



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
D'ANTANANARIVO



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE
DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR
DEPARTEMENT MINES

ETUDE D'AMELIORATION D'UNE
UNITE DE FABRICATION
ARTISANALE DE LINGOTS D'OR

Soutenu par : RAFOLO ANDRIANAIVOARIVONY Ndimbisoa

Devant les membres du jury composés de :

Président : Monsieur RASOLOMANANA Eddy, Professeur

Rapporteurs : Madame ARISOA RIVAH Kathy, Maître de conférences
Monsieur RANDRIANJA Roger, Professeur

Examineurs :

Monsieur RAFARALAHY, Assistant d'enseignement et de recherche
Monsieur DAMY JOACHIM Clotaire, Assistant d'enseignement et de recherche
Monsieur RAKOTOZAFY Gilbert, Directeur de la société LMJ

Date de soutenance : 27 Mars 2008

Année Universitaire 2007

REMERCIEMENTS

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

A cet effet, que les personnes sous citées trouvent ici notre profonde gratitude dont :

-Professeur RAMANANTSIZEHENA Pascal, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

-Professeur RASOLOMANANA Eddy, Enseignant Chercheur à l'Ecole Supérieure Polytechnique

-Madame ARISOA RIVAH KATHY, Maître de conférences à l'Ecole Supérieure Polytechnique

-Professeur RANDRIANJA Roger, Chef du Département MINES à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

-Monsieur RAFARALAHY, Assistant d'enseignement et de recherche à l'Ecole Supérieure Polytechnique

-Monsieur DAMY Joachim Clotaire, Assistant d'enseignement et de recherche à l'Ecole Supérieure Polytechnique

-Monsieur RAKOTOZAFY Gilbert, Directeur de la société LMJ Design

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : une pépite d'or.....	8
Figure 2 : mode cristallin CFC.....	9
Figure 3: Répartition par secteur selon l'utilisation de l'or non thésaurisé.....	13
Figure 4 : fabrication de lingot d'or de poids de 12,5 Kg.....	16
Figure 5 : prix de l'once d'or (en dollars).....	17
Figure 6 : Carte des principaux districts aurifères.....	22
Figure 7 : extraction de l'or du minerai.....	34
figure 8: Flow-sheet de purification de l'or.....	36
Figure 9 : creuset en plombagine.....	40
Figure 10 : Creuset en terre réfractaire n°3.....	40
Figure 11 : lingotière à plaque.....	41
Figure 12 : Lingotière à fil.....	42
Figure 13 : le soufflet à pédales et le réservoir d'ancien primus.....	50
Figure 14 : Laminoir à fil.....	50
Figure 15 : Le ventilateur centrifuge.....	54
Figure 16 : Aubes recourbées vers l'arrière.....	56
Figure 17 : le réservoir.....	58
Figure 18 : Le chalumeau.....	58
Figure 19 : Le creuset en matériau réfractaire.....	59

Figure 20 : lingotière.....	60
Figure 21 : L'unité réunissant le chalumeau, le creuset et la lingotière	61
Figure 22 : LIE et LSE de l'essence.....	67
Figure 23 : le lingot de Cuivre allié avec l'argent.....	76

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les couleurs de l'or en bijouterie	12
Tableau 2 : Principaux Pays producteurs d'or.....	15
Tableau 3 : production enregistrée à la DMG.....	21
Tableau 4 : dimensions d'un lingot en forme de plaque.....	41
Tableau 5 : Longueurs des lingots en fil.....	42
Tableau 6 : Dimension des lingots.....	43
Tableau 7 : les vitesses de rotation et les débits volumiques.....	73

Tableau 8: les investissements fixes	78
Tableau 9 : Coût des matières premières.....	79
Tableau 10 : Les consommables.....	79

LISTE DES ABREVIATIONS

CFC : Cubique à face centrée

DMG : Direction de la Mine et de la Géologie

LBM : London Bullion Market

LIE : limite inférieure d'explosivité

LSE: limite supérieure d'explosivité

SOMMAIRE

INTRODUCTION

PARTIE I : ETUDES ET RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES

Chapitre I : RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES

I-1 Généralités sur l'or

I-2 Rappels sur la thermodynamique appliquée

I-3 Rappels sur les fluides

Chapitre II : GENERALITES SUR LA FABRICATION DES LINGOTS

II-1 Affinage et fonte du métal

II-2 Fabrication de lingot

PARTIE II : CONCEPTION ET REALISATION DE L'UNITE AMELIOREE

Chapitre III : L'UNITE DE FABRICATION

III-1 L'unité de fabrication à Madagascar

III-2 Notre unité

Chapitre IV : PROCESSUS DE FONCTIONNEMENT

IV-1 Paramètres : L'essence et l'air

IV-2 Processus de combustion

PARTIE III : ESSAIS EXPERIMENTAUX

Chapitre V : LES ESSAIS

V-1 Essai de fabrication sur l'or

V-2 Essai de fabrication sur le cuivre

V-3 Mesures de sécurité

Chapitre VI : COUT UNITAIRE DE L'UNITE ET D'UN LINGOT

VI-1 Description du projet

VI-2 Investissements fixes

VI-3 Matières premières

VI-4 Consommables

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

RESUME

INTRODUCTION

Madagascar est un pays actuellement considéré comme possédant un fort potentiel minier, et suscite les regards du monde entier dans le domaine des matières premières. Dans le cadre général de l'ouverture du secteur minier du pays, ses innombrables ressources font l'objet de prospection, d'exploration et même d'exploitation qui devront apporter sans doute un plus dans l'économie nationale du pays.

Dans la situation actuelle des ressources, l'Etat malgache, par le biais des différents projets de renforcement du secteur minier, cherche à optimiser, à rationaliser et à augmenter la production minière. L'or, un des métaux précieux faisant partie intégrante du sous-sol malgache n'est néanmoins exploité qu'à un niveau très artisanal et parfois même de l'ordre de l'informel.

Il en résulte ainsi la mise en place des comptoirs de l'or dans certaines régions aurifères afin de formaliser le secteur pour augmenter la production nationale et dans un avenir proche, pour donner une valeur compétitive à l'or national sur le marché mondial. Pour le définir comme étant une valeur sûre sur le marché national, l'amélioration de ce secteur est prioritaire.

En somme, c'est dans cet objectif que nous sommes amenés à traiter ce sujet de mémoire intitulé : « *Etude d'amélioration d'une unité de fabrication artisanale de lingots d'or* » au sein de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA).

Afin de mieux cerner le sujet, nous rappellerons dans la première partie quelques études bibliographiques sur l'or, la thermodynamique appliquée concernant la combustion et les principales définitions des fluides.

La deuxième partie comprendra la présentation de l'ancienne unité, la conception et la fabrication améliorée ainsi que son processus de fonctionnement.

Enfin, la dernière partie montrera les chapitres concernant les résultats des essais et les principaux coûts se référant à l'unité.

PARTIE I : ETUDES ET RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE I. RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES

I- INTRODUCTION

Dans cette première partie, le but est de nous mettre en connaissance avec le métal or et les principes de la combustion. Nous y trouverons les différentes propriétés de l'or, un rappel général en thermodynamique appliquée à travers la combustion et aussi un bref aperçu sur les fluides pour l'écoulement de l'air dans notre unité de fabrication.

Pour acquérir le titrage nécessaire à l'obtention des normes correspondant à la fabrication des lingots, l'affinage ou le procédé de purification des impuretés est l'outil indispensable pour avoir les titres commerciaux.

II-GENERALITES SUR L'OR

1) Présentation

L'or est un élément chimique de symbole Au, de numéro atomique 79.

Il fait partie de la famille minéralogique des éléments natifs, c'est un métal de transition, de couleur jaune.

Il se présente dans la nature sous deux formes :

-l'une visible, à l'état natif, on le retrouve sous forme de poudre, de paillettes et de pépites dans les gisements alluvionnaires de surface.

-l'autre invisible, dans les filons souterrains ou dans les veines de quartz sera ensuite broyé, transformé en concentré aurifère par flottation ou cyanuration.



Figure 1_: une pépite d'or

2) Propriétés

L'or se distingue des autres métaux grâce à ses différentes propriétés. A cet effet, ses qualités physiques, mécaniques, chimiques sont d'une plus grande importance d'où son utilisation assez large.

a) Propriétés physiques et mécaniques

Les atomes d'or sont empilés selon la structure cristalline CFC. De ce fait, cette structure rend l'or très ductile.

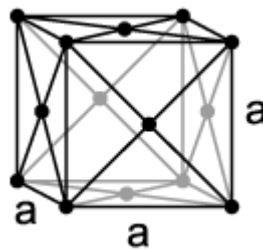


Figure 2 : mode cristallin CFC

Facilement déformable à froid, l'or est très malléable et il se cisèle aisément. Pour avoir une certaine idée : 1 gramme d'or a pu être étiré en un fil de 3500m, d'où son utilisation dans l'ornementation, les bijoux ou sous forme de fines feuilles pour plaquer des objets.

Physiquement, l'or est un solide à l'état ordinaire, dont voici les caractéristiques :

Point de fusion : 1337,34 [K]

Point d'évaporation : 3129 [K]

Couleur : jaune d'or plus claire allié avec l'argent

Eclat : métallique

Dureté : 2,5 à 3 sur l'échelle de Mohs

Densité : 19,3

Conductivité Thermique : 317 [W/m.K]

b) Propriétés chimiques

L'or est un métal noble, toutefois sa relative inertie chimique le protège des attaques de l'oxygène, donc l'or est un métal qui ne se ternit pas et ne forme pas d'oxyde, ce qui lui rend sa propriété d'inaltérabilité.

L'or oxydé se présente couramment sous deux formes ioniques dont :

-l'ion aureus retrouvé dans les procédés de cyanuration

-l'ion aurique, retrouvé lors de sa dissolution dans l'eau régale

•

Il résiste également à l'action des acides, dont les acides chlorhydriques, nitriques et sulfuriques...

Néanmoins ce métal est attaqué par :

-l'eau régale (mélange d'acides chlorhydriques et nitriques)

-le mercure avec lequel il s'amalgame

-l'eau de chlore qui le dissout avec formation de chlorure d'or

-les cyanures de potassium ou de sodium en présence d'oxygène ou d'un corps oxydant qui donne de l'auro cyanure de potassium ou de sodium.

-L'or est aussi attaqué par le chlore et le brome, et se dissout dans le mercure.

-Aucun acide isolé n'agit sur l'or

c) Propriétés électriques et thermiques

Electriquement, l'or est un excellent conducteur électrique mais son coût lié à sa rareté limite son utilisation.

D'autre part, il est également un bon conducteur thermique, on l'associe avec le fer dans les thermocouples pour la mesure des températures inférieures à la température ambiante.

d) Propriétés optiques

L'or poli, son pouvoir réfléchissant devient plus élevé.

3) Formation et gisement

L'or est présent dans des roches aurifères en place souvent dans des filons exploités dans les mines, ou dans les alluvions aurifères ou placer exploité dans la rivière ou en carrière.

Dans son état natif, l'or est souvent allié avec d'autres éléments dont :

- -l'argent : AgAu nommé electrum
- -le mercure : AuHg nommé amalgame
- -le bismuth : Au_2Bi (maldonite)
- -le Cuivre : Au Cu_3 (Auricuprite)
- -le Stibine : Au Sb (aurostubite)
- -la Sylvanite : Au Ag Te_4
- -la Calvérite : Au Te_4
- -LaNagyagite : $\text{Au}_2 \text{Pb}_{14} \text{Sb}_3 \text{Te}_{14} \text{S}_{17}$

4) Utilisation

La plus grande partie de l'or mondial est thésaurisée par les banques d'émission et sert aux transactions financières internationales. Le reste est employé en bijouterie, en orfèvrerie, en dentisterie et dans l'industrie électronique notamment dans la technologie spatiale.

L'or est employé pour ses propriétés : conductibilité électrique et thermique, son caractère inoxydable à chaud et à froid et sa résistance à la corrosion.

a) L'étalon or

Depuis toujours, du fait de sa rareté, l'or est devenu un placement dont la valeur n'est pas susceptible de s'effondrer. C'est pourquoi il est devenu un outil pour stabiliser les taux

de change monétaire. En fait, la banque centrale doit pouvoir fournir aux porteurs l'équivalent en or de leurs liquidités : c'est la thésaurisation.

b) Bijouterie- Joaillerie Artistique

Du fait de sa beauté et aussi de sa valeur, l'or trouve son utilité dans la fabrication de bijoux, de joyaux et dans les domaines artistiques de la décoration.

A cet effet, par souci de rigidité, sa malléabilité ne lui permet pas de rester pur mais nécessite qu'il soit allié avec d'autres métaux tels que l'Argent, le Cuivre, le Nickel...

L'alliage étant obtenu, le pourcentage massique d'or contenu dans le métal est titré en carats ou en millièmes.

	Carat	Titre	Or [%]	Argent [%]	Cuivre [%]	Nickel [%]	Zinc [%]
Or fin	24	1000/1000	100				
Or jaune	18	750/1000	75	12,5	12,5		
Or rose	18	750/1000	75	6	19		
Or gris	18	750/1000	75		10	12,5	2,5
Or rouge	18	750/1000	75	4,5	20,5		
Or vert	14	583/1000	58,3	24,8	16,8		0,2
Or blanc	14	583/1000	46,1	23,5	12,2	12,2	6

Tableau 1 : Les couleurs de l'or en bijouterie

Ces titrages sont standards, mais ils peuvent être modifiés selon la réglementation de chaque pays, ainsi chaque batteur d'or a ses propres alliages qui s'écartent légèrement de ces standards.

Par le procédé de dorure, l'art est devenu elle aussi, une destination de l'or dans la fabrication des feuilles pour les boiseries, les livres et les ferronneries.

c) Haute technologie- Industrie

L'or est également utilisé dans l'industrie de la haute technologie dont l'électronique. Vu son inaltérabilité et sa bonne conductivité électrique, la réalisation des contacts inoxydables nécessite son utilisation par l'électrolyse.

Il est aussi présent dans le cadre des technologies spatiales sous forme d'alliages pour opacifier des organes optiques.

d) Médecine- Dentisterie

Efficace contre la corrosion et biocompatible avec l'organisme, il est devenu un substitut nettement supérieur aux amalgames pour les collusions dentaires, mais demande l'emploi d'une technique différente des classiques « plombages » : ce sont les inlays.

En médecine, certains dérivés organiques de l'or, dits « sels d'or » sont parfois utilisés dans le traitement de certaines infections en rhumatologie.

-auranofine

-aurothiomalate sodique

-aurothiosulfate sodique

-aurothioglucose

-aurotioprol

Ainsi, l'utilisation de l'or se révèle être très importante vu ces différentes catégories. Par ailleurs, le graphique suivant permettra de voir le taux d'utilisation de l'or par secteur.

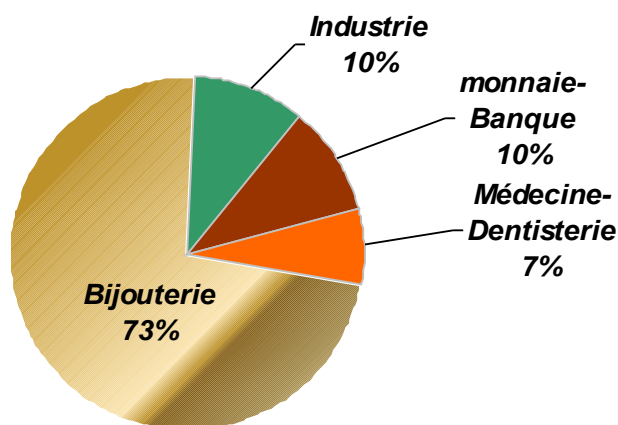


Figure 3: Répartition par secteur selon l'utilisation de l'or non thésaurisé

5) Production mondiale

Depuis que l'homme s'y est intéressé, on estime à 145000 tonnes la quantité d'or extraite jusqu'en 2001. Cependant, la répartition mondiale de la production d'or a considérablement évolué depuis.

a) Quelques données chiffrées

Depuis ces dernières décennies, le principal producteur d'or dans le monde reste l'Afrique du Sud avec aujourd'hui près de 400 tonnes d'or extraites chaque année. A part l'Afrique du Sud, les Etats – Unis constituent eux aussi une source aurifère considérable.

Il est indéniable que la possession de minerai d'or a définitivement classé ces pays parmi les plus productifs du monde indépendamment de leur croissance. Le tableau suivant résume la production mondiale d'or par pays.

Pays	Production [tonnes]
Afrique du Sud	400
Etats-Unis	350
Australie	290
Chine	185
Russie	175
Canada	160

Tableau 2 : Principaux Pays producteurs d'or

Source : *Chiffres U.S Geological Survey*

6) Marché international et national de l'or

a) Négociation de l'or [II]

L'or est coté sous forme physique à la bourse de Londres et, sous forme de contrats à terme, à New York. En dehors de ces marchés organisés, qui traitent des grosses quantités, il existe des entreprises de négoce de l'or et de métaux précieux ouvertes aux particuliers et aux divers transformateurs et utilisateurs.

Echangé sur le marché des métaux précieux, principalement sur les places de New York, Londres, Zurich et Hong-Kong, les cours mondiaux sont en once (troy ounce) et en dollars américains.

En début 2004, le cours de l'once s'élevait à environ 400\$ (300 euros) contre 300\$ en 2001, et 600\$ en 2005 ce qui représente une appréciation de 50 % en l'espace de 30 mois, l'UBS prévoit une hausse de 200\$ entre 2006 et 2009 soit plus de 800\$,

b) Les lingots

Les lingots produits par l'or sont deux types différents suivant leurs poids et leurs utilisations dont :

-La barre internationale

Elle pèse en moyenne 12,5 kg. Son poids en fait un produit très difficile à véhiculer. Les échanges sont très restreints. Titre 995 ‰.



Figure 4 : fabrication de lingot d'or de poids de 12,5 Kg

-Le lingot d'or

Il pèse environ 1 kg et est plus facilement échangeable. Il doit obligatoirement contenir la marque reconnue du fondeur ou de l'essayeur pour être négociable en Bourse, faute de quoi il ne pourrait l'être qu'à la valeur de son poids d'or.

Sur les marchés nationaux dits « de détail », on peut trouver des lingots de différentes tailles. Il existe des lingots de 500 gr, 250 gr, 100 gr, 50 gr et 25 gr etc...

La barre internationale est cotée suivant le pays. Sur le marché de gros de Londres, le London Bullion Market (LBM), qui est l'un des tous premiers marchés au monde pour la

négociation physique d'or et d'argent, l'unité de négociation est le lingot monétaire de 400 onces troy, soit environ 12,5 kilos.

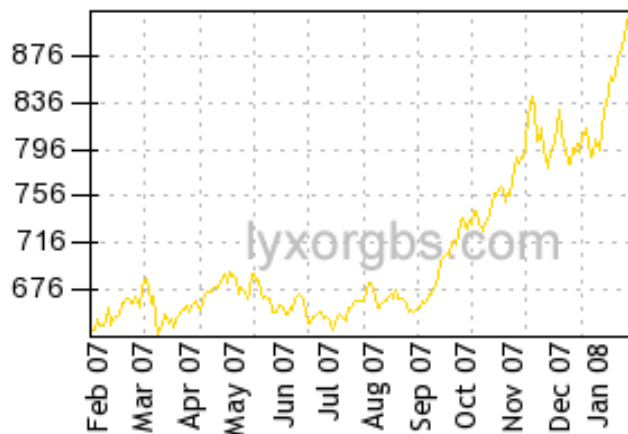


Figure 5 : prix de l'once d'or (en dollars)

7) **Potentiel aurifère malgache**

A Madagascar, on retrouve l'or sous deux types de gisement qui sont les gisements primaires et les gisements secondaires définis respectivement par la formation de l'or lors des processus magmatiques et métamorphiques et du résultat de l'altération du gîte primaire sous l'action des eaux de surface.

On peut classer les gisements aurifères de Madagascar en trois grandes catégories :

- gisements primaires de types ignés et hydrothermaux
- gisements secondaires de type latéritique
- gisements de groupe détritique ou de type placer.

a) **Les gisements primaires :**

Ce sont des formations minéralogiques qui se sont formés lors de la montée de magma par le phénomène de magmatisme affecté par les phénomènes de métamorphisme. Ainsi, il existe deux types de gisements primaires :

• **Gisements primaires de type ignés :**

Au cours de la solidification du magma, se caractérisent des concentrations locales des métaux. Le magma se solidifie soit à une certaine profondeur par refroidissement lent et donnant des roches plutoniques, soit en surface par refroidissement rapide des laves et donnant des roches volcaniques.

On distingue :

- Le gîte de ségrégation
- Le gîte de contact
- Le gîte pegmatitique
- Le gîte filonien

- **Gisements primaires de type hydrothermal :**

On distingue :

-Les types hydrothermaux de haute température : L'or est lié avec les sulfures. Les corps des minerais sont filoniens, de forme irrégulière.

-Les types hydrothermaux de moyenne température : Ils se forment à la température de 200° à 300°C.

-Les types hydrothermaux de basse température : ils se forment à une température comprise entre 50 et 200°C. Les minerais sont constitués de quartz à or disséminé, de barytine, de calcite, de sulfures et de tellurures.

b) Les gisements secondaires de types latéritiques :

La latéritisation des gisements primaires par une diminution de volume due au départ de la silice, crée un premier enrichissement sur place qui est suivi, au sein des argiles latéritiques, de phénomène de concentration chimique avec précipitation de l'or en des points privilégiés du réseau de circulation des eaux et en partie au contact des veines quartzieuses. C'est à la base du profil d'altération latéritique à structure conservée que se trouve l'or sous forme cristallitique ou dendritique, parfois en cristaux nets toujours à titre élevé.

Cette concentration chimique peut arriver à donner des pépites. Ce type de gisement a été longuement exploité par les trous de rats des orpailleurs suivant les quartz et les argiles riches au contact. L'érosion des formations latéritiques conduit aux gisements ordinaires d'éluvions et d'alluvions.

c) Les gisements de groupes détritiques :

Les gîtes d'origines profondes liées aux roches éruptives et métamorphiques sont attaquées en permanence par des agents d'érosion physique, chimique ou organique. Les eaux de ruissellements et le vent assurent le transport de matériaux démantelés. Les dépôts de minerais s'entassent selon le résultat de la séparation mécanique naturelle des éléments lourds aux éléments légers. L'or des alluvions et la monazite des plages des gisements détritiques sont très intéressantes.

Les gisements de groupe détritique sont représentés d'une part des placers anciens et d'autre part des placers récents alluviaux et éluviaux.

Il existe deux types de placers récents :

-Les placers éluviaux :

Ils se forment sur les pentes à proximité des affleurements des gisements primaires. Le type de classement et la vitesse de transport sont déterminés par les paramètres morphologiques, principalement par la forme et l'étendue des pentes et des vallées.

-Les placers alluviaux :

Dans ce dernier, trois facteurs entrent en jeu :

L'érosion : le premier phénomène est la désintégration de la roche plus ou moins minéralisée.

le transport : le transport des éléments de la roche détruite se fait par le roulement ou quelque fois par dissolution chimique.

le dépôt : ce dépôt se fait quand le transport n'est plus possible. Il existe le long du cours d'eau différents obstacles provoquant des portes de lit et entraînant le dépôt.

Et les deux types de placers anciens sont :

-Les placers anciens formés de niveaux conglomératiques continus à minéralisation sulfurée aurifère et uranifère

-Les placers anciens formés de lentilles minéralisées à l'intérieure de niveaux conglomératiques, à minéralisation oxydée et aurifère

Dans le cadre de son exploitation nationale, le travail de l'or se réduit à la prospection pour les grandes sociétés minières et à l'exploitation alluvionnaire pour les petits exploitants.

Néanmoins, l'Etat malgache, par le biais de quelques projets, a apporté des renforcements sur la gestion de l'or à Madagascar par l'implantation des différents comptoirs de l'or.

Le pays compte plusieurs régions aurifères qui sont

- celui de Betsiriry dont Dabolava et Andimaka (miandrivazo)
- Maevatanana
- Ambositra
- Beforona
- Andrarona
- Vavatenina-
- Vohilava-Ampasary
- Betsiaka-Andavakoera
- Tsaratanana-Ambohipihaonana

8) marché national

Sur le marché local, le prix du gramme d'or se chiffre à peu près à 40 000 Ar. Il se négocie entre les orpailleurs et les collecteurs sur le marché.

Mais le terme de collecteur est ici très flou car en fait, il y a une multitude de collecte instaurée à plusieurs niveaux, ce qui favorise surtout l'augmentation du prix de l'or et aussi l'impact engendré par cette multitude ne favorise guère l'activité des orpailleurs.

a) Production nationale

Production enregistrée à la DMG												
Substance	Unité	Année										
		1994	1995	1996	1997	1998	1999	2001	2002	2003	2004	2005
Or	Kg	26,35	39,48	4,5	2,08	2,26	7,13	0,29	2,8		12	13

Tableau 3 : production enregistrée à la DMG

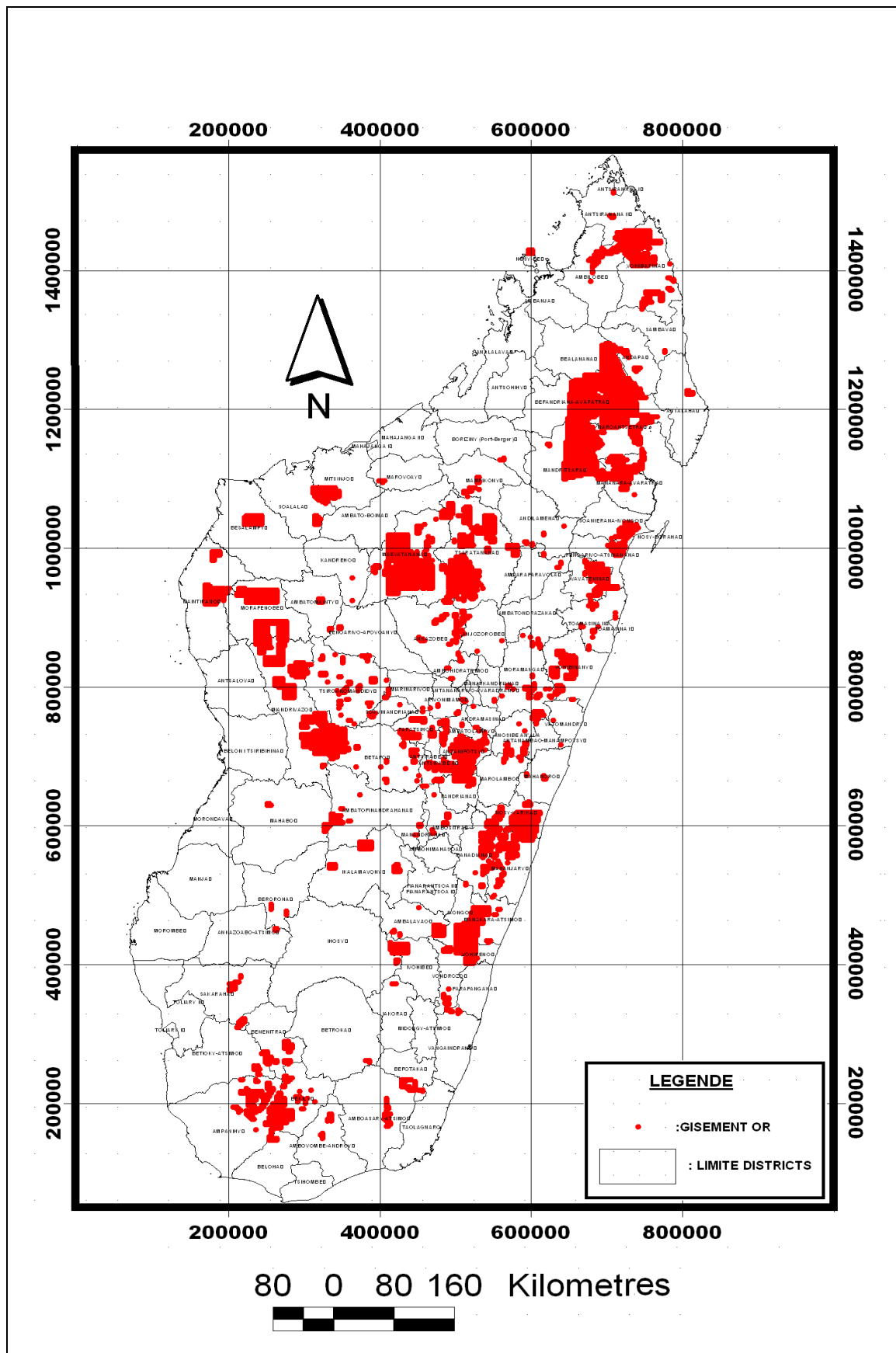


Figure 6 : Carte des principaux districts aurifères

III- RAPPELS SUR LA THERMODYNAMIQUE APPLIQUEE

1) La combustion

a) Définitions

On définit la combustion telle une combinaison rapide et exothermique d'une substance (solide, liquide et gaz). La substance qui brûle est le combustible et le gaz dans lequel a lieu la combustion est le comburant.

Dans l'industrie, le comburant est toujours de l'oxygène pur, ou mélangé à l'azote pour former l'air.

Un combustible est formé d'éléments oxydables constitués par le carbone, l'hydrogène, le soufre et aussi de stériles incombustibles. Après la combustion, on se trouve en présence de gaz (fumée), et de solides imbrûlés dont l'ensemble forme les produits de combustion. Si tous ces produits ne contiennent plus aucun élément, ou aucune substance combustible, la combustion est dite totale ou complète, s'il en est autrement, la combustion est dite incomplète.

Donc la combustion est une réaction chimique entre deux corps avec un dégagement de chaleur.

En conclusion une combustion ne peut être réalisée que si les conditions suivantes soient remplies :

- présence d'un corps combustible
- présence de l'oxygène
- le combustible porté à une température supérieure à sa température d'inflammation

Ces trois conditions sont indispensables. En effet pour que la combustion soit complète il faut que la quantité d'air amenée ne soit pas être inférieure à la quantité théorique.

b) Compositions et pouvoirs calorifiques

Les caractéristiques d'un combustible sont :

- sa composition chimique, qui en définit sa nature
- son pouvoir calorifique, qui en définit sa valeur énergétique

- **Composition**

La composition d'un combustible est représentée par les proportions respectives de ses divers constituants (élément ou composé chimique) contenus dans une quantité déterminée du combustible.

Unité : $[Kg / Kg]$ de combustible ou $[M^3N / M^3N]$ de combustible.

On représentera chaque constituant par son symbole chimique ou sa formule en lettres minuscules, l'eau d'humidité par w et les cendres par d.

- **Pouvoirs calorifiques**

Le pouvoir calorifique d'un combustible désigne la quantité de chaleur que peut dégager la combustion complète d'une quantité déterminée du combustible prise à 0°C.

Nous prenons 1Kg pour les combustibles solides ou liquides et $1m^3$ N pour les combustibles gazeux.

Le pouvoir calorifique peut se calculer à partir de la composition du combustible en utilisant les chaleurs de combustion (équations de combustion) ou expérimentalement par des procédés calorimétriques.

Les produits de la combustion renferment en général de la vapeur d'eau qui provient à la fois de l'humidité initiale du combustible, de l'humidité de l'air comburant et de l'eau fournie par la combustion de l'hydrogène libre ou combiné.

La quantité de chaleur que cette vapeur d'eau peut libérer par condensation est contenue dans la chaleur fournie par la combustion, mais elle ne peut être pratiquement utilisée.

Ainsi on considère deux pouvoirs calorifiques :

-le pouvoir calorifique supérieur « P » (chaleur de combustion) qui comprend la chaleur de condensation jusqu'à 0°C de la vapeur d'eau contenue dans les fumées.

-le pouvoir calorifique inférieur « I »(pouvoir calorifique) dans lequel la chaleur de condensation n'est pas considérée.

En outre, la combustion peut s'effectuer soit à pression constante ou à volume constant, ainsi on aura P_p , I_p , P_v et I_v .

- **Relation entre I et P**

-(solide et liquide)
$$P = I + (9h + w) 600 [kcal / kg] \quad (I-1)$$

-(gazeux)
$$P = I + \left(w + h + 2ch_4 + 2,45 \sum c_m h_p \right) 480 [kcal / m^3 N] \quad (I-2)$$

Et en utilisant la thermodynamique classique et les réactions chimiques, on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_p = P_v + 135 \left(h - \frac{o}{8} \right) \\ I_p = I_v - 135 \left(h + \frac{o}{8} + \frac{w}{4,5} \right) \end{array} \right\} \quad (I-3)$$

- **Détermination du pouvoir calorifique :**

La mesure du pouvoir calorifique peut se faire soit par expérience (bombe calorimétrique), soit par calcul. A partir de cela, on dispose de plusieurs formules :

-Combustibles solides ou liquides à faible teneur en H et O :

$$I = 8100c + 29000 \left(h - \frac{o}{8} \right) + 2500s - 600w \quad (I-4)$$

Les pouvoirs calorifiques des constituants combustibles étant pris égaux à :

-8100 Kcal/Kg pour le carbone

-29000 Kcal/Kg pour l'hydrogène,

-2500 Kcal/Kg pour le soufre

Si le combustible contient de l'oxygène indépendamment de celui qui se trouve dans l'eau,

de masse o Kg par kilogramme de combustible, de la réaction : $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$

D'où 1 Kg de O_2 peut brûler $\frac{1}{8}$ Kg de H_2 , donc o Kg de O_2 peut brûler $\frac{o}{8}$ Kg d' H_2

Il reste donc à brûler par l'air de combustion que $(h - \frac{o}{8})$ kg d' H_2 par Kg de combustible.

-Combustibles solides à teneur élevée en H et O (huiles lourdes) obtenus par la formule de VONDRAEK

$$I = \left(7860 + 280\sqrt{1 - c_o} \right) c + 21500 \left(h - \frac{o}{8} \right) + 2500s - 600w \quad (I-5)$$

-Combustibles gazeux :

$$I = 2580h + 3500w + 8530ch_4 + 17000 \sum c_m h_p \quad (I-6)$$

Remarques : Il est à remarquer que les valeurs des pouvoirs calorifiques des constituants combustibles peuvent être calculées à partir des chaleurs de combustion :

Par exemple pour le cas du carbone on a :

1mole de c dégage par combustion complète 97,4 Kcal, donc la combustion de 1Kg de carbone dégage :

$$I = \frac{97,6 \cdot 1000}{12} = 8130 \text{Kcal}$$

c) **La combustion théorique**

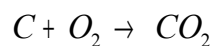
La combustion théorique se définit par une combustion complète de tous les éléments du combustible donné, conformément aux équations stoechiométriques. On appellera donc par :

-pouvoir comburivore d'un combustible le volume d'air nécessaire à la combustion théorique de l'unité de quantité de combustible V_a

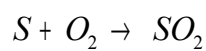
-le volume des fumées correspondant à la combustion théorique complète de cette unité de quantité de combustible sera noté pouvoir fumigène V_f .

• **Combustibles solides**

La combustion théorique de 1 mole de C nécessite 1mole de O_2 et donne 1 mole de CO_2 , on a donc :



C kg de carbone, soit : $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$



Or le combustible renferme par kilogramme :

$$\frac{c}{12} \text{ kmole(s)}$$

$$\frac{h}{2} \text{ kmole(s)}$$

$$\frac{s}{32} \text{ kmole(s)}$$

Alors la combustion de 1Kg de combustible, on aura besoin de : $\left(\frac{c}{12} + \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2} + \frac{s}{32} \right)$ kmole(s)

d'oxygène.

Supposons que cette partie existe déjà dans le combustible qui renferme $\frac{o}{32}$ kmole, ainsi l'air comburant n'aura à fournir pour brûler 1Kg de combustible que :

$\left(\frac{c}{12} + \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right)$ Kmole d'oxygène, affectant un volume :

$$V_{O_2} = \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s-o}{32} \right) \cdot 22,414 \left[\frac{m^3 N}{Kg} \right]$$

En outre, l'air est formé généralement de 79 % d'azote et 21 % d'oxygène en volume, ainsi pour brûler 1kg du combustible, le pouvoir comburivore sera :

$$V_a = \frac{V_{O_2}}{0,21} = \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s-o}{32} \right) \cdot 22,414 \cdot 4,76 \left[\frac{m^3 N}{Kg} \right]$$

$$\text{soit } V_a = 8,89c + 26,67h + 3,33(s-o) \left[\frac{m^3 N}{Kg} \right]$$

Pour le pouvoir fumigène, on obtiendra un volume si le combustible contient n Kg de N₂

Par kilogramme de combustible dont :

$$V_f = V_{fc} + V_{fn} = \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{2} + \frac{s-o}{32} + \frac{n}{28} \right) \cdot 22,414 + \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s-o}{32} \right) \cdot 22,414 \cdot 3,76 \left[\frac{m^3 N}{Kg} \right] \quad (I-7)$$

$$V_f = 8,89c + 32,27h + 3,33s + 0,8n - 2,63o \left[\frac{m^3 N}{Kg} \right]$$

Dans la pratique, on négligera le volume d'eau car elle sera entièrement condensée donc négligeable. Ainsi, il ne restera que l'azote de son air comburant, d'où le retranchement du volume de vapeur d'eau résultant de la combustion de l'hydrogène qui est :

$$\frac{h}{2} \cdot 22,414 = 11,207h \left[\frac{m^3 N}{Kg} \right]$$

$$V_s = 8,89c + 21,07h + 3,33s + 0,8n - 2,63o \left[\frac{m^3 N}{Kg} \right]$$

On pourra aussi calculer par les formules empiriques de ROSIN et FEHLING les volumes V_a et V_f en connaissant le pouvoir calorifique du combustible liquide :

$$\begin{cases} V_a = 85.10^{-5} Ip_o + 2 \left[\frac{m^3 N}{Kg} \right] \\ V_f = 111.10^{-5} Ip_o \left[\frac{m^3 N}{Kg} \right] \end{cases} \quad (I-8)$$

d) Combustion réelle

La combustion réelle est caractérisée par le coefficient d'excès d'air ou rapport d'air car dans la pratique, les proportions de combustible et d'air s'écartent toujours des valeurs stoechiométriques. Le coefficient d'excès d'air est défini comme suit :

$$\lambda = \frac{V'_a}{V_a} \quad \text{avec } V'_a : \text{volume d'air effectivement fourni et } V_a : \text{volume stoechiométrique}$$

Pour une valeur de $\lambda > 1$: la combustion est avec excès d'air, dans le cas contraire, il y a défaut d'air.

On définit l'excès d'air par le rapport : $e = \frac{V'_a - V_a}{V_a} \cdot 100$ et e en [%] et $\lambda = 1 + \frac{e}{100}$
 $e = 100(\lambda - 1)$

• **Expressions littérales en fonction de e**

Nommons par V'_s le volume total de fumées sèches produit lors d'une combustion

réelle : $V'_s = V_s + \frac{e}{100} V_a + \frac{V'_{co}}{2}$ avec $\frac{V'_{co}}{2}$: volume d'oxygène non combiné et $\frac{e}{100} V_a$ le volume d'air en excès.

Supposons qu'on connaît la teneur en oxygène dans les fumées sèches : o' (en %) définit comme suit :

$$o' = \frac{V'_{O_2}}{V'_s} \quad \text{et celle-ci correspond à une teneur centésimale :}$$

$$a' = 100 \frac{V'_s - V_s}{V'_s} = \frac{100}{21} o'$$

Et d'après cette relation on aura : $e = 100 \frac{V'_s \cdot o'}{V_a (21 - o')} - \frac{V'_{co}}{V_a}$ (I-9)

De même pour les fumées sèches, la teneur de $(CO_2 + SO_2)$ est :

$$(CO_2 + SO_2) = 100 \frac{V'_{co2+SO2}}{V'_s} \text{ avec } V'_{(co2+SO2)} = V_{co2+SO2} - V'_{co} \text{ et}$$

$$V_{(co2+SO2)} = \left(\frac{c}{12} + \frac{s}{32} \right) \cdot 22,414 \left[\frac{m^3 N}{Kg} \right]$$

D'où l'expression de :

$$(CO_2 + SO_2) = \frac{100(V_{co2+SO2} - V'_{co})}{V_s + \frac{e}{100}V_a + \frac{V'_{co}}{2}} \quad (I-10)$$

Nous pouvons néanmoins remarquer que la nature des imbrûlés dans les fumées est fonction de l'importance du défaut d'air ($\lambda < 1$), mais pour des valeurs de λ pratiquement sensibles à 1, l'hydrogène et le soufre et les hydrocarbures légers brûlent entièrement et le carbone brûle plus ou moins sous forme de CO et CO₂ dans les fumées.

e) **Température de combustion**

Pour le combustible brûlé on obtient la température à laquelle sont portés les produits de la combustion, cette température dépend de la nature de la combustion elle-même.

IV-RAPPELS SUR LES FLUIDES

1) Définitions

Le modèle dans lequel on suppose que la matière présente une structure spatiale interrompue d'un petit volume suffisamment grand pour contenir un grand nombre de molécules est un fluide définissant un lieu naturel continu, déformable et sans rigidité et qui peut s'écouler.

Considérons un volume V de fluide délimité par une surface fermée Σ . A cette surface deux types de forces agissent sur les particules du volume considéré dont les forces extérieures et intérieures respectivement les forces de volume et forces de surface.

-Les forces de volume sont caractérisées par des champs de force qui lui sont proportionnels dont la pesanteur, la force magnétique et électrique.

-Les forces de surface sont elles, définies par les composantes tangentielle et normale de l'élément de force appliquée.

2) Compressibilité

On définit la compressibilité comme la propriété physique qui différencie un liquide et un gaz. Les fluides habituellement étudiés sont mobiles, isotropes et visqueux.

La formule de la compressibilité isotherme en thermodynamique est :

$$K_t = - \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_t \quad (\text{I-11})$$

Dans le cas d'un gaz parfait on aura : $V = \frac{nRT}{P} \rightarrow K_r = \frac{1}{P} \approx 10^{-5}$

En réalité pour tout fluide en mouvement, il existe toujours une déformation accompagnée d'une résistance. La viscosité est la raison de cette résistance, elle est surtout due à la présence des composantes tangentielles dans les forces superficielles. Cette résistance est de module nul pour un fluide parfait, celui du fluide réel est caractérisée par un coefficient réel suivant le type du fluide.

3) Viscosité dynamique

La viscosité dynamique absolue est définie comme étant la grandeur μ régissant dans la formule :

$$Ft = \mu . A . \frac{dU}{dz}$$

avec $\frac{dU}{dz}$ étant la variation de la vitesse dans la direction normale de l'écoulement.

Cas d'un fluide newtonien

On définit la contrainte tangentielle τ défini comme suit : $\tau = \mu . \frac{dU}{dz}$

μ est exprimée en $[Pa.s] = \left[\frac{Kg}{m.s} \right]$

4) Viscosité cinématique

On définit la viscosité cinématique ν d'un fluide par le rapport de sa viscosité dynamique μ par sa masse volumique ρ dont :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{I-12}$$

Pour les liquides, la masse volumique varie peu en fonction de la température et de la pression, ν se comporte comme μ .

A la pression atmosphérique, dans le cas des gaz, la viscosité cinématique ν varie avec la température. Quand la pression augmente, μ reste constante, ν varie selon $1/\rho$, en diminuant lorsque la pression augmente.

La viscosité cinématique est exprimée en $[m^2.s^{-1}]$

Remarque

Dans le cas de l'air, on a :

-la masse volumique : $1,29 [Kg/m^3]$

-la viscosité cinématique : $1,41. 10^{-5}$ [m²/s]

-la viscosité dynamique : $1,82.10^{-5}$ [Po] : poiseuille

a) **Nombre de Reynolds**

Le nombre de Reynolds est défini par la formule suivante :

$$R = \frac{V_d D_h}{\nu} \quad \text{Avec} \quad D_h = 4L \quad (\text{I-13})$$

$$L = \frac{r}{2} \quad \text{pour une section circulaire}$$

b) **Vitesse débitante**

$$V_d = \frac{q_v}{S} = \frac{q_v}{\pi r^2} \quad (\text{I-14})$$

Avant la fabrication du lingot, de la fonte et du procédé d'affinage, il nous est nécessaire de présenter les différentes méthodes d'extraction de l'or à partir du minerai brut. La nature du minerai détermine le procédé de séparation et de récupération utilisée et l'or se présente sous deux états différents dont :

-l'or finement dispersé dans le minerai, cas des gisements primaires

-l'or se présentant sous une forme relativement grossière et libre, cas des gisements secondaires.

Pour le cas des gisements primaires, l'extraction se procède ainsi suivant plusieurs étapes.

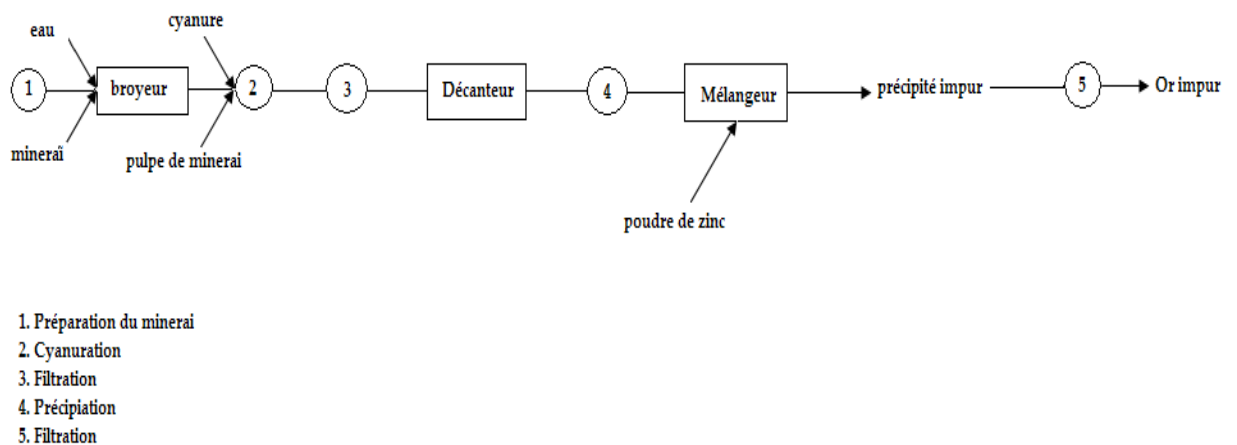


Figure 7 : extraction de l'or du minerai

Se présentant sous forme relativement grossière et libre dans les gisements secondaires, l'or est récupéré par des moyens mécaniques ou manuels fonctionnant par gravité comme les tables à secousses, les sluices et la batée en raison de son poids élevé par rapport aux autres métaux.

I-AFFINAGE ET FONTE DU METAL

1) Définitions

L'affinage est un procédé qui consiste à séparer et à purifier les lingots impurs formés d'or et d'impuretés pour obtenir les titres commerciaux voulus.

En d'autres termes, l'affinage permet d'obtenir de l'or pur ayant presque un titre de 1000 millièmes. Il pourra donc être considéré comme un métal neuf après ce procédé.

De ce fait, les procédés d'affinage se différencient par la composition du produit à affiner et la nature de ses impuretés.

Nous pouvons donc considérer plusieurs types d'affinage dont :

2) L'affinage artisanale

Cette méthode est certainement la plus utilisée dans la bijouterie et la joaillerie. Son but est de pouvoir séparer l'or des métaux d'alliage et éliminer les matières organiques.

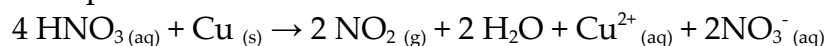
En effet, il existe un mode opératoire pour l'affinage artisanale que nous essayerons de schématiser et d'expliquer chimiquement.

Lors du chauffage du métal, toutes les matières organiques seront calcinées par la flamme, la fonte d'une part d'or avec deux parts de cuivre : lors de la fonte, le métal en fusion devient liquide et le cuivre, aidé par un fondant, a pour rôle de capter les impuretés présentes dans la solution liquide comme l'argent Ag.

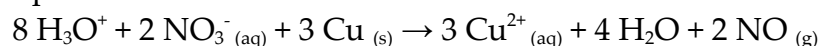
Quand le métal est laminé, on le plonge dans une solution d'acide nitrique dilué ou très concentré. On assiste à une réaction d'oxydo – réduction car le cuivre (réducteur) est oxydé par l'acide nitrique (oxydant fort).

Par la règle du gamma, on obtient les réactions suivantes :

-Pour l'acide nitrique très concentré :



- Pour un acide plus dilué :



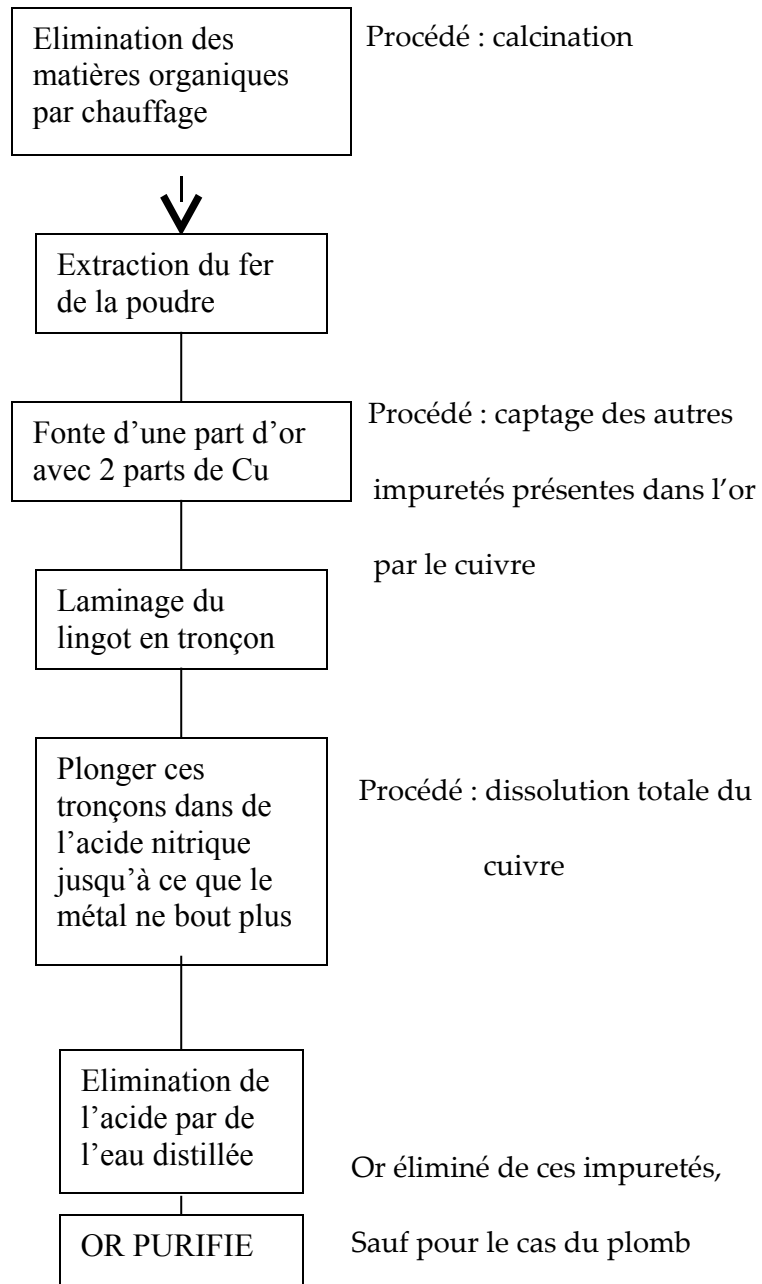
Lorsque le métal ne bout plus, on constate qu'il n'y a plus de réaction entre le cuivre et l'acide.

Nous obtenons donc une solution aqueuse de nitrate de cuivre de formule $(\text{Cu}^{2+}; (\text{NO}_3^-)_2)$.

Le cuivre a été totalement dissolu du métal.

Après ces procédés, l'or peut être considéré comme presque pur mais la purification n'est pas totale car dans bien des cas le plomb ne peut être éliminé.

figure 8: Flow-sheet de purification de l'or



3) **Le procédé MILLER (séparation par le chlore)**

Avec ce procédé, l'affinage s'effectue sur le métal en fusion en injectant du chlore par l'intermédiaire de tubes en céramique à une température aux environs de 1150°C.

Effectivement, le chlore agit en éliminant successivement les impuretés métalliques.

Il élimine le fer, le zinc et le plomb car ces métaux se transforment en chlorure gazeux et peuvent être retraités pour récupérer les traces d'or entraînés.

La récupération de l'argent et du cuivre est effectuée par l'intermédiaire du chlorure gazeux, par séparation par gravité.

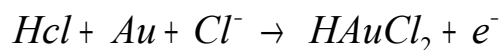
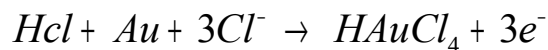
L'or obtenu a un titre en général supérieur à 995/1000 et contient jusqu'à 0,35 % d'[Ag](#).

4) Le procédé WOHLWILL (affinage électrolytique)

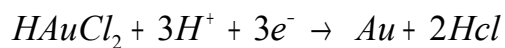
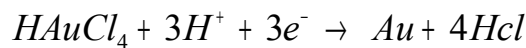
Cette méthode est réalisée couramment après une séparation par le chlore, qui toutefois présente certaines limites dans l'élimination des traces de platine.

Ainsi, le procédé d'affinage électrolytique s'opère dans des cellules de céramique à une température environnant les 70°C en dissolvant de l'or sous forme métallique dans de l'acide Aurichlorhydrique (HAuCl_4) qu'on appelle électrolyte en présence de chlorure gazeux.

A l'anode on a les réactions suivantes :



A la cathode :



L'or obtenu par ce type d'affinage est à 999,9/1000.

5) Le procédé acide

Analogue au procédé de coupellation dans une analyse d'or, ce procédé consiste à dissoudre l'argent sans pour autant attaquer l'or.

Elle s'effectue suivant deux étapes bien distinctes, celle du traitement par de l'acide chlorhydrique pour l'élimination des métaux communs et celle de la dissolution de l'argent par de l'acide sulfurique bouillante qui sera précipité sous forme de chlorure.

6) Fonte et pré filage du métal

a) But:

Le but du pré filage du métal consiste à lui donner une forme choisie au préalable afin de mieux l'utiliser et aussi pour la facilité de manipulation.

b) Principe

Fondre les métaux purs dans un creuset et utiliser du fondant puis verser la coulée chaude dans une lingotière suivant la forme désirée. Le principe est donc de mettre en fusion à l'intérieur d'un creuset le mélange comprenant le métal et le fondant utilisé à cet effet.

Les fondants utilisés principalement sont :

Le borax ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$) est un composé du [bore](#) appelé aussi tétraborate de sodium ou borate de sodium. Il sert à dissoudre les oxydes de métaux communs ou à les empêcher de se former.

Le carbonate de soude : rend fusible l'alumine et la silice

Le salpêtre (nitrate de potassium) : il sert à achever la combustion et oxyde le fer

le soufre : il forme avec le fer entres autres des sulfures solubles dans le carbonate de soude.

On peut remarquer que lors de ce pré filage, il faut au moins 50g d'or pur pour que la fonte soit rentable. A l'issue de la coulée en lingotière, on obtient donc une fonte homogène.

II-FABRICATION DES LINGOTS

1) Définitions

On peut définir le lingot comme une masse définie d'un métal ou d'un alliage obtenue à partir d'une coulée pour obtenir un seul bloc. Il est utilisé principalement pour les métaux précieux et évoque une barre de métal pur après son affinage.

Dans notre cas, le lingot est assimilé à un métal allié ou non pour obtenir un seul bloc.

Mais le terme lingot désigne également des coulées de métaux industriels pouvant atteindre plusieurs tonnes. Les métaux peuvent également être coulés dans des différents creusets sous d'autre forme, dans des moules de forme diverses (barres, formes complexes).

2) Le creuset

Le creuset a pour rôle d'être l'outil utilisé comme support au moment de la fonte. Il a pour caractère de résister à la chaleur de la flamme pendant la fonte du métal.

Par ailleurs, le matériau avec lequel il est fabriqué doit être un matériau qui ne fond pas à l'application de la fonte. Pour cela il existe plusieurs types de creuset.

a) Creuset en plombagine

Le creuset en plombagine est surtout utilisé pour la fonte de l'or et de l'argent. Leur durée de vie dépend réellement du caractère de la fonte car si la fusion est bien conduite. Ce creuset très résistant peut effectuer 15 à 20 fontes.

Il est représenté sous deux formes et est numéroté suivant approximativement sa contenance en or:

-forme ronde	N°3/0 correspondant à 100 grammes	N°4 correspondant à 4 Kg
	N°2/0 correspondant à 200 g	N°5 correspondant à 5 Kg
	N°0 correspondant à 500 g	N°6 correspondant à 6 Kg
	N°1 correspondant à 1 Kg	N°8 correspondant à 8 Kg
	N°2 correspondant à 2 Kg	
	N°3 correspondant à 3 Kg	

-forme triangulaire	N°3/0 correspondant à 100 g	N°2 correspondant à 2 Kg
	N°2/0 correspondant à 200 g	N°3 correspondant à 3 Kg
	N°0 correspondant à 500 g	
	N°1 correspondant à 1 Kg	



Figure 9: creuset en plombagine

b) Creuset en terre réfractaire

Ce creuset est fabriqué en terre réfractaire, il résiste ainsi à de très grandes températures mais son usure est surtout due à une trop grande utilisation de fondant et de laisser s'encrasser les scories et les cendres à l'intérieur.

Pour une bonne utilisation, il convient de placer le creuset quelques heures avant son utilisation dans une atmosphère chaude et sèche (40 à 60° si possible).

De cette façon, l'humidité qui est toujours absorbée par la terre réfractaire s'évaporerait et les chances de rupture lors de la mise au feu seront considérablement réduites.

Les creusets en terre réfractaire sont représentés sous deux formes :

- les coupelles en terre réfractaire caractérisées par leurs diamètres variant de 6 cm à 14 cm
- les creusets à forme basse en terre réfractaire utilisés spécialement pour les fours à gaz



Figure 10: Creuset en terre réfractaire n°3

3) Différents types de lingotières

Lors de la coulée des métaux comme l'or, les moules de forme diverses sont appelées « lingotières ». Le métal en fusion dans le creuset est versé dans les lingotières qui leur attribueront leur forme, on obtient ainsi soit des barres, des fils et des plaques.

Ainsi, les lingotières sont représentées en plusieurs types selon les formes voulues.

a) -Lingotière à plaque

La lingotière à plaques est fabriquée généralement en fonte et les lingots ainsi obtenus sont en forme de plaques. Les plaques varient suivant les dimensions de la lingotière et de leurs numéros respectifs.

Numéro	Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]
1	100	40	40
2	150	50	50
3	200	55	55

Tableau 4 : dimensions d'un lingot en forme de plaque

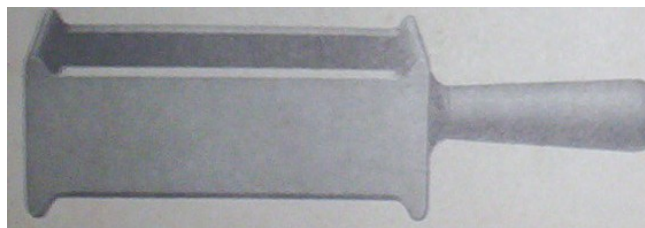


Figure 11 : lingotière à plaque

b) -Lingotière pour fils

La forme des lingots ainsi obtenus est comme son nom l'indique sous forme de fil. La lingotière pour fil est fabriquée généralement en fonte. Le lingot en forme de fil se présente suivant plusieurs dimensions.

Numéro	Longueur des lingots [mm]
1	160
2	230
3	300

Tableau 5 : Longueurs des lingots en fil



Figure 12 : Lingotière à fil

c) -Lingotière à collier

La lingotière en collier est caractérisée par un collier servant à maintenir la moule coulissante qui ajustera la largeur variable du lingot à former. Ce type de lingotière permet d'obtenir des lingots sains car cette moule a été rabotée, dressée et dont toutes les crosses ont été montées à l'extrémité supérieure de la plaque.

Numéro	Longueur des lingots [mm]	Largeur des lingots [mm]	Epaisseur Des lingots [mm]
1	75	40	3
2	75	40	4,5

3	100	50	3
4	100	50	5
5	150	60	4,5
6	150	60	8
7	200	75	6
8	200	75	12
9	250	100	10

Tableau 6 : Dimension des lingots

d) Structure

Un lingot résulte d'une coulée dans une moule globalement parallélépipédique ; en général, il s'agit d'une pyramide tronquée à base rectangulaire afin de pouvoir démouler le lingot. Le refroidissement se fait par l'extérieur ; en conséquence, il se crée un gradient de température : le cœur du liquide est plus chaud que les bords. La solidification commence donc par les bords et se termine par le centre.

Il en résulte en général une structure typique en trois couches :

- structure dite « colonnaire » au bord, suivie d'une structure dendritique,
- puis au cœur, une structure équiaxe.

Le métal diminuant de volume lors de la solidification : le haut du lingot, qui est à l'air libre, présente en général un creux appelé retassure . Si le métal a été mal dégazé, il va présenter en surface des criques, sorte de sillons ressemblant à des fissures, et des pores à l'intérieur.

Cependant, cette structure n'est pas systématique ; cela dépend grandement de la vitesse de solidification, de la direction de solidification. On peut volontairement isoler certaines parties du moule pour avoir une solidification dirigée.

4) **Vérification de la finesse ou titre [III]**

Les analyses de la finesse ou du titre d'or sont définies comme la connaissance du pourcentage de l'or dans l'alliage. A cet effet, il existe plusieurs méthodes pour savoir la finesse ou le titre d'or de la pièce à vérifier.

a) **Utilisation de la pierre de touche (au touchau)**

De toutes les vérifications de finesse, cette méthode reste la plus facile et la plus rapide à effectuer.

Cette méthode permet de déterminer avec précision le titre en or, argent ou platine d'un alliage brut ou d'un objet façonné.

La pierre de touche est une variété de jaspe noir, inattaquable à l'acide nitrique et un touchau, instrument présentant plusieurs échantillons d'or à divers titres, fixés soit au bout de tiges articulées autour d'un pivot , soit à l'extrémité des branches d'une étoile et pour finir une dilution d'acide nitrique et d'acide chlorhydrique.

L'apport de cette vérification est très bénéfique pour les orfèvres et les bijoutiers car il ne nécessite que 0,0005 gramme (état de trace) ce qui permet aux essayeurs de ne pas appliquer un essai destructif. Avec des réactifs appropriés, l'analyse pourrait déterminer de manière qualitative la présence de métaux communs comme le nickel, le fer et le zinc...

D'une manière générale, cet essai permet de savoir le titre réel d'un alliage déjà affiné ou non.

- **Matériels utilisés**

- Pierre de touche

- Toucheau

-Acides assortis

- **Dimension des pierres de touche**

Les pierres de touche sont généralement noires et surtout extra dures. On peut les classer en trois catégories suivant leurs dimensions :

Petites : 45×25×7 mm

Moyennes : 60×40×8 mm

Grandes : 120×60×10 mm

- **Mode opératoire**

-traçage d'un trait sur la pierre de touche avec le métal que l'on désire connaître la finesse et un autre trait avec l'alliage dont on sait le titre à l'usage de la branche du toucheau.

-Mettre une goutte d'acide convenue à ce titre sur chaque trait. Comparer les couleurs, s'il y a ressemblance, on peut conclure que les deux objets sont de même titre.

b) L'essai par coupellation

Cette méthode est spécialement utilisée pour la détermination de la teneur en or et en argent. C'est la méthode la plus ancienne d'analyse. Cet essai procède son analyse par l'utilisation de la propriété du plomb qui, en fusion permet de dissoudre à haute température les oxydes des métaux communs.

Extrêmement précise et d'un coût assez faible, la coupellation permet de déterminer des titres jusqu'à un dixième de millièbre soit 0,1 gramme.

c) **L'essai par spectrométrie et par rayons X**

Les avantages que constitue cet essai résident dans l'automatisation et la rapidité de l'analyse effectuée.

Par la souplesse d'utilisation des machines spectromètres, elle permet aussi de faire un seul essai pour connaître simultanément les valeurs des autres composantes y compris le non précieux de l'alliage considéré.

Toutefois elle présente des inconvénients au niveau de la précision par rapport aux autres méthodes traditionnelles telles que les essais par coupellation.

Le rayon X, en raison de son coût élevé et de la complexité de son utilisation, seules les grandes fonderies ont pu perfectionner ce type d'analyse avec précision.

Son fonctionnement s'explique par un balayage de surface afin de déterminer la quantité d'atome de chaque élément.

d) **Le poinçon [I]**

Le lingot ainsi obtenu, suit quelques règles générales concernant son identification. On lui attribue en quelque sorte une marque généralement appelée « poinçon ». La présence du poinçon atteste l'authenticité de l'ouvrage et renseigne sur sa provenance, la nature du métal utilisé et son titre.

De ce fait, il existe différents types de poinçons dont :

-le poinçon de responsabilité : il est caractérisé par une inscription dans une ovale affectée par un symbole et les initiales du professionnel

-le poinçon de titre : celui-ci garantit le pourcentage de métaux précieux entrant dans la composition du produit. Il est apposé soit par le fabricant ou l'importateur s'ils ont eu l'accréditation de l'Etat, soit par le bureau de garantie ou par des organismes de contrôle agréés.

En somme, les lingots doivent impérativement comporter sur leurs faces :

- un numéro d'enregistrement de l'essayeur
- le titre d'or qui doit être au moins égal à 995/1000
- d'un cachet d'un fondeur reconnu
- d'un poinçon de l'essayeur
- d'un certificat daté et signé par un essayeur agréé.

Conclusion

Nous résumons à travers la partie précédente les divers rappels qui nous ont servi d'introduction dans la conception et la réalisation de l'unité mais aussi de nous mettre en connaissance avec le monde des bijoutiers malgaches à travers leurs ateliers de travail, leurs outils quotidiens et des problèmes auxquels ils sont confrontés.

En somme, le contexte général étant établi dont le procédé de fabrication des lingots, les aspects techniques pour la fusion de l'or mais aussi pour l'obtention des titres correspondant aux normes suivant les divers procédés d'affinage.

PARTIE II : CONCEPTION ET REALISATION DE L'UNITE AMELIOREE

CHAPITRE III.L'UNITE DE FABRICATION

Le présent chapitre nous mènera à travers la conception et la réalisation de l'unité de fabrication, pour cela nous verrons au fur et à mesure les différentes étapes de la fabrication à savoir les différents matériels utilisés et leurs caractéristiques.

I-L'unité utilisée par les bijoutiers

Avant d'aborder les chapitres suivants, nous pensons qu'il est nécessaire de savoir les activités des bijoutiers concernant la fabrication de lingot, les matériels qu'ils utilisent et les problèmes quotidiens auxquels ils sont confrontés, pour bien cerner les améliorations qu'il faudrait apporter dans ce domaine.

1) Les activités des bijoutiers concernant la fabrication de lingot

Pour le cas des artisans bijoutiers malgaches, il est nécessaire pour l'artisan de passer par l'étape de fabrication de lingot pour obtenir les bijoux afin de faciliter le travail de l'or.

L'or travaillé dans une bijouterie se diversifie par sa nature :

- l'or provenant de la carrière
- l'or provenant du reste des limailles ou de vieux bijoux

Suivant ces états, la préparation du métal s'effectue par étapes :

- affinage des restes de limailles
- Méthode chimique pour récupérer l'or dans les vieilles pièces de bijoux
- la fonte du métal avec ou sans alliages
- obtention du lingot

2) L'atelier de travail

Le travail de bijoutier s'acquiert souvent d'une lignée parentale ou à des habitudes familiales.

Cependant, confronté à un travail de subsistance, c'est-à-dire obligé à réduire au maximum les dépenses, les bijoutiers malgaches se restreignent à une fabrication très artisanale.

A cet effet, l'atelier de travail reste très traditionnel et modeste et n'a encore jusqu'à présent connu de réelles modifications.

a) Principe

Le principe repose sur la combustion de l'essence. Celle-ci est stockée dans un réservoir d'ancien primus. L'air est amené dans le réservoir par le biais du soufflet qui va se mélanger avec l'essence qui donnera le gaz utilisé pour fondre ou souder les métaux comme l'or.

b) Les matériels utilisés

- Le soufflet à pédales

Le soufflet à pédales est fabriqué artisanalement à partir de planches de bois comme socle et ensuite enveloppé par des peaux de chèvre nécessaire pour le mouvement d'aspiration et de refoulement du soufflet.

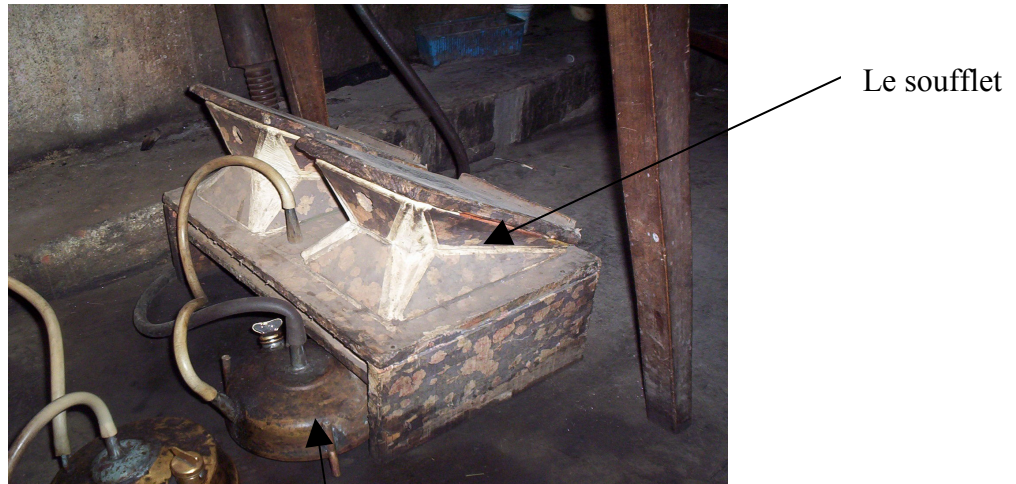


Figure 13 : le soufflet à pédales et le réservoir d'ancien primus

Réservoir

Le laminoir complète le matériel de l'artisan bijoutier pour l'obtention de bijoux. Le lingot ainsi obtenu, est laminé pour obtenir des fils ou des plaques suivant les demandes pour faciliter le travail de confection.



Figure 14 : Laminoir à fil

c) Les problèmes rencontrés

Lors de nos enquêtes, nous avons pu approcher quelques bijoutiers artisans malgaches de la capitale et on a pu assister à quelques opérations de confections de bijoux. Des problèmes se posent au niveau du travail de ces artisans à savoir :

- le soufflet à pédales demande au bijoutier beaucoup d'effort à fournir
 - le réglage de la flamme par le pédalier relève beaucoup de l'empirisme et de l'habitude, pas de réglage de débit d'air ;
 - le réglage du débit d'air se fait en fonction de la force appliquée par le bijoutier sur le soufflet ;
 - Le calcul des paramètres physiques relève également de l'habitude ;
 - le débit d'air obtenu par le soufflet à pédales est insuffisant pour obtenir une flamme très chaude, c'est pour cela que lors de la fonte de plusieurs grammes d'or de l'ordre de 100 grammes , le bijoutier requiert l'utilisation du charbon de bois additionnée au soufflet ;
 - l'emploi du bois servant de creuset lors d'une fonte ;
 - la lingotière ne répond pas aux normes techniques (creusée dans une brique)
- Pour le cas de Madagascar, les lingots étant absents sur le marché national et surtout ne pouvant rivaliser avec ceux des lingots internationaux, le poinçonnage ne s'applique qu'à la fabrication des bijoux.

De ce fait, on appose aux bijoux le poinçon du fabricant agréé puis on l'accrédite du poinçon octroyé par les autorités compétentes en la matière qui sont représentées par le Laboratoire des Mines et de la Géologie à Ampandrianomby.

II-Notre unité de fabrication

S'il en est ainsi de l'atelier de fabrication actuelle de lingot, notre étude ambitionne d'améliorer dans le sens d'une meilleure rentabilité et d'apporter une note de modernisme aux matériels utilisés.

- 1) **MOYENS MATERIELS REQUIS**
 - a) **Le combustible**
 - **Généralités sur les combustibles**

Le combustible brûle plus ou moins vite et à des températures différentes, en fonction de sa nature. Il est souvent formé de carbone et d'hydrogène, et il est d'origine minérale, végétale, ou plus rarement animale.

Il se présente soit :

- sous forme solide : bois, charbon, graisses
- sous forme liquide : pétrole, huile, essence, alcool
- sous forme gazeuse : méthane, hydrogène, oxygène

Dans notre étude, nous avons utilisé de l'essence qui est un combustible liquide. L'utilisation du butane ou du propane comme combustible se révèle être trop coûteuse par rapport à l'essence pour la réalisation du projet.

- **Sa composition**

L'essence est un mélange complexe d'hydrocarbures pétroliers. La composition en hydrocarbure dépend de facteurs comme l'origine du pétrole brut soumis au raffinage et des conditions de raffinage.

En général, les hydrocarbures comportent une chaîne de 4 à 12 atomes de carbone, ce sont principalement des alcanes, iso alcanes, des cyclanes et des composés aromatiques.

Il est composé essentiellement d'octane, nous l'assimilerons donc à de l'octane lors des calculs.

- **Son obtention**

Il est obtenu à partir d'un mélange de produits de raffinage et de la distillation du pétrole. Ces produits sont directement utilisés après une transformation chimique de leur structure par les divers procédés suivants :

- le craquage ou cracking : raccourcissement des longues molécules d'hydrocarbures en unités plus courtes donc plus légères

-le reformage catalytique ou reforming : transformation des molécules linéaires d'hydrocarbures en molécules ramifiées sans changer le nombre d'atome.

-rajout de produits légers : de l'iso-octane destiné à ajuster la volatilité de l'essence

Masse volumique : 700 Kg /m^3

Densité de l'essence liquide : inférieure à l'eau $0,755 \text{ [Kg/l]}$

Pouvoir calorifique : 44.10^3 [Kj/Kg]

Chaleur massique propre : $2,02 \text{ [KJ/Kg. deg}^\circ\text{K]}$

Chaleur latente de vaporisation : 350 KJ/Kg

- **Volatilité**

Le passage d'un état solide à un état liquide ou liquide vers un état gazeux n'est pas instantané. A la surface du liquide, il y a toujours plus ou moins de molécules qui s'échappent dans l'air : c'est l'évaporation.

Donc plus la température du liquide est basse moins il y a d'évaporation, et au contraire, plus la température est élevée, plus il y en a.

L'essence est un liquide très volatile, cette évaporation facile de l'essence est caractérisée par son point éclair assez faible que nous expliquerons dans le processus de fonctionnement.

- **Indice d'octane**

L'indice d'octane est défini comme un indice déterminé en laboratoire qui mesure la résistance de l'essence à l'auto inflammation, c'est-à-dire à ses propriétés anti-détonantes. L'indice d'octane est déterminé par la composition du mélange d'un produit détonant, le n-heptane (indice 0), et d'isooctane, très résistant à la détonation (indice 100).

b) Le Comburant

Par définition, le comburant est un corps mélangé avec le combustible pour que la combustion ait lieu. Le comburant utilisé se présente sous forme gazeuse, ce n'est autre que l'oxygène provenant de l'air, ou bien l'oxygène conditionné sous pression dans des bouteilles.

L'oxygène est un gaz incolore, insipide et inodore qui provient de l'air environnant, il représente les 20% en fraction de l'air complémentaire à l'azote. Cet élément présente aussi quelques propriétés dont :

-sa densité qui est de $10,53 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$ par rapport à l'air

Dans notre projet, l'oxygène utilisé pour la combustion provient de l'air aspiré et refoulé du ventilateur pour servir de comburant au combustible.

• Approvisionnement en air

LE VENTILATEUR CENTRIFUGE

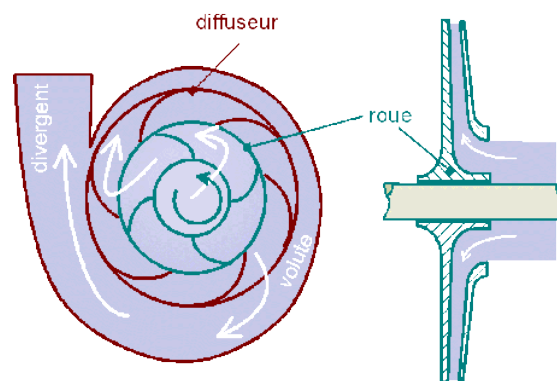


Figure 15 : Le ventilateur centrifuge

• La roue

Elle comporte des canalisations formées par le disque, les flasques de recouvrement et les aubages.

• Le distributeur

Le rôle du distributeur, situé en amont de la roue (non représenté sur la figure) est de permettre une orientation correcte des filets fluides à leur entrée dans la roue. Il n'existe en fait que dans les pompes à plusieurs étages de compression. Il permet alors d'effectuer la liaison entre l'étage amont (au niveau de la volute) et l'étage aval (au niveau des ouïes).

- **Le diffuseur**

Avec ou sans aubages, cet organe permet de transformer en partie l'énergie cinétique (pression dynamique), en énergie potentielle (pression statique) et d'orienter correctement le fluide à la sortie de la roue pour son entrée dans la volute ou dans le distributeur de l'étage suivant.

- **La volute**

Son rôle consiste essentiellement à transformer le mouvement de rotation du fluide en mouvement de translation.

- **Le divergent**

Comme le diffuseur, il permet de transformer une fraction de l'énergie cinétique du fluide en énergie potentielle, ceci afin de limiter les pertes de charge dans les canalisations de transport du fluide.

- **Ecoulement de l'air**

- Description**

Le ventilateur centrifuge est formé d'aubes inclinées vers l'arrière, appelés aussi « à réaction ». La roue de ces ventilateurs comprend un nombre réduit d'aubes de plus grande hauteur. Elles sont inclinées dans le sens inverse de la rotation de la roue.

- Dimensionnement**

Une combustion stoechiométrique est obtenue lorsque le mélange idéal est atteint. D'après les calculs de combustion, on a besoin de 15 grammes d'air pour brûler 1 gramme d'essence. Nous obtenons donc le volume d'air V_{air} nécessaire à la combustion par la relation :

Soit m_1 la masse d'air nécessaire pour brûler 1 gramme d'essence : $m_1 = 15 \text{ g}$

$$m_1 = \rho_{air} \times V_{air} \Leftrightarrow V_{air} = \frac{m_1}{\rho_{air}} = \frac{0,015 [Kg]}{1,29 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]} = 0,011 [m^3]$$

$$V_{air} = 0,011 [m^3]$$

Et par analogie au ventilateur, le volume d'air obtenu pour brûler 1 gramme d'essence (0,011) est comprise parmi les valeurs des débits volumiques associés à notre ventilateur.

$$0,0076 < 0,011 < 0,015 \text{ avec}$$

$0,0076 \text{ m}^3$ le volume d'air obtenu au débit q_1 et $0,015 \text{ m}^3$ le volume d'air obtenu au débit q_2

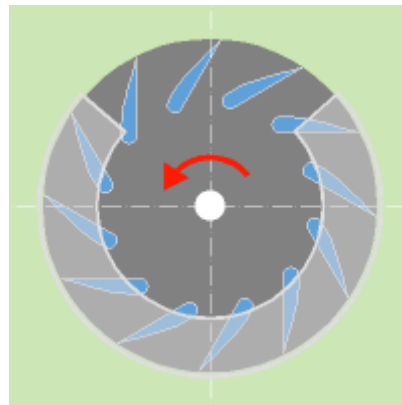


Figure 16 : Aubes recourbées vers l'arrière

Le ventilateur est muni d'une plage de vitesse pour le réglage de la variation de la vitesse de rotation pour ainsi augmenter le débit.

Le choix dans l'utilisation de ce ventilateur réside dans le fait que les pertes occasionnées par le mode de transmission sont moindres car le moteur est à entraînement direct, c'est-à-dire que la roue est directement calée sur l'arbre du ventilateur.

c) Les flexibles

Dans un premier temps, l'air provenant du ventilateur est transporté vers le réservoir contenant le combustible par l'intermédiaire d'un raccord conique puis d'un flexible à gaz en caoutchouc.

Le raccord conique est surtout utilisé non seulement pour l'écoulement de l'air mais il trouve également son utilité dans l'atténuation de l'effort fourni par le moteur si le raccord avait un rétrécissement brusque.

Dans la deuxième étape, un flexible à gaz est aussi utile pour la circulation du mélange air/essence ou mélange carburé du réservoir vers le chalumeau.

Nous avons utilisé à cet effet un flexible dont les caractéristiques sont :

GAZ 8×13, pression maximale admissible : 8 [bar]

d) Le réservoir

Le réservoir est utilisé pour stocker l'essence utilisée. De ce fait, elle est pourvue d'une petite trappe pour l'admission de l'essence. Au repos et en mouvement les paramètres de température et de pression dans le réservoir se font dans des conditions normales. Nous sommes en présence d'un écoulement isotherme car au niveau du chalumeau, l'air n'est ni retenu ni stoppé.

La température est donc approximativement de 20[°C], la pression est de 1 [atm].

Volume du réservoir : 1000 ml

Le réservoir est obtenu de manière à ce que son volume total corresponde au volume d'essence liquide additionné du volume d'essence évaporée.

Comme notre essence liquide subit ici un réchauffement à pression constante, le volume varie très peu.



Figure 17 : le réservoir

e) **Le chalumeau**

Le chalumeau est un outil pour mélanger le comburant et le combustible.

L'écoulement des gaz frais avant la combustion s'effectue dans le chalumeau. En général, il est composé de :

- un robinet
- une manche
- un mélangeur
- entrée des gaz

Notre projet requiert un chalumeau un peu spécial, certes, dû au mélange préalable du combustible et du comburant.

Il est caractérisé par une veilleuse non réglée par le robinet pour obtenir un meilleur brassage du mélange.



Figure 18 : Le chalumeau

f) **Le creuset : [VI]**

Notre creuset a été taillé dans une brique réfractaire.



Figure 19 : Le creuset en matériau réfractaire

g) **La mouvette**

La mouvette a pour rôle d'être l'agitateur du métal en fusion dans le creuset. Pour qu'elle résiste à la température élevée de la fusion, elle est conçue en terre réfractaire et sa forme ressemble à une spatule.

h) **La lingotière [VI]**

La lingotière est faite en terre réfractaire pour pouvoir soutenir la température élevée de fusion de l'or. L'élaboration des faces auxquelles le métal prendra forme a été énergiquement travaillée, polie pour obtenir une surface assez lisse pour éviter les différents scories, bulles d'air qui affecteront davantage notre lingot.

Pour de plus amples utilisations, nous avons fabriqué une lingotière aux dimensions variantes selon la quantité d'or pour obtenir des lingots parallélépipédiques de différentes tailles. Cette variation s'effectue suivant la largeur et la longueur.

Elle est formée de deux cornières coulissantes placées sur un socle permettant d'obtenir les dimensions variées.

Les dimensions obtenues sont :

- une longueur maximale de 70 mm
- une largeur variable de 0 à 90 mm maximum
- une épaisseur de 5 mm

Pour obtenir des lingots bien parallélépipédiques, on doit maintenir les cornières coulissantes par un sert - joint serré par boulonnage.

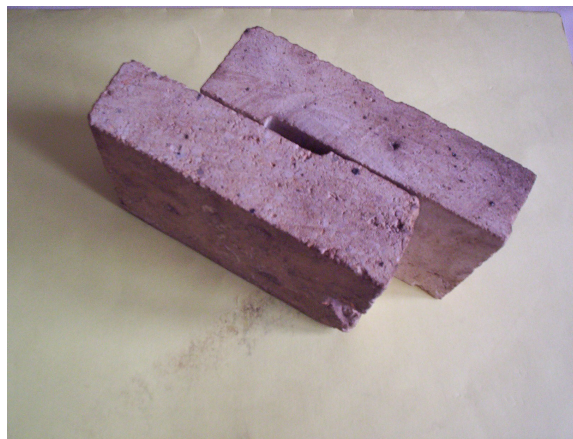


Figure 20 : lingotière

i) Le borax

Le Borax joue un rôle très important dans la transformation de l'or, il est principalement utilisé comme fondant lors de la fonte de l'or.

Il intervient surtout pour faciliter l'abaissement de la température de la fusion de l'or et du nettoyage de la fonte pour enlever l'or de ses impuretés. Le borax sert donc à dissoudre les métaux communs ou à les empêcher de se former.

Le borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) est un composé du bore appelé aussi tétraborate de sodium ou borate de sodium

Masse moléculaire	381,37
Température de fusion	75 °C
Température de vaporisation	320 °C
Solubilité	5,1 g/100 ml d'eau (20 °C)
Densité	1,73

j) L'huile

L'huile est employée pour la phase finale de la fabrication car elle est appliquée à la lingotière. Elle sert à faciliter la descente de la coulée dans la lingotière.

k) Proportion de borax dans la fonte

La proportion du borax dans la fonte est de l'ordre de quelques pincées car elle s'applique davantage au fur et à mesure que la fonte en a besoin.

l) L'installation [VI]

Notre unité est donc formée d'un seul bloc. Il englobe en un bloc le chalumeau, réglable en hauteur par rapport au creuset,

Le creuset est mobile sur un axe pouvant être positionné suivant la variation de la largeur lingotière. Pour faciliter la coulée, le creuset repose sur une bascule permettant un mouvement de rotation du creuset à 90 ° pour être dans un même plan que la lingotière.



Figure 21 : L'unité réunissant le chalumeau, le creuset et la lingotière

Conclusion

Précédemment nous avons pu voir les différents matériels requis à la conception et à la réalisation de notre unité, puis nous entrerons maintenant dans la compréhension des faits observés par le processus de fonctionnement.

CHAPITRE IV.PROCESSUS DE FONCTIONNEMENT

I-PARAMETRES : L'ESSENCE ET L'AIR

1) Réglage de l'écoulement

Le ventilateur que nous employons peut fonctionner sur une certaine plage de vitesse de rotation désignée w .

On admet alors que le débit - volume q est proportionnel à w par l'expression :

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{w_1}{w_2} \quad (\text{IV-1})$$

D'autre part l'écoulement est toujours turbulent, on admet aussi que la pression totale ou gain de charge apporté au ventilateur est sensiblement proportionnel au carré du débit.

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{q_1}{q_2}\right)^2 = \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 \quad (\text{IV-2})$$

2) La volatilité de l'essence

La volatilité de l'essence dans le réservoir est due à plusieurs facteurs, d'une part, à partir de ses propriétés physiques et d'une autre part par la turbulence causée par l'écoulement de l'air dans le réservoir.

a) Définition du point éclair

Le point éclair d'un liquide est défini comme la température la plus basse à laquelle ce liquide libère par évaporation à la surface, assez de molécules pour s'enflammer avec l'air en présence d'une flamme.

Chez les liquides, ce point éclair varie selon leurs compositions, mais en règle générale :

-les liquides avec un point éclair inférieur à 37,8°C sont classifiés comme liquides inflammables

-les liquides avec un point éclair supérieur ou égale à 37,8°C et inférieur à 93,3°C sont appelés liquides combustibles

Dans notre unité de fabrication, l'essence est le liquide utilisé et elle possède un point éclair inférieur à -40°C, qui est strictement inférieur à 37,8°C, c'est donc un liquide

très inflammable et c'est pourquoi il est très volatile car la température de notre unité se situe à une température à condition normale.

La température ambiante avoisinant les 20°C, l'essence a donc déjà libéré par évaporation assez de molécules à sa surface.

b) La pression ou la tension de vapeur

Elle ne dépend que de la nature du liquide et augmente très rapidement avec la température. La pression ou la tension de vapeur se caractérise donc par l'aptitude du carburant à se vaporiser.

L'essence est un liquide très volatile, sa tension de vapeur est donc très grande.

Une vapeur n'existe alors que si sa pression p est inférieure à une valeur maximum appelée tension de vapeur notée p° et si :

-Si $p < p^\circ$ il n'y a pas de liquide, la vapeur est dite sèche.

-Si $p = p^\circ$ la vapeur est en présence de liquide en quantité plus ou moins importante : elle est dite saturée, saturante ou humide.

-Enfin si $p > p^\circ$ le liquide occupe tout le volume, il n'y a pas de vapeur.

Dans notre cas, le deuxième cas est le phénomène qui se passe dans le réservoir

La tension de vapeur p° d'un liquide est indépendante de la quantité de liquide présente dans le réservoir.

c) **La vitesse d'évaporation**

La vitesse d'évaporation est la masse de liquide vaporisé par unité de temps. Elle dépend de plusieurs facteurs.

- **Surface libre du liquide**

La vitesse d'évaporation est proportionnelle à la surface libre du liquide.

- **Tension de vapeur du liquide et pression partielle de vapeur dans l'atmosphère**

La vitesse d'évaporation est proportionnelle à la différence ($p^\circ - p$) entre la tension de vapeur p° du liquide à la température de ce liquide et la pression partielle et locale p de la vapeur déjà répandue dans l'atmosphère au-dessus de la surface libre.

Autrement dit, la vitesse d'évaporation est d'autant plus grande qu'on est loin des conditions de l'équilibre liquide - vapeur, c'est-à-dire lorsque p° est grand et p petit.

- **La chaleur latente de vaporisation**

Elle se définit comme la quantité de chaleur nécessaire pour voir transiter l'unité de masse de fluide de l'état liquide vers l'état vapeur.

A partir des vapeurs formées à la surface, l'air provenant du ventilateur centrifuge additionné à ces vapeurs d'essence constitue un mélange gazeux qui s'enflamme en présence

d'une étincelle ou d'une flamme et sert aussi le transport du mélange grâce à son écoulement continu.

3) Etude du mélange air- carburant :

a) Masse volumique du mélange

Pour la détermination de la masse volumique du mélange air carburant, considérons l'hypothèse telle que quand le combustible liquide est pulvérisé, ses molécules sont éparpillés et l'on peut l'assimiler à un gaz affecté par une certaine valeur appelée richesse notée « r » tel que :

$$r = \frac{V_{gaz}}{V_{gazst}} \quad (IV-3)$$

De plus la conservation de masse nous permet d'écrire la masse et la masse volumique du mélange obtenu telle que :

$$m = m_{air} + m_{carb} \quad \text{et} \quad \rho_m = \frac{m}{V_m} \quad (IV-4)$$

Et avec considération des masses volumiques et des fractions volumiques de l'air et du carburant désormais gazeuse, on en déduit :

$$m = \rho_{air} V_{air} + \rho_{cgaz} V_{cgaz} = \rho_{air} V_{cgaz} \frac{a_{air}}{a_{cgaz}} + \rho_{cgaz} V_{cgaz}$$

$$m = V_{cgaz} \left(\rho_{air} \frac{a_{air}}{a_{cgaz}} + \rho_{cgaz} \right) \quad V_m = V_{air} + V_{cgaz} = \left(1 + \frac{a_{air}}{a_{cgaz}} \right) V_{cgaz}$$

Par substitution et simplification, on obtient la formule suivante :

$$\rho_m = \rho_{air} a_{air} + \rho_{cgaz} a_{cgaz}$$

L'unité [m³ Normal] du volume du combustible gazeux, le volume stoechiométrique correspondant est :

$$V_{gaz} St = \frac{1}{r} \quad (IV-5)$$

Et le volume d'air correspondant :

$$V_{air} = \frac{K}{r} \quad \text{avec} \quad K = \frac{V_{air}}{V_{carb}}$$

De là, on tire les expressions des fractions volumiques de l'air et du combustible gazeux :

$$a_{air} = \frac{V_{air}}{V_{air} + V_{cgaz}} = \frac{K}{K + r} \quad \text{et} \quad \rho_m = \frac{\rho_{air} K + \rho_{carb} r}{K + r} \quad (IV-6)$$

$$a_{gaz} = \frac{V_{cgaz}}{V_{air} + V_{cgaz}} = \frac{r}{K + r}$$

b) Le mélange air essence : la combustion [IV]

Lorsque le combustible est mélangé avec l'air, et pour que la combustion perdure et se propage, il faut que la concentration du combustible dans le mélange gazeux se situe entre deux valeurs limites :

-LIE ou limite inférieure d'explosivité : la LIE d'un mélange est défini comme le seuil de dosage du combustible en dessous de laquelle la combustion ne peut ni se propager ni s'entretenir, on est donc en présence d'un mélange pauvre.

-LES ou limite supérieure d'explosivité : la LES d'un mélange est le seuil de dosage du combustible en dessus de laquelle la combustion ne peut ni s'entretenir ni se propager, c'est un mélange riche.

Les LSE et LIE sont exprimées en pourcentage de la vapeur du produit par volume dans l'atmosphère. La plupart des produits pétroliers sont inflammables entre 1% et 10 % de la LIE.

En dessous de 1%, le mélange est trop pauvre pour s'enflammer et en dessus de 10%, c'est un mélange trop riche et il se passe le même phénomène.

Pour ce qui est de l'essence, sa LIE est de 1,4% et sa LSE est de 7,6%

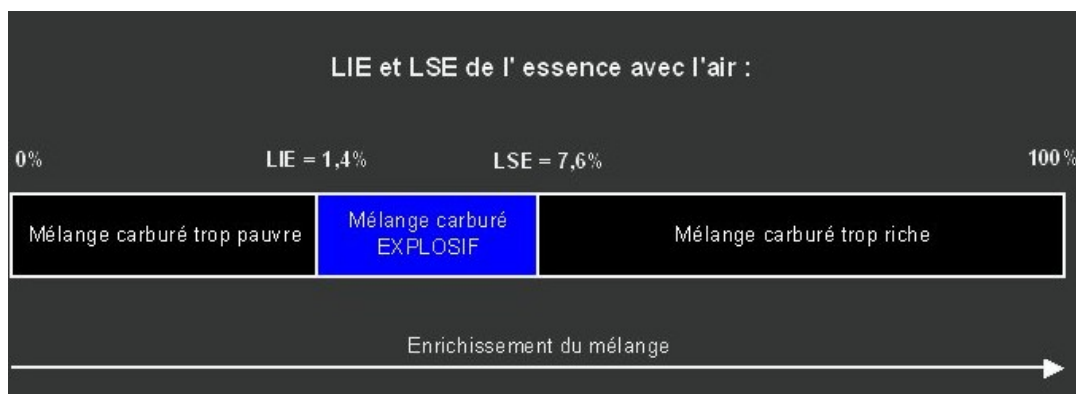


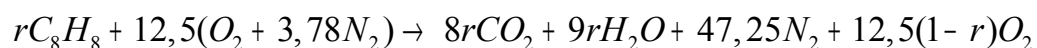
Figure 22 : LIE et LSE de l'essence

II-Processus de combustion au niveau du chalumeau [IV]

A la sortie du brûleur ou du chalumeau, le mélange ainsi constitué entre l'air et l'essence emprunte l'air ambiant ce qui favorise la montée de la température.

Dans notre cas, la combustion parfaite de l'essence est caractérisée par un mélange dont le pourcentage de vapeur est compris entre des valeurs limites citées ci-dessus.

On admet donc une réaction de combustion se rapprochant du réel par l'équation suivante, l'essence est assimilée à de l'octane vu qu'elle en est essentiellement composée :



Avec r: notée richesse du mélange

Pour qu'il y ait combustion parfaite, c'est à dire qu'à la fin de la combustion il ne reste ni essence ni dioxygène. Il faut que les éléments soient correctement dosés, c'est ce qu'on appelle le dosage stoechiométrique. Ainsi la combustion complète du mélange dioxygène/

essence produit de l'eau, du dioxyde de carbone, et de l'énergie provenant de la fission des molécules d'octane.

-dioxygène : O_2

-eau : H_2O

-dioxyde de carbone : CO_2

-azote : N_2

Considérons la réaction de combustion comme un mélange stoechiométrique : $r = 1$

Voici l'équation non équilibrée de la combustion : $C_8H_{18} + O_2 \Rightarrow CO_2 + H_2O$

Il faut maintenant équilibrer l'équation. Il suffit de compter le nombre d'atomes à gauche et à droite.

Equation équilibrée : $1 C_8H_{18} + 12,5 O_2 \Rightarrow 8 CO_2 + 9 H_2O$ (a)

En ajoutant les coefficients ci-dessus, on obtient donc :

La combustion d'une mole d'octane nécessite donc 12,5 moles de dioxygène pour produire exactement 8 moles de dioxyde de carbone et 9 moles d'eau.

D'après le tableau de Mendeleïev : C = 12 g/mol ; H = 1 g/mol ; O = 16 g/mol.
On peut donc connaître la masse d'une mole d'octane C_8H_{18} : $(8 \times 12) + 18 \times 1 = 114$ g.

Il nous faut maintenant calculer la masse de l'air. Dans l'équation (a) nous avons 12,5 moles de dioxygène, soit 12,5 moles d'air puisque le dioxygène n'est pas séparé de l'azote dans l'admission.

Remarquons que l'air n'est pas composé de 100% d'oxygène, mais d'environ :

-20% de dioxygène

-80% d'azote

On obtient ainsi la masse d'une mole d'air ($O_2 + 3.76 N_2$) : $2 \times 16 + 3.76 \times 2 \times 14 = 137.28$ g

La masse d'air nécessaire pour brûler une mole d'octane est donc : $12.5 \times 137.28 = 1716$ g

Au final il faut donc 1716 g d'air pour 114 g d'essence, soit 1g d'essence pour 15.1 g d'air.

Dans la pratique, la valeur de référence utilisée sera 1 g d'essence pour 14.7 g d'air car l'essence ne contenant pas 100% d'octane, mais également de l'heptane et des additifs.

La limite d'incombustibilité (mélange trop riche) est de 1/8, la limite d'inexplosivité (mélange trop pauvre) de 1/28 en pourcentage de volume

La maîtrise de la combustion repose avant tout sur le respect de ce dosage, qui conditionne la puissance et la consommation. La première difficulté est la vaporisation de l'essence dans l'air, puisque l'essence à l'état liquide ne permettrait pas de respecter ce dosage. Il est donc indispensable que le carburant soit uniformément réparti dans l'air, c'est à dire que le mélange soit homogène, afin que le dosage soit respecté en tout point du mélange.

1) La température de combustion

a) La flamme

• Définitions

A l'issue d'une étincelle, on observe une flamme qui est un phénomène lumineux résultant de la combustion d'un mélange gazeux. Mais qui dit flamme, dit dégagement de chaleur, transfert de chaleur.

Vaporisé en gouttelettes dans l'air, le liquide inflammable brûle violemment à l'apport d'une flamme : chaque gouttelette est entourée de comburant, l'air, et brûle instantanément, en provoquant par la montée de température et de pression, la combustion des particules voisines.

La flamme ainsi obtenue est donc une réaction en chaîne de la combustion des vapeurs d'essence.

La combustion étant progressive, il y a un front de flamme qui se déplace dans le nuage de vapeur, on est donc en présence de différentes zones au fur et à mesure que la flamme se déplace d'une particule d'essence à une autre jusqu'à la dernière.

- **Caractéristiques de la flamme**

- Flamme pré - mélangée**

Dans notre cas, la flamme est issue d'un mélange antérieur de l'air combustible car l'air est admis dans le réservoir contenant l'essence évaporée.

Nous obtenons ainsi avant la combustion même, un pré – mélange d'air et de vapeur d'essence.

- Anatomie de la flamme - front de flamme**

La flamme de pré – mélange étant définie précédemment, son aspect ou sa structure est généralement caractérisée par une flamme se rapprochant de la couleur bleue.

Et même si le mélange n'est pas idéal, l'osmose des réactants fait que la combustion est plus efficace.

La flamme est donc plus chaude et ne produit pas beaucoup de particules imbrûlées.

On caractérise la flamme par une mince couche de gaz qui est la frontière entre deux milieux :

- les gaz frais : le mélange combustible comburant

- les gaz brûlés : les produits de réaction de l'autre

- Propagation de la flamme**

La propagation de la flamme est régie par trois paramètres principaux qui définissent la qualité de la flamme obtenue :

- les proportions du mélange

-la température des gaz frais : plus la température est élevée, proche de la température provoquant l'inflammation spontanée, plus la propagation est élevée

-l'écoulement des gaz : les obstacles et les turbulences modifient la progression de la flamme.

- **Température de la flamme de pré mélange**

On définit la température de la flamme, la température maximale pouvant être atteinte par le mélange de l'air avec l'essence. Et cette température dépend principalement de la proportion du mélange carburé définie par la plage de pourcentage de la LIE et la LSE.

Quand le combustible et l'air se mélangent avant la combustion, l'allumage du mélange combustible / air peut libérer une énorme quantité d'énergie et la température de la flamme augmente considérablement à des proportions correctes de mélange.

Conclusion

Cette partie vise à présenter les différents matériels requis pour la réalisation de l'unité de fabrication mais aussi d'apporter une explication au processus de fonctionnement. Les essais et les calculs simples des coûts font l'objet de la partie suivante.

PARTIE III : ESSAIS EXPERIMENTAUX

CHAPITRE V.LES ESSAIS EXPERIMENTAUX

Ce chapitre comportera les essais se référant à notre unité. Les essais permettront de donner une valeur aux différents paramètres essentiels.

I-Calcul du débit

Le ventilateur centrifuge est doté d'une plage de vitesse de rotation variant de 265 tr/minute à 1590 tr/minute (1600).

Suivant les formules données dans le chapitre IV, nous obtenons le débit q du ventilateur dont :

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

Vitesse de rotation w [tr/min]	Débit volumique q [m ³ /min]
265	0,46
530	0,92
795	1,38
1060	1,84
1325	2,31
1600	2,8

Tableau 7 : les vitesses de rotation et les débits volumiques

II-ESSAI SUR L'OR

L'obtention du lingot passe par plusieurs étapes. En effet, son obtention dépend de la nature de l'or que nous avons à transformer en lingot.

La source primaire d'approvisionnement des métaux précieux est l'extraction à partir des minerais.

Le circuit secondaire concerne le recyclage des métaux issus de déchets et rebuts qui, traités dans un circuit d'affinage approprié, deviendront des métaux neufs.

Le lingot à partir des vieux bijoux et des déchets nécessite un processus d'affinage pour obtenir de l'or pur car ils sont alliés avec d'autres métaux tel que le cuivre, l'argent etc...

1) Procédé

Le processus consiste à fondre chaque part de l'or que l'on souhaite affiner avec quatre part de cuivre. Une fois le métal fondu, il est laminé en 3/10 de millième environ et coupé en tronçon d'environ 1cm.

Ensuite on plonge l'alliage dans une solution d'acide nitrique et d'eau en part égale pour éviter les projections éventuelles. Quand on atteint le point où en rajoutant de l'acide le métal ne bout plus, la réaction peut être considérer comme terminer.

Ensuite on procède à l'élimination de l'acide par décantation en rajoutant de l'eau distillée dans le récipient. Une fois filtrer et sec l'or peut être fondu.

La purification est efficace dans bien des cas mais ne peut éliminer entièrement le plomb et les autres métaux. En outre il ne permet pas d'obtenir de l'or à 1000 millièmes mais

seulement à un titre qui s'en approche. Une fois le processus achevé il est nécessaire d'en analyser le titre.

2) Volatilité de l'or

Lors de nos expérimentations, nous avons pu constater que lors de la fonte de l'or, il existe une certaine perte de poids.

Cette perte a été estimée à environ moins de 3%, et elle est en fonction de la durée de la fusion et de la température à laquelle on la porte.

III-ESSAI SUR LE CUIVRE

En dépit de la rareté et du coût de l'or, l'essai s'est effectué par la fabrication de lingot à partir du cuivre.

Le cuivre étant le métal ayant des propriétés physico-chimiques se rapprochant le plus de celles de l'or.

Température de fusion 1357,2 [K]

a) Fabrication du lingot :

-Essai sur 15 grammes de Cuivre

La fonte du cuivre étant plus difficile, que celle de l'or à cause de sa dureté plus élevée, nécessite qu'il soit allié avec de l'argent pour faciliter la fusion. Lors de notre essai sur 15 grammes de cuivre, la fonte a nécessité 4 grammes d'argent, nous obtenons donc un lingot de 19 grammes

b) Matériels utilisés

-creuset

- Borax
- Huile
- mouvette
- essence : environ 40 ml

- un chalumeau de grande taille
- Lingotière
- coupeaux de cuivre 14 grammes
- coupeaux d'argent 5 grammes
- électricité
- acide

c) **Procédé**

Pour obtenir le lingot, on passe par plusieurs étapes :

- huiler la lingotière pour que la coulée glisse bien sur la paroi
- Chauffer le creuset
- fondre du cuivre et de l'argent : la fonte dure à peu près 5 à 10 minutes, l'ajout du borax en petites pincées est indispensable durant la fonte car il l'accélère et il abaisse également la température de fusion des métaux
- La coulée dans la lingotière : quand le cuivre en liquide est obtenu, elle exige une certaine rapidité pour verser le contenu du creuset dans la lingotière, le creuset étant continuellement chauffé par chalumeau pour maintenir liquide l'état du cuivre lors de la coulée.
- Laisser refroidir le lingot
- Traiter par une brosse pour avoir un bon lingot

d) Résultat

A partir de ces expériences, nous avons obtenu un lingot de cuivre allié avec de l'argent de 19 grammes. La coulée étant très rapide, la solidification presque instantanée, la présence des retassures ou des différentes traces sont présentes dans notre lingot.



Figure 23 : le lingot de Cuivre allié avec l'argent

IV-Mesures de sécurité

Pour mieux nous aider et nous préserver des éventuels accidents dans la manipulation de l'unité de fabrication, quelques mesures de sécurité et de prévention sont importantes.

1) Mesures concernant l'unité

L'essence, dérivée du pétrole, est un liquide de catégorie inflammable et très volatile. En effet son usage requiert le plus de précaution possible afin d'éviter une explosion comme celle observée dans les moteurs à explosion.

Ainsi, pour éviter un éventuel retour de flamme au niveau du chalumeau vers le réservoir, nous pensons que l'insertion d'un clapet anti-retour à ce niveau mettra fin à cette menace.

2) Mesures concernant le fondeur

Diverses mesures sont proposées pour l'utilisation de cette unité dont :

-le port de masque pour éviter de respirer les dégagements de fumée et les restes de la combustion lorsque celle-ci n'est pas complète ;

- le port de lunettes protectrices pour éviter les éventuelles projections ;

-le port de casque auditif pour éviter la fatigue du tympan par le niveau de bruit excessif occasionné par le ventilateur centrifuge en marche.

CHAPITRE VI.COUT UNITAIRE DE L'UNITE DE FABRICATION ET D'UN LINGOT

Ce chapitre sera consacré au calcul des coûts du prix de revient d'un lingot suivant les dépenses occasionnées et aussi suivant les investissements nécessaires à la réalisation de l'unité de fabrication.

I-Description du projet

D'après l'étude du projet qu'on a vu précédemment, nous devons donc obtenir un lingot d'or à partir de cette unité de fabrication semi - artisanale. Ce chapitre sera donc consacré à décrire les différents investissements, dont les matières premières, les consommables afin d'obtenir le prix de revient de l'unité et celui d'un lingot d'or.

II-Les investissements fixes :

Les investissements fixes sont décrits par les matériels de l'unité elle-même dont le ventilateur, le réservoir, les canalisations, le chalumeau etc....

Voici le tableau résumant ces investissements fixes

Désignation	Coût unitaire (Ariary)	Nombre	Coût total (Ariary)
Ventilateur centrifuge	25 000	1	25 000
Réservoir	6 000	1	6 000
Flexibles	2 000 par mètre	2 [m]	4 000
Chalumeau	12 500	1	12 500
Lingotière	20 000	1	20 000
Main d'œuvre	10 000		10 000
Creuset	2 000	1	2 000

		<u>TOTAL</u>	79 500

Tableau 8: les investissements fixes

Nous obtenons donc le coût de l'unité de fabrication. Il se chiffre à 79 500 Ariary.

III-Les matières premières

L'or constitue essentiellement la matière première utilisée pour un lingot d'or à 99,5 %.

Le prix du gramme de l'or national s'élève actuellement à 45 000 Ariary.

En effet, ce prix subit de nombreuses fluctuations selon le marché de l'offre et de la demande. Très bon marché au niveau des orpailleurs, le prix de l'or s'élève rapidement et finalement ce sont les intermédiaires qui en bénéficient.

Vu la cherté du gramme d'or, nous avons effectué notre essai sur d'autres métaux, mais nous calculerons tout de même le coût des matières premières occasionnées par la fabrication d'un lingot d'or.

Pour le lingot essentiellement composé de cuivre et d'argent, le prix du gramme de cuivre est de 400 Ariary, celui de l'argent est de 800 Ariary.

Nous avons fabriqué un lingot de cuivre allié à de l'argent de 19 grammes.

Les matières premières	Quantité Utilisée [gramme]	Prix du gramme [Ar]	Coût [Ar]	Coût des matières premières [Ar]	Coût des matières premières [Ar]
Or	19	40 000	760 000	760 000	
Argent	4	800	3 200		9 200
Cuivre	15	400	6 000		
TOTAL				760 000	9200

Tableau 9 : Coût des matières premières

IV-Les matières consommables

L'essence, l'énergie électrique, et le borax sont les matières consommables lors de la fabrication du lingot.

Le prix actuel du KWH est de 200 Ar, ce prix étant nécessaire au calcul de l'énergie électrique consommée par le ventilateur centrifuge au cours de son fonctionnement.

Consommables	Coût Unitaire	Quantité Utilisée	Coût pour un lingot de 20 grammes (Ar)
Carburant	2590 Ar par litre	0,01 l	300
Energie Electrique	200 Ar par KWH	0,15 KWH	Utilisation 15 minutes : $0,6 \text{ KWH} \times 15 / 60 = 0,1$ KWH et ça correspondra à 20
Borax	500 Ar par sachet 200 g		200

Tableau 10 : Les consommables

Remarque : le coût de l'acide ni de l'huile n'a pas été pris en compte ; leur utilisation étant vraiment peu importante, il est impossible de les quantifier.

Le coût d'un lingot d'or de 20 grammes s'estime donc à peu près à l'application de la formule suivante :

Coût des matières premières + les coûts des matières consommées = prix du lingot

$$760000 + (300 + 20 + 200) = 760520 \text{ Ariary le prix d'un lingot d'or de 20 grammes}$$

Nous ne pensons pas avoir fait une étude économique exhaustive ni une étude de faisabilité sur le sujet, mais nous avons essayé par cette approche économique de démontrer que les artisans malgaches peuvent améliorer leur productivité et leur méthode de travail.

CONCLUSION

Au terme de ce travail, nous pensons avoir apporté une amélioration technique dans une unité artisanale de bijouterie locale. En effet, le soufflet à pédales a été remplacé par le ventilateur centrifuge électrique. Cette suppression a permis l'obtention du débit d'air. Par la connaissance et le réglage de ce débit, il y a eu de ce fait, une amélioration de la qualité de la flamme. Par conséquent, une meilleure combustion et une fonte rapide de l'or ont été obtenues.

L'exploitation de l'or est actuellement en plein essor. L'introduction du lingot sur le marché national serait donc appréciée pour la bonne gestion des ressources aurifères.

Le coût du matériel étant relativement peu élevé, il sera à la portée du pouvoir d'achat des artisans. Il se chiffre, en effet, à 79 500 ariary. Il serait intéressant qu'une étude de l'implantation du matériel dans les différents secteurs aurifères soit réalisée en vue de sa vulgarisation. Cette dernière entraîne d'autre part, une étude de faisabilité de plusieurs unités de fabrication.

Néanmoins, le travail effectué présente des limites concernant la modélisation des différents paramètres mathématiques qui, nous espérons, fera l'objet de recherches ultérieures.

Références bibliographiques

- [1] ANDRIANAINA RADO, *Affinage hydro métallurgique des préconcentrés d'or*, Mémoire de fin d'étude à l'ESPA, 2005
- [2] Gaz de France GDF, *Combustibles gazeux et principes de la combustion*, Bibliothèque ESPA 19
- [3] JOLIOT, *Catalogues des matériels en bijouterie*, Edition JOLIOT
- [4] J.PADET, *Fluides en écoulement, méthodes et modèles*, 1991
- [5] J.C GUIBET, *Carburants et moteurs, Tome 1*, Bibliothèque ESPA
- [6] M.DESTRAU, *La combustion et les flammes*, Bibliothèque ESPA
- [7] RAKOTOBE D.H.N, *Techniques de transformation de l'or en bijoux*, Mémoire de fin d'étude à l'ESPA, 2005
- [8] SOANIRINAVALONA RUTH.O, *Conception et réalisation d'une unité de traitement thermique des pierres gemmes*, Mémoire de fin d'étude à l'ESPA, 2005
- [9] THERMODYNAMIQUE APPLIQUEE, *La combustion*, Cours à l'ESPA, 2004
- [10] ZO A.RANARIJAONA, *Modélisation d'un brûleur à combustible liquide*, Mémoire de fin d'étude à l'ESPA, 2005
- [11] TECHNIQUES DE L'INGENIEUR, *Métallurgie de l'or, 1^{ère} édition*, octobre 1956

Les sites web consultés :

-neveu.pierre.free.fr/enseign/aéraulique

- www.abcchange.com/poincon-metaux-precieux.
- ww.techniques-ingenieur.fr/dossier/metallurgie de l'or
- www.cyber.uhp-nancy.fr/demos/CH-ENER/cha_2/cours_2_3
- www.leblogfinance.com/2006/03/un_etf_sur_lor
- www.mem.gov.mg
- www.metalor.com

ANNEXE I : EXTRAIT DU TEXTE LEGISLATIF SUR L’AFFINAGE DE L’OR

Code Minier 2005-021 du 17 octobre 2005

Chapitre IV de la commercialisation des produits miniers

Article 148-1 : l’exportation et l’importation de l’or sont libres sous toutes ses formes. Toutefois, le décret d’application du présent code peut prévoir que la transformation en lingot ou en autre forme pourra être exigée pour l’exportation.

DECRET n°95-0325 du 3 mai 1995 fixant sur le régime de l’or

Chapitre III : du poinçonnage, de la fonte et de l’affinage

Article 7

A l’état brut (poudre, pépite, barre, lingot plaque), l’or doit être titré par le Ministère chargé des Mines.

A l’état travaillé, l’or doit être poinçonné par les cadres assermentés du Laboratoire National des Mines. Leur responsabilité individuelle peut être mise en cours par tout intéressé en cas de fraudes dûment constatées. Ce poinçonnage est obligatoire pour tous les bijoux en magasin et en vente.

Article 8

La fonte et l’affinage de l’or à l’état brut sont uniquement effectués par le Laboratoire National des Mines ou par des laboratoires agréés par le Ministère des Mines.

Article 9

La fonte et l'affinage des vieux bijoux sont uniquement effectués par le Laboratoire National des Mines ou par des laboratoires agréés par le Ministère des Mines.

Article 10

L'autorisation de fonte est délivrée uniquement par le Ministère des Mines.

ANNEXE II : POIDS ET MESURE ASSOCIES A L'OR

1 Once troy (oz) = 31,103 grammes

32 onces = 1Kg

12,44 Kg = 400 oz troy (London good delivery bar)

Expression du titre dans le commerce bancaire: en millièmes

Dans la bijouterie : en carats

Correspondance entre carat et millièmes :

24 carats = 999,9 millièmes

22 carats = 916,66 millièmes

18 carats = 750 millièmes

14 carats = 583,33 millièmes

1 carat = 41,66 millièmes

ANNEXE III: CALCUL DU TITRE D'OR PAR METHODE DE CALCUL

1) Calcul du carat

Pour connaître la valeur du carat en millièmes, il faut procéder au calcul suivant :

24 carats valent 1000 millièmes, et 1 carat vaut donc :

$(1 \times 1000) / 24 = 41,66$ millièmes, 1 carat vaut donc 41,66 millièmes

A partir de ce calcul nous pouvons savoir le titre en carat d'un alliage quelconque, en divisant son titre en millièmes par 41,66

Exemple : un alliage de 916 millièmes vaut en carat : $916 / 41,66$ donne 22 carats ;

2) Augmentation du titre et diminution avec de l'or fin

Supposons que notre lingot a un titre de 916 millièmes de masse 20 grammes. Le titre recherché est de 1000 millièmes.

Pour obtenir cette augmentation, on peut appliquer la formule suivante :

$$\frac{[(\text{titre supérieur} - \text{titre inférieur}) \times \text{poids du lingot}]}{(1000 - \text{titre supérieur})} = \text{masse d'or fin à ajouter pour augmenter le titre}$$

dans le cas contraire c'est-à-dire une diminution, on a :

$$\frac{[(\text{titre supérieur} - \text{titre inférieur}) \times \text{poids du lingot}]}{(1000 - \text{titre inférieur})} = \text{masse d'alliage à ajouter pour diminuer le titre}$$

3) Détermination de la quantité d'or fin dans un alliage déterminé

$$\frac{\text{Titre de l'alliage} \times \text{poids initial de l'alliage}}{1000} = \text{Quantité d'or que renferme l'alliage}$$

4) Détermination du poids de l'or dans un échantillon donné

Le calcul est défini par :

$$\frac{\text{poids de l'échantillon} \times \text{densité du métal à fondre}}{\text{Densité du métal de l'échantillon}} = \text{Poids de l'or ou de l'argent}$$

ANNEXE IV: NOMENCLATURE

T : température [$^{\circ}C$] ou [K] $T_{en}[K] = 273[K] + T_{en}[^{\circ}C]$

ρ : [$Kg.m^{-3}$] : Masse volumique

ν : [$m^2.s^{-1}$] : Viscosité cinématique

μ : [$Pa.s$] ou [$Kg.m^{-1}.s^{-1}$] : Viscosité dynamique

V : [m^3] : Volume

V_a : en [$\frac{m^3 N}{Kg}$] Pouvoir comburivore

V_f : en [$\frac{m^3 N}{Kg}$] Pouvoir fumigène

R : Nombre de Reynolds

X_m : [Pa] : Charge motrice d'un ventilateur

w : vitesse de rotation [tr /minute]

$V_d = \frac{q_v}{S}$: Vitesse de mélange ou vitesse débitante [m/s]

P_u : [W] : Puissance utile du ventilateur

q_v ou q : [$m^3.s^{-1}$] : Débit – volume

q_m : [$Kg.s^{-1}$] : Débit massique

D : [m] : Diamètre d'un tube

D_h : [m] : Diamètre hydraulique d'une canalisation

S : [m²] : Surface

L : Longueur caractéristique [m]

r : rayon [m]

p_p : Pouvoir calorifique supérieur à pression constante

I_p : Pouvoir calorifique inférieur à volume constant

P_v : Pouvoir calorifique supérieure à volume constant

I_v : Pouvoir calorifique inférieure à volume constant

h : Désignation de l'hydrogène

w : Désignation de l'eau

o : Désignation de l'oxygène

s : Désignation du soufre

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

PARTIE I : ETUDES ET RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE I. RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES.....7

I- INTRODUCTION.....	8
II- GENERALITES SUR L'OR.....	8
1) Présentation	8
2) Propriétés.....	9
a) Propriétés physiques et mécaniques	9
b) Propriétés chimiques	10
c) Propriétés électriques et thermiques.....	10
d) Propriétés optiques.....	10
3) Formation et gisement	11
4) Utilisation.....	11
a) L'étalon or.....	11
b) Bijouterie- Joaillerie Artistique.....	12
c) Haute technologie- Industrie	12
d) Médecine- Dentisterie.....	13
5) Production mondiale.....	14
a) Quelques données chiffrées.....	14
6) Marché international et national de l'or	15
a) Négociation de l'or [II].....	15
b) Les lingots.....	15
7) Potentiel aurifère malgache.....	17
a) Les gisements primaires :.....	17
Gisements primaires de type ignés :	17
Gisements primaires de type hydrothermal :	18
b) Les gisements secondaires de types latéritiques :	18
c) Les gisements de groupes détritiques :	18
8) marché national.....	20
a) Production nationale.....	20
III- RAPPELS SUR LA THERMODYNAMIQUE APPLIQUEE.....	23
1) La combustion.....	23
a) Définitions.....	23
b) Compositions et pouvoirs calorifiques	24
Composition.....	24

<u>Pouvoirs calorifiques.....</u>	<u>24</u>
<u>Relation entre I et P</u>	<u>25</u>
<u>Détermination du pouvoir calorifique :</u>	<u>25</u>
-Combustibles gazeux :	26
c) <u>La combustion théorique.....</u>	<u>27</u>
<u>Combustibles solides.....</u>	<u>27</u>
d) <u>Combustion réelle.....</u>	<u>29</u>
<u>Expressions littérales en fonction de e.....</u>	<u>29</u>
e) <u>Température de combustion.....</u>	<u>30</u>
IV- RAPPELS SUR LES FLUIDES.....	31
1) <u>Définitions.....</u>	<u>31</u>
2) <u>Compressibilité.....</u>	<u>31</u>
3) <u>Viscosité dynamique.....</u>	<u>32</u>
4) <u>Viscosité cinématique.....</u>	<u>32</u>
a) <u>Nombre de Reynolds.....</u>	<u>33</u>
b) <u>Vitesse débitante.....</u>	<u>33</u>

CHAPITRE II. GENERALITES SUR LA FABRICATION DES LINGOTS33

I- AFFINAGE ET FONTE DU METAL.....	34
1) <u>Définitions.....</u>	<u>34</u>
2) <u>L'affinage artisanale.....</u>	<u>35</u>
3) <u>Le procédé MILLER (séparation par le chlore).....</u>	<u>36</u>
4) <u>Le procédé WOHLWILL (affinage électrolytique).....</u>	<u>37</u>
5) <u>Le procédé acide.....</u>	<u>37</u>
6) <u>Fonte et pré filage du métal.....</u>	<u>38</u>
a) <u>But.....</u>	<u>38</u>
b) <u>Principe.....</u>	<u>38</u>
II- FABRICATION DES LINGOTS.....	38
1) <u>Définitions.....</u>	<u>38</u>
2) <u>Le creuset.....</u>	<u>39</u>
a) <u>Creuset en plombagine.....</u>	<u>39</u>
b) <u>Creuset en terre réfractaire.....</u>	<u>40</u>
3) <u>Différents types de lingotières.....</u>	<u>41</u>
a) <u>-Lingotière à plaque</u>	<u>41</u>
b) <u>-Lingotière pour fils.....</u>	<u>42</u>
c) <u>-Lingotière à collier.....</u>	<u>42</u>
d) <u>Structure.....</u>	<u>43</u>
4) <u>Vérification de la finesse ou titre [III].....</u>	<u>44</u>
a) <u>Utilisation de la pierre de touche (au touchau).....</u>	<u>44</u>
<u>Matériels utilisés.....</u>	<u>44</u>
<u>Dimension des pierres de touche.....</u>	<u>45</u>
<u>Mode opératoire.....</u>	<u>45</u>
b) <u>L'essai par coupellation.....</u>	<u>45</u>
c) <u>L'essai par spectrométrie et par rayons X</u>	<u>46</u>
d) <u>Le poinçon [I].....</u>	<u>46</u>

CHAPITRE III. L'UNITE DE FABRICATION..... 48

I- L'unité utilisée par les bijoutiers.....	48
1) Les activités des bijoutiers concernant la fabrication de lingot.....	49
2) L'atelier de travail.....	49
a) Principe.....	49
b) Les matériels utilisés.....	49
Le soufflet à pédales.....	49
c) Les problèmes rencontrés.....	50
II- Notre unité de fabrication.....	51
1) MOYENS MATERIELS REQUIS.....	51
a) Le combustible.....	51
Généralités sur les combustibles.....	51
Sa composition.....	52
Son obtention.....	52
Volatilité.....	53
Indice d'octane.....	53
b) Le Comburant.....	54
Approvisionnement en air.....	54
La roue.....	54
Le distributeur.....	54
Le diffuseur.....	55
La volute.....	55
Le divergent.....	55
Ecoulement de l'air.....	55
c) Les flexibles.....	57
d) Le réservoir.....	57
e) Le chalumeau.....	58
f) Le creuset : [VI].....	59
g) La mouvette.....	59
h) La lingotière [VI].....	59
i) Le borax.....	60
j) L'huile.....	61
k) Proportion de borax dans la fonte.....	61
l) L'installation [VI].....	61

CHAPITRE IV. PROCESSUS DE FONCTIONNEMENT..... 62

I- PARAMETRES : L'ESSENCE ET L'AIR.....	62
1) Réglage de l'écoulement.....	62
2) La volatilité de l'essence	62
a) Définition du point éclair.....	63
b) La pression ou la tension de vapeur.....	63
c) La vitesse d'évaporation.....	64
Surface libre du liquide	64
Tension de vapeur du liquide et pression partielle de vapeur dans l'atmosphère ..	64
La chaleur latente de vaporisation.....	64
3) Etude du mélange air- carburant :	65
a) Masse volumique du mélange	65
b) Le mélange air essence : la combustion [IV].....	66
II- Processus de combustion au niveau du chalumeau [IV].....	67
1) La température de combustion.....	69

a) La flamme.....	69
Définitions.....	69
Caractéristiques de la flamme.....	70
Température de la flamme de pré mélange	71

CHAPITRE V. LES ESSAIS EXPERIMENTAUX..... 72

I- Calcul du débit	72
II- ESSAI SUR L'OR.....	73
1) Procédé.....	73
2) Volatilité de l'or.....	74
III- ESSAI SUR LE CUIVRE.....	74
a) Fabrication du lingot :.....	74
b) Matériels utilisés.....	74
c) Procédé.....	75
d) Résultat.....	76
IV- Mesures de sécurité.....	76
1) Mesures concernant l'unité.....	76
2) Mesures concernant le fondeur.....	76

CHAPITRE VI. COUT UNITAIRE DE L'UNITE DE FABRICATION ET D'UN LINGOT..... 77

I- Description du projet.....	77
II- Les investissements fixes :.....	77
III- Les matières premières.....	78
IV- Les matières consommables	79

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

TABLES DES MATIERES

RESUME

RESUME

Le présent ouvrage consiste à l'étude de la mise en place d'une unité de fabrication artisanale améliorée de lingots d'or. L'objet de notre étude vise à apporter une certaine théorie dans l'élaboration de cette unité artisanale et de contribuer à une amélioration de la fabrication de lingot à Madagascar.

De l'or à l'état natif jusqu'à sa transformation en lingot, différentes étapes ont été suivies. L'étude du processus de combustion jouant un rôle primordial pour l'obtention de la température de fusion de l'or, il nous a été nécessaire d'apporter quelques chapitres à ce sujet. Puis, la fonte de l'or obtenue, elle devra ensuite être moulée dans une lingotière pour obtenir la forme et les dimensions voulues.

Notre travail consiste donc à apporter au secteur de l'or un autre aspect de sa valorisation au marché malgache, limité jusqu'ici à la fabrication de bijoux, par la fabrication des lingots.

Mots clés : combustion, lingot

ABSTRACT

This work consists being studied of the installation of an artisanal manufacturing unit of gold ingots. The object of our study aims at bringing a certain theory in the development of this artisanal unit and to contribute to an improvement for the development of the manufacture of ingots.

Obtaining gold in a natural state until its transformation into ingots, various stages are settings. The study of the process of combustion playing a paramount part for obtaining the melting point of gold, it is necessary for us to bring some chapters on this subject. Then, the cast iron of gold obtained, it will have then to be moulded in an ingot mould to obtain the form, desired dimensions.

Our work will thus consist in bringing to the sector gold another aspect of its transformation to the Malagasy market, limited to the manufacture of jewels, by the manufacture of ingots.

Key words: combustion, ingots