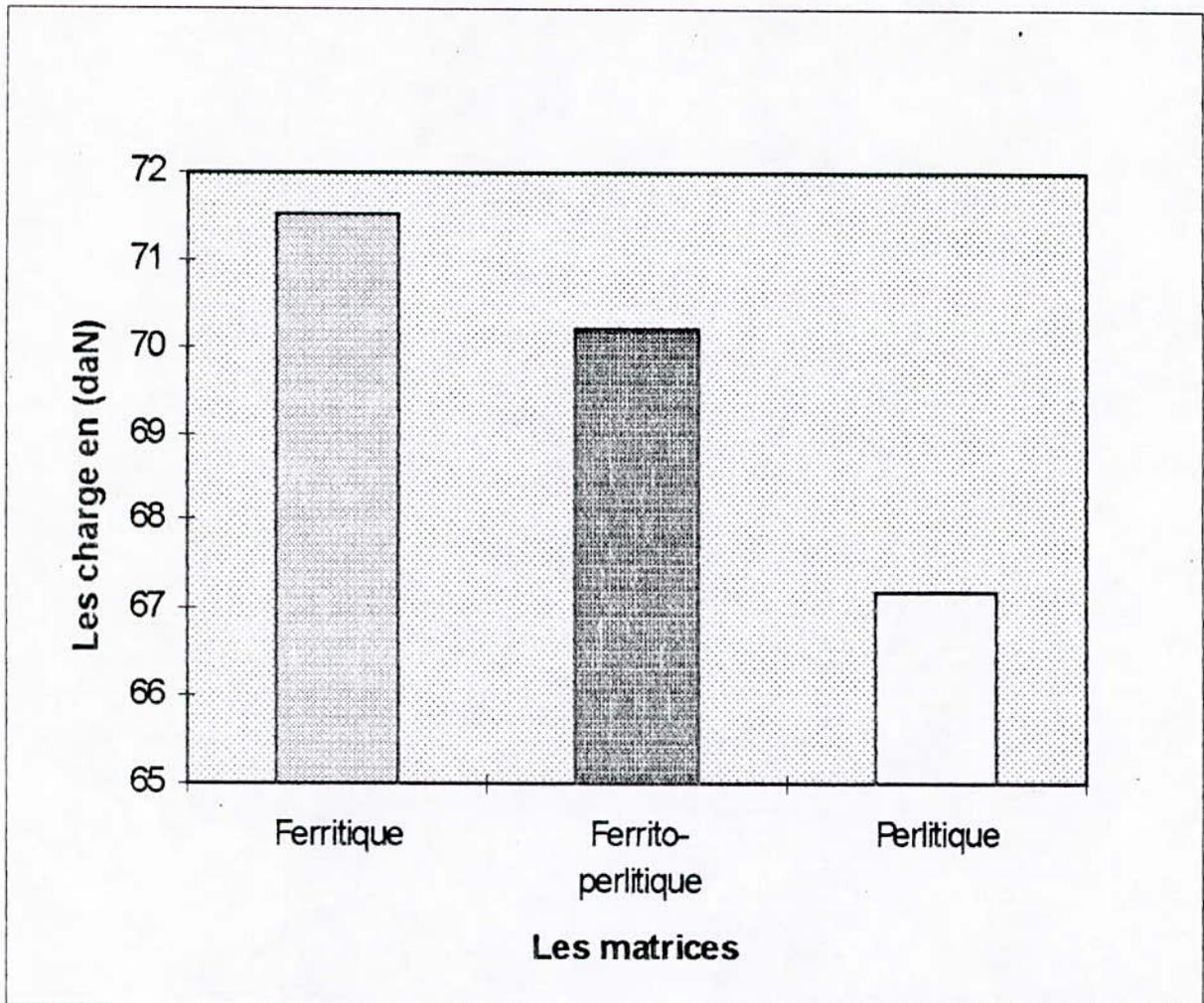


Fig 12 : Variation de la charge d'arrachement en fonction des matrices

3.6.5. Microdureté

On a opté pour faire une filiation de microdureté VICKERS à travers le dépôt et le substrat en passant par l'interface.

L'épaisseur du dépôt est assez faible pour effectuer une dureté BRINELL ou ROKWELL et même une macrodureté VICKERS, car le diamètre des empreintes est important, donc, on risque de ne pas avoir les vraies résultats.

Lors de la mesure de la microdureté, évidemment, on a évité les porosité dans le dépôt et le graphite dans le substrat.

Techniques expérimentales et résultats

Les échantillons, choisis pour la réalisation de la filiation de la microdureté VICKERS, ont une épaisseur de 300 μm et une rugosité $R_a = 6.29 \mu\text{m}$ réalisé sur les trois différentes matrices. Les résultats obtenus sont illustrés sur le tableau 6.

X(μm)	matrices	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
HV	F*	644	683	655	662	646	649	180	182	170	176	-
	FP*	670	681	674	683	669	220	227	192	207	-	-
	P*	682	677	683	679	673	678	668	252	249	254	248

Tableau 6 : Filiation de la microdureté.

X (μm) est la distance entre la surface du dépôt et l'empreinte.

La distance entre deux empreintes est 50 μm , la charge utilisée pour la microdureté est de 200 g.

A partir des résultats obtenus on a pu tracer les courbes représentées sur la figure 12.

F* : matrice ferritique.

FP* : matrice ferrito-perlitique.

P* : matrice perlitique.

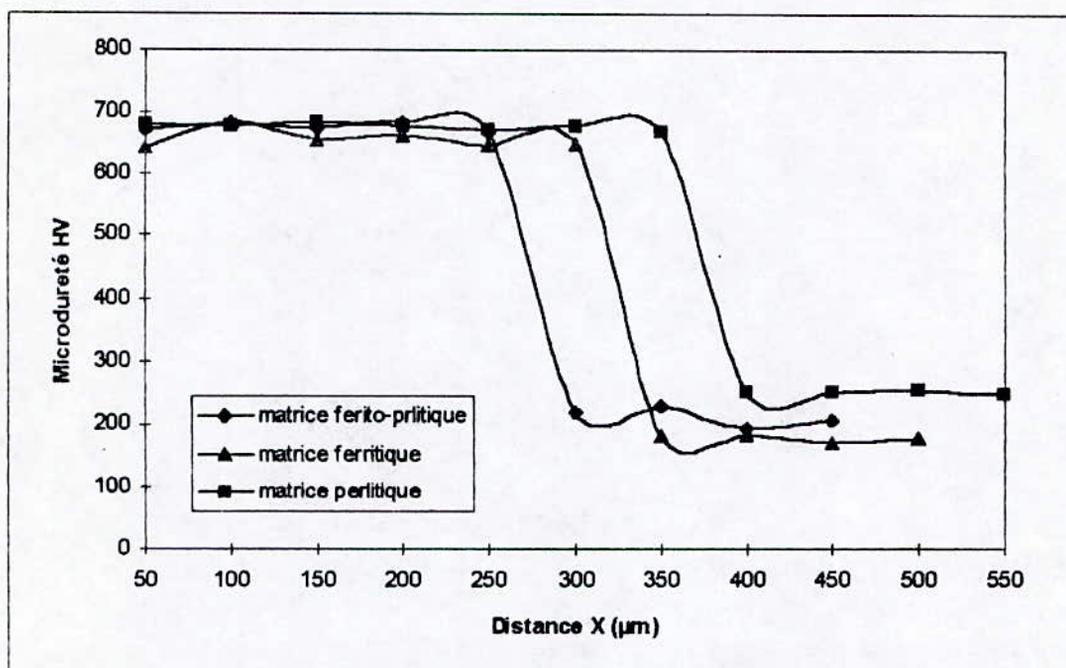


Fig 13 : Filiation de la microdureté.

INTERPRETATION GENERALE

4. Interprétation générale

4.1. Analyse micrographique

a - Après une observation au microscope optique, on a pu constater que l'adhérence du dépôt était meilleure pour les surface sablées de rugosité $R_a = 6.29 \mu\text{m}$. Par contre, les surfaces usinées de rugosité $R_a = 1.67 \mu\text{m}$ et $R_a = 1.53 \mu\text{m}$ l'adhérence est moyenne. Pour les surfaces usinées de rugosité $R_a = 0.78 \mu\text{m}$ l'adhérence est mauvaise. (Figure 8).

b - L'épaisseur du dépôt varie entre $20 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$ et $300 \mu\text{m}$. Les épaisseurs $20 \mu\text{m}$ et $100 \mu\text{m}$ sont à éviter car ces deux épaisseurs sont insuffisantes d'un côté pour couvrir toute la surface dans le but de la protéger totalement, d'un autre côté, la surface du dépôt exige une rectification après projection d'où diminution de l'épaisseur. Dans ces cas le dépôt ne joue pas le rôle demandé par le réalisateur ou l'utilisateur. Par contre, l'épaisseur $300 \mu\text{m}$ est une épaisseur assez suffisante pour la protection de tout le substrat.

c - La porosité dans les dépôts varie d'un dépôt à un autre, cela est dû à la vitesse des passe lors de la métallisation. Le revêtement se fait passe après passe (un va et vient du pistolet) d'où une réalisation d'une structure stratifiée (figure 9). Si la vitesse de la passe est grande, on a risque de non balayage de toute la surface, quelques parties de la surface resteront vides, et lors de la prochaine passe, les espaces laissés ne seront pas remplis. Par contre, si la vitesse est faible, la surface a tout le temps pour se couvrir après chaque passe car le Mo fusionné arrive en gouttelette sur la surface (c'est un liquide discontinu).

4.2. Densité du dépôt

D'après les résultats obtenus la porosité varie entre 7 et 20 pores, pour un grossissement de 250 fois. On remarque que la distribution des pores est aléatoire. le nombre de ces pores dépend^{de} la vitesse de projection et de la distance.

4.3. Arrachement du dépôt

D'après les résultats obtenus on a remarqué que les charges utilisées sont assez importantes pour les trois matrices, ce qui nous confirme la bonne adhérence du dépôt, seulement, on remarque une différence entre les trois charges moyennes des différentes matrices. Pour la matrice ferritique, la charge est légèrement importante que celle de la matrice ferrito-perlitique, et la matrice perlitique, cela est dû, d'un côté, à la rugosité du substrat, et d'un autre côté, aux cavités laissées après la détérioration du graphite.

Le nombre des sphéroïdes du graphite varie entre les trois matrices . Il est plus important dans une matrice ferritique que dans une matrice ferrito-perlitique et encore moins dans une matrice perlitique.

Lors de la préparation des substrats avant projection, le graphite qui se trouve en surface est arraché par la force d'éjection du sable en laissant des cavités qui vont être remplies par le dépôt en épousant la forme, ce qui donne une adhérence meilleure.

4.4. Filiation de la microdureté

La dureté du dépôt est nettement supérieure à celle du substrat, ceci est mis en évidence par le tableau 5. Ainsi, on peut affirmer que le dépôt du Mo est utile par les nouvelles propriétés mécaniques permettant une meilleure résistance (640 HV) sans que l'épaisseur ne soit importante, sinon cela provoquerait un écaillage.

CONCLUSION

Conclusion

Notre travail, qui est une étude comparative du revêtement au Mo par métallisation sur différentes matrices de fonte GSC, nous a permis de tirer quelques conclusions, concernant la technique de métallisation et le dépôt lui-même.

- Pour fixer la vitesse des passes, ^{et savoir s'il y a des porosités ou des oxydes dans le dépôt} des analyses plus poussées, tel que la diffraction des RX et la microanalyse sont indispensables pour nous informer au mieux sur la qualité du dépôt.

- Aussi, automatiser le dispositif de projection est nécessaire pour mieux contrôler la vitesse ainsi que les autres paramètres tel que la distance de projection et la pression des gaz, ce qui va nous permettre d'assurer la même structure et densité pour chaque dépôt réalisé.

- L'automatisation du dispositif de projection permet également d'éviter un post-traitement qui diminuerait les porosités, qui se traduit par une économie de l'énergie et une amélioration de la qualité.

- Pour ce qui est du dépôt, on a conclu que réaliser des dépôts sur des surfaces usinées est à éviter à cause de la mauvaise adhérence due à la faible rugosité. L'épaisseur doit être comprise entre 0.3 et 2.5 mm. Plus la rugosité est grande, plus l'adhérence est importante.

- Vu que la dureté du dépôt est trois fois plus grande que celle du substrat, le dépôt a, donc, une tenue trois fois plus grande, d'où un test d'usure s'impose, sur tout pour les dépôts denses.

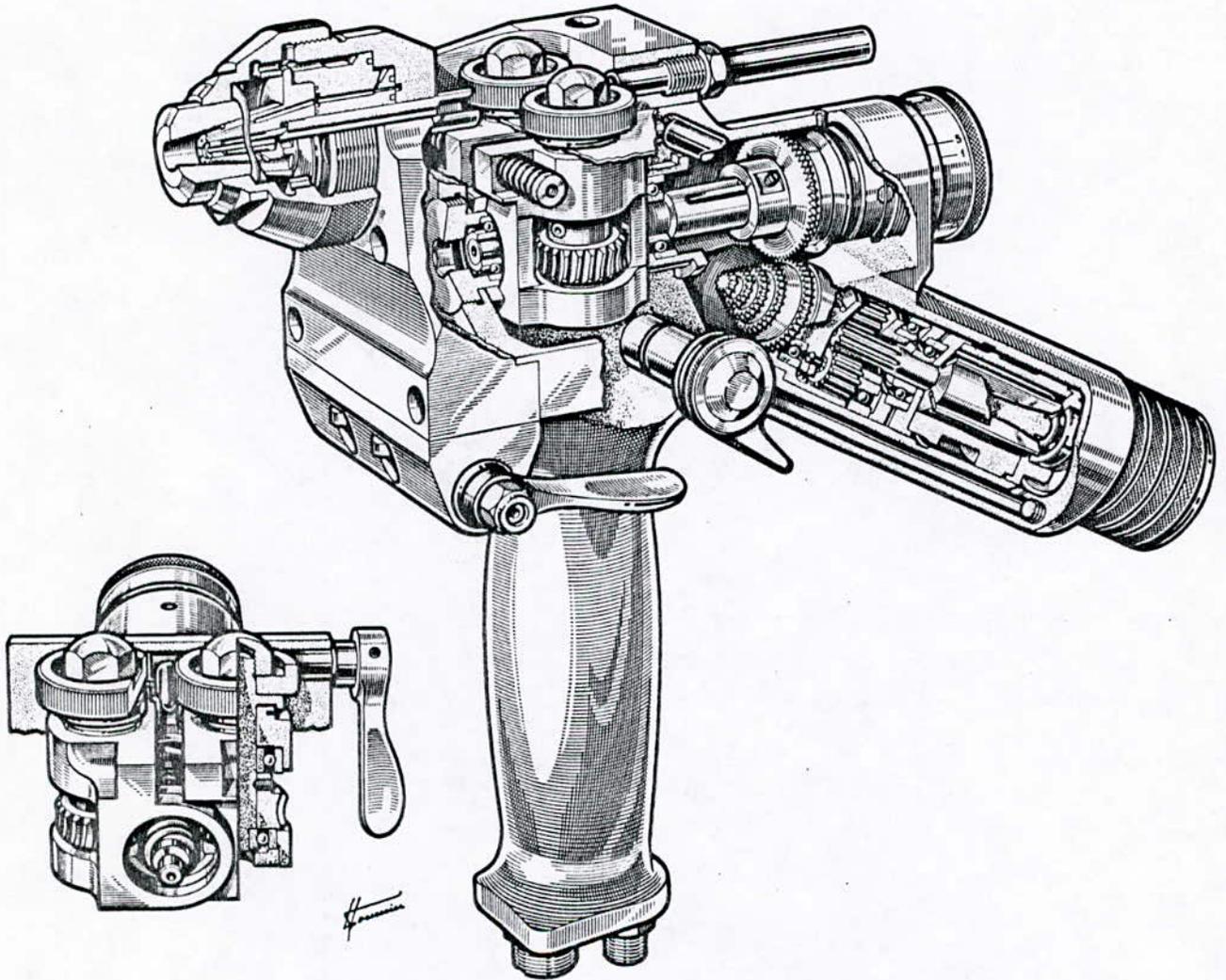
- Il est préférable de réaliser des revêtements sur des matrices ferrito-perlitique, pour éviter les traitements de ferritisation et de perlitisation, car c'est la matrice intermédiaire des deux autres du point de vue économique, du point de vue technique, il est préférable de réaliser des revêtements sur des matrices ferritiques car on a une meilleure adhérence.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

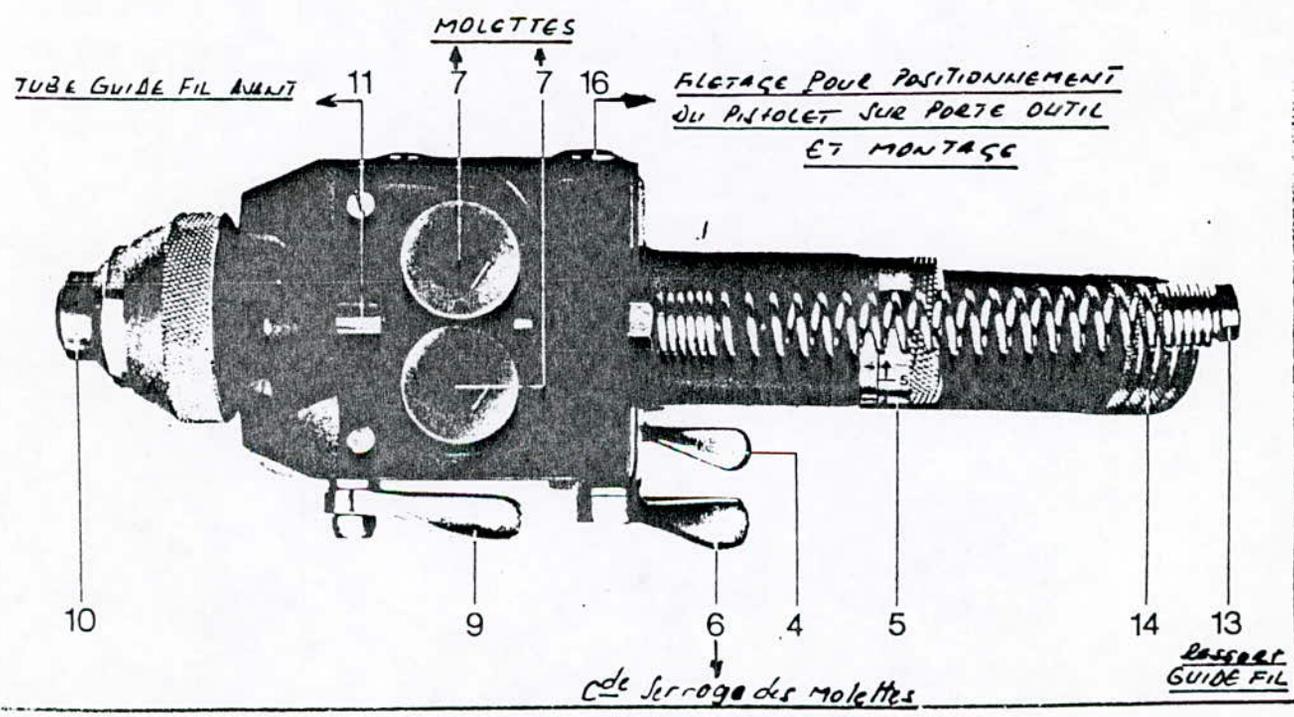
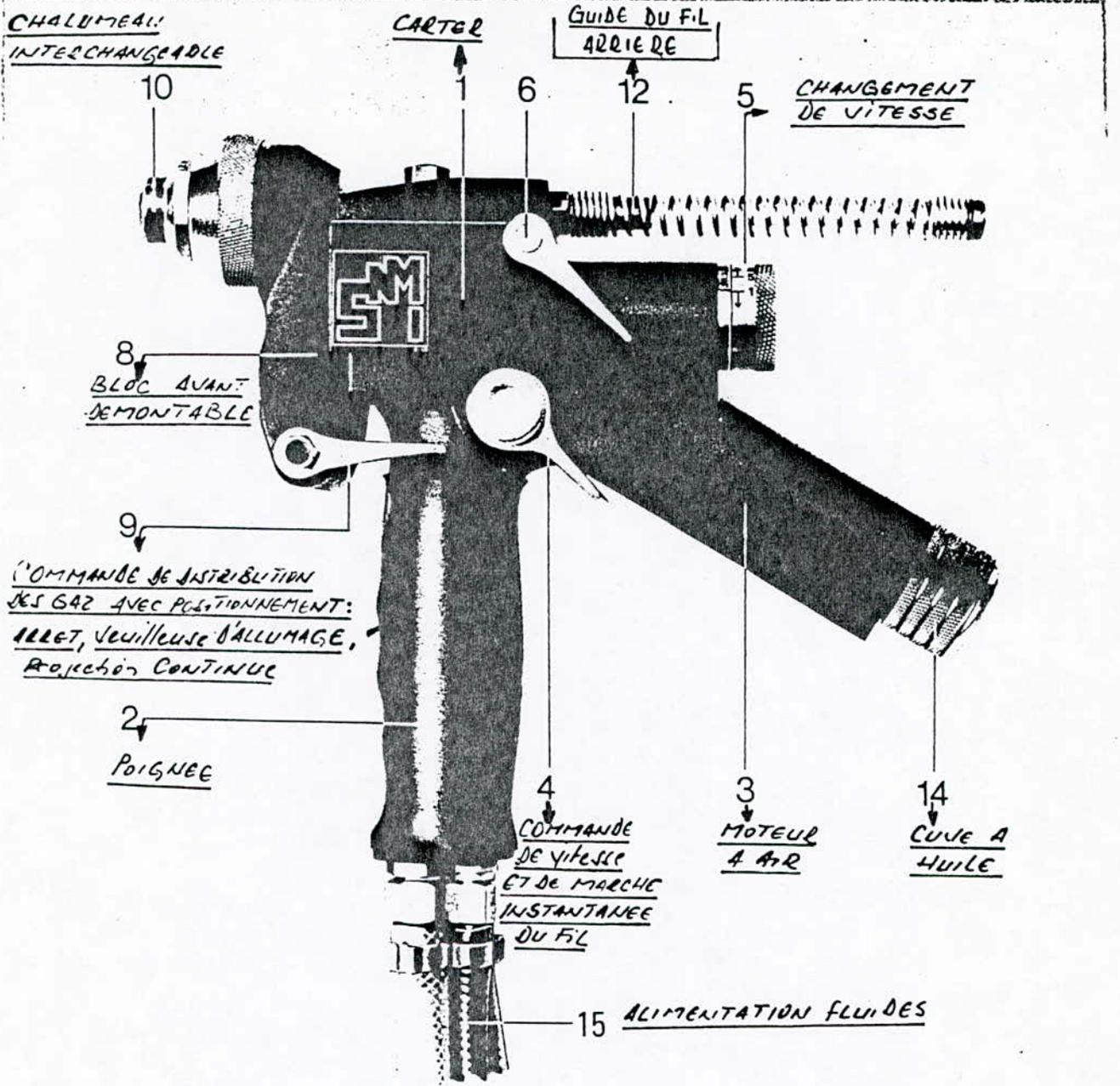
Références bibliographiques

- [1] : **AFTS & ATTT**
« Interaction traitements thermiques, traitements de surface », page 26, 28,
Paris 25-26 mars (1992).
- [2] : **B. AGIUS M. FROMENT**
« Surfaces, interfaces et films minces, observation et analyse ». Collection Dunod.
Page 9.
- [3] : **DJIDJELI Abdellaoui** : PFE.
« Etude métallographique des fontes grises à graphite sphéroïdal ». Page 22.
- [4] : **DJOUGUI Hamid, MAKMOUK Lies** :PFE.
« Optimisation des recuits et influence des paramètres d'usinage sur la fonte
GSC ». Page 8, (1996). *Proposé par M. E. SALHI.*
- [5] : **DE SY Albert & J. Vidts**
« Traité de métallurgie structurale théorique et appliquée ».
- [6] : **L. HADDOUR** : PFE.
« Comportement au frottement d'un multimatériau type 35 CD4 / 75E / 55E-65E
réalisé par projection thermique ». Page 44.
- [7] : **KHIAT Slimane** :Memoire de fin de stage
« Etude du procédé de métallisation et amélioration de la qualité des fourchettes »
Page 13,14,15,25,26,30,31,33, (1994), SNVI.
- [8] : **E. SALHI** :
« Substitution pièces acier par fontes GS ». Page 4,14,15, (1996), SNVI.
- [9] : **Société nouvelle de métallisation** :
« La métallisation en mécanique ». Paris, 4^{ème} édition . T 10.
- [10] : **Technique de l'ingénieur** :
« Revêtement par projection des métaux » . M 1645.
- [11] : **Technique de l'ingénieur** :
« propriétés du Mo et des alliages a base du Mo ». M565.
- [12] : **Technique de l'ingénieur** :
« Métallisation par projection ». M1641.

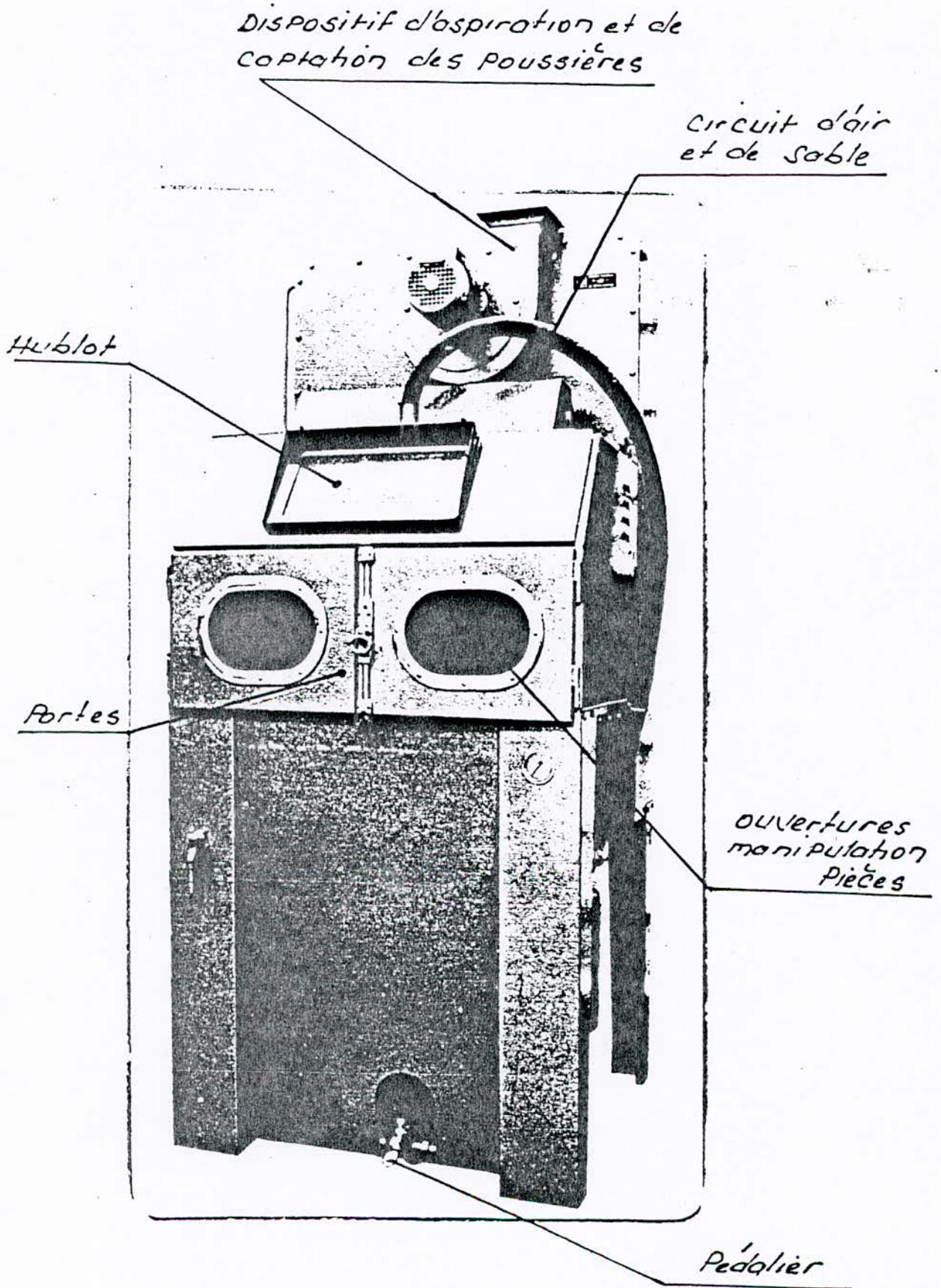
ANNEXES



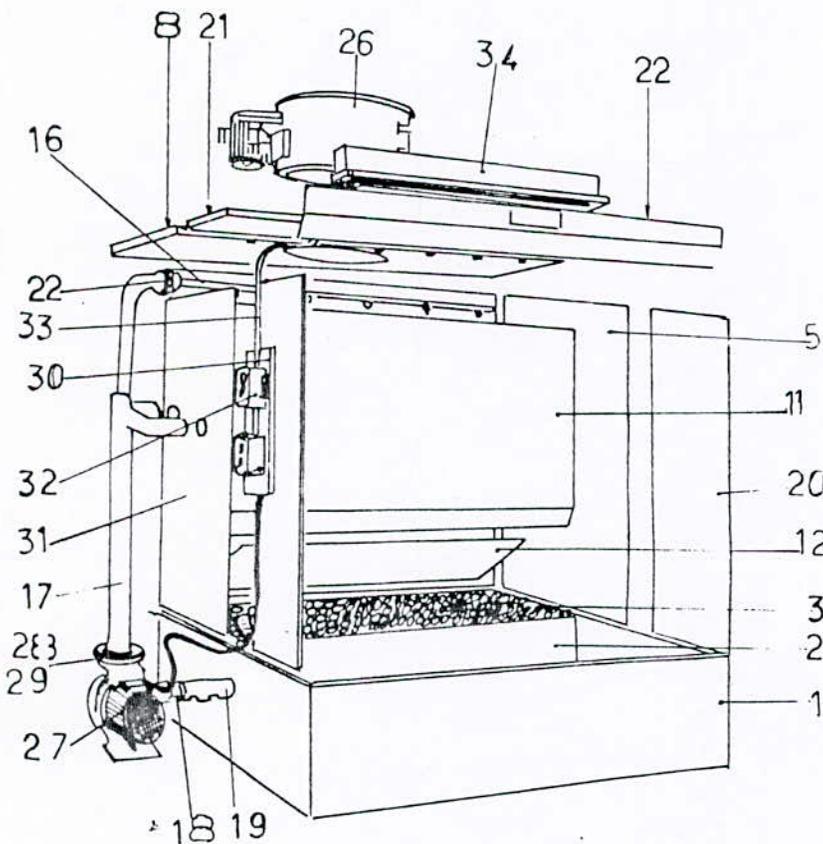
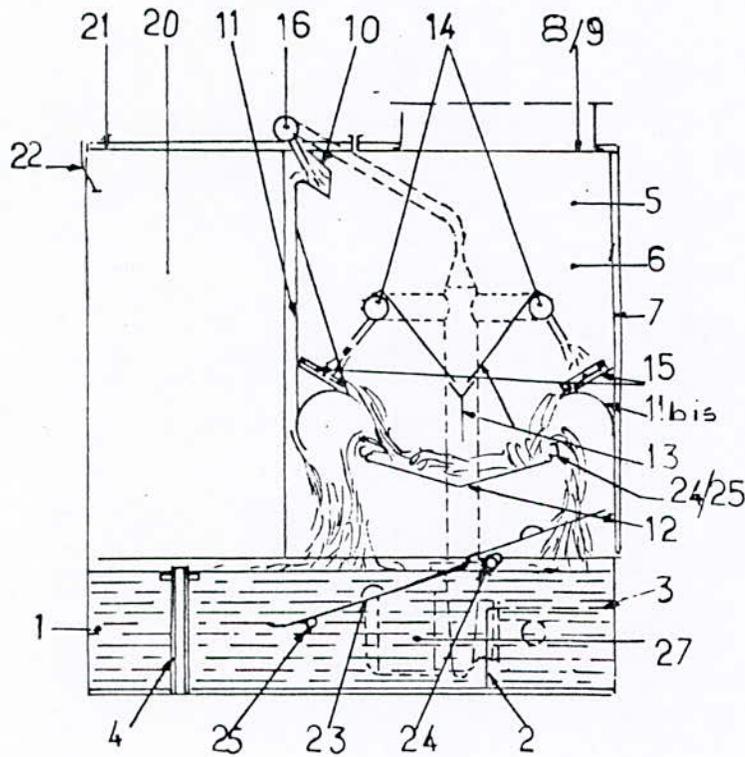
PISTOLET METALLISEUR



CABINE DE SABLAGE



CABINE DE METALLISATION



Repère	Qté	Désignation
1	1	Cuve profondeur 2 m
2	1	Tôle de décantation
3	1	Tôle perforée 2 m
4	1	Tube trop plein et vidange
5	1	Bloc de lavage H = 2 m
6	2	Panneau côté lavage
7	2	Panneau de fond 2 m
	1	3 m droite
	1	" Central
	1	" gauche
8	1	Panneau toit de lavage
9	1	Raidisseur " " "
10	1	Boc de rideau avec Joint
11	1	Rideau
11bis	1	Bec de corbin
12	1	Boc de lavage avec 2
		bavettes de niveau
13	1	Y de séparation
14	2	Rampe de lavage intérieur
15	4	Cornière de remontée
16	1	Tuyauterie de distribution
17	1	" " refoulement
18	1	Coude aspiration
19	1	Crepine
20	1	Côté avant droit
	1	" " gauche
21	1	Panneau de toit avant
22	1	Défecteur avec plaque
23	2	Tôle de réception
24	2	Tube support de tôle de rec
25	4	support de tube
26	1	ventilateur
27	1	Pompe horizontale
28	2	Joint de pompe
29	1	Diaphragme
30	1	Tableau de commande
31	2	Contacteur
32	1	Interrupteur éclairage
33	1	Câblage et tube electri.
34	1	Eclairage avec vitre, tube Fluorescent et Joint