

Tables des matières

Remerciements	1
<i>DEDICACES</i>	2
Liste des figures	5
Liste des tableaux	6
Liste des abréviations	7
Introduction générale	8
Chapitre I : Présentation de la SMI et cadre du projet	9
Introduction	9
1. Présentation de l'organisme d'accueil.....	10
2. Description du traitement de l'argent	14
3. Présentation et cadre du projet :	21
Chapitre II : Analyse de l'existant et évaluation des besoins énergétiques	24
Introduction	24
1. Etat des lieux et diagnostique du système actuel :.....	25
2. Evaluation des besoins énergétiques au sein de la fonderie :	29
Chapitre III : Etude du système de régulation de température des fours de fusion	34
Introduction	34
1. Généralités sur la régulation :.....	35
2. Mise en œuvre des moyens matériels et techniques pour la régulation des fours :	37
3. Modélisation et identification du système de régulation de température des fours de fusion	43
4. Conclusion.....	60
Chapitre IV : Impact de la régulation sur la consommation du propane et amélioration du rendement et des conditions de travail dans la fonderie et élaboration du cahier de charge technico-commercial pour la rénovation de la fonderie	61
Introduction	61
1. Impact de la régulation :	62
2. Amélioration :	65
3. Recommandations :	67
4. Cahier de charge technico-commercial	70
Conclusion	73
Bibliographie et Webographie	74
Annexe	75

Liste des figures

Figure 1 : Organigramme du groupe MANAGEM	11
Figure 2 : Carte de localisation du gisement d'Imiter	12
Figure 3 : Organigramme de la SMI.....	13
Figure 4: Schéma-bloc du traitement de l'argent	14
Figure 5 : Phases du concassage.....	14
Figure 6 : Broyage et gravimétrie.....	15
Figure 7 : Flottation.....	16
Figure 8 : Cyanuration.....	17
Figure 9 : Cémentation	18
Figure 10 : Lixiviation.....	19
Figure 11 : Fonderie	19
Figure 12 : Four à creuset.....	25
Figure 13 : Système d'alimentation en combustible du four	25
Figure 14 : Conduite de propane	27
Figure 15 : Electrovanne avec détendeur	27
Figure 16 : Etat de l'électrovanne	27
Figure 17 : Conduite équipée de vanne manuelle.....	27
Figure 18 : boîtier électrique du ventilateur d'air	28
Figure 19 : Installation en dehors de la fonderie	28
Figure 20 : Schéma du four	30
Figure 21 : Schéma simplifié d'un bilan thermique du four	30
Figure 22 : Schéma de régulation de température du four.....	37
Figure 23 : Exemple de régulateurs de température	38
Figure 24 : Schéma descriptif du corps du régulateur PID.....	39
Figure 25 : Electrovanne proportionnelle.....	39
Figure 26 : Electrovanne pneumatique proportionnelle	40
Figure 27 : Thermocouple	40
Figure 28 : schéma du système de régulation de température du four	41
Figure 29 : Micro ratio valve.....	42
Figure 30 : Schéma fonctionnel du processus	43
Figure 31 : Schéma bloc du processus.....	43
Figure 32 : Schéma fonctionnel en boucle ouverte	43
Figure 33 : Schéma fonctionnel en boucle fermée	44
Figure 34 : Evolution de la température du four en fonction du temps	45
Figure 35 : Courbe de tendance.....	46
Figure 36 : Modélisation par la méthode de Broïda	47
Figure 37 : Obtention directe par le modèle de Broïda	47
Figure 38 : la température du creuset en fonction du temps.....	48
Figure 39 : Signal à l'entrée de la boucle ouverte.....	49
Figure 40 : 1er modèle en boucle ouverte	50
Figure 41 : Réponse indicielle du système	50
Figure 42 : Température du four en fonction du temps.....	51

Figure 43 : Schéma en boucle ouverte sur Simulink	52
Figure 44 : Réponse du 2ème modèle en boucle ouverte	52
Figure 45 : schéma bloc de la boucle fermé du processus de régulation de température du four	53
Figure 46 : Schéma en boucle fermée sans correction	54
Figure 47 : réponse du système en boucle fermée sans correction.....	54
Figure 48 : Réponse du système en boucle fermée avec correction PID.....	55
Figure 49 : Performance du système corrigé.....	56
Figure 50 : Schéma en boucle fermée sans correction	56
Figure 51 : Boucle fermée du système sans correction	57
Figure 52 : Réponse du système avec correction PI.....	58
Figure 53 : Evolution de la température sans régulation	62
Figure 54 : Evolution de la température du système régulé	62

Liste des tableaux

Tableau 1 : Historique des ratios avec régulation.....	60
Tableau 2 : Historique des ratios sans régulation.....	61
Tableau 3 : Cahier de charges technico-commercial.....	68

Liste des abréviations

M_{propane}	: Masse du propane
PCI_{propane}	: Pouvoir calorifique inferieur du propane
M_{argent}	: Masse de l'argent
C_{argent}	: Capacité thermique de l'argent
T_{fusion}	: Température de fusion de l'argent
T_{amb}	: Température ambiante
M_{creuset}	: Masse du creuset
C_{creuset}	: Capacité thermique du creuset
$T_{\text{coulé}}$: Température de coulée
L	: Chaleur latente d'argent
U	: Consigne d'entrée
Y	: Sortie du système
X	: Déplacement du clapet de l'électrovanne
ε	: Ecart de mesure
ΔT	: Ecart de température
$C(p)$: Fonction de transfert du correcteur PID
$V(p)$: Fonction de transfert de l'électrovanne
$W(p)$: Fonction de transfert de la conduite d'air et gaz
$F(p)$: Fonction de transfert du four
$T(p)$: Fonction de transfert du thermocouple
DSC	: Calorimétrie différentielle à balayage
PCI	: Pouvoir calorifique inferieur
TOR	: Tout ou rien
PID	: proportionnel, intégral, dérivé.

Introduction générale

Vu la grande compétitivité dans le monde industriel, les entreprises sont appelées à améliorer la qualité de leurs produits et services par l'adoption d'une politique qui tient compte de l'évolution économique et technologique actuelle.

Grâce au développement de l'électronique numérique, l'automatisation et l'informatisation sont devenues de plus en plus des éléments stratégiques fondamentaux pour les industriels. En effet, le recours aux systèmes automatisés et informatisés offre aux entreprises des nouveaux outils pour le contrôle et la commande des processus de production. Ce qui permet à l'entreprise de répondre aux différentes exigences d'une manière optimale.

Pour ces raisons, la société métallurgique d'Imiter continue de consolider ses actions d'ampleur pour renforcer son avantage concurrentiel et améliorer ses installations et ses ressources. Dans ce cadre, elle a donné la priorité aux projets visant ainsi la rénovation de son outil de production et l'amélioration de ses performances assurant la continuité de son service.

C'est dans cette perspective, La SMI nous a proposé ce projet de fin d'étude d'optimiser la consommation du propane dans la fonderie, faire une étude détaillée d'un système de régulation de température des fours de fusion afin d'avoir une combustion parfaite et respecter le profil de température souhaité, améliorer le rendement des fours de fusion et enfin améliorer les conditions de travail dans la fonderie.

Le présent rapport est composé de quatre chapitres. Le Chapitre 1 constitue la Présentation de la société métallurgique d'Imiter- Managem et le cadre du projet. Alors qu'au Chapitre 2 nous avons effectué une analyse de l'existant et nous avons évalué les besoins énergétiques. Puis, au Chapitre 3 nous avons réalisé une étude du système de régulation de température des fours de fusion. Finalement, au Chapitre 4 nous avons démontré l'impact de la régulation sur la consommation du propane, ainsi que l'impact de l'amélioration des conditions de travail dans la fonderie, et nous avons élaboré un cahier de charge technico-commercial pour la rénovation de la fonderie.

Chapitre I : Présentation de la SMI et cadre du projet

Introduction

L'industrie minière constitue une part importante dans le développement économique de notre pays. Pour cette raison, tous les travaux de recherches effectués, visent l'extension et la valorisation des sites miniers repartis dans le territoire national.

Parmi les sites miniers reconnus au Maroc, nous avons celui d'Imiter avec un gisement argentifère dont l'exploitation est occupée par la société métallurgique d'Imiter (**S.M.I**). Le présent travail effectué dans le cadre de notre stage est la description générale du circuit et du procédé de traitement du minerai.

1. Présentation de l'organisme d'accueil

1.1. Présentation de la SNI

Le groupe **SNI** est un multinational marocain qui investit dans plusieurs domaines de l'industrie, le transport, l'agroalimentaire, les banques et les mines. Dès sa création en 1919, il joue un grand rôle dans le développement économique et social du pays.

A partir de 1989, le groupe **SNI** investit dans l'industrie minière : tout d'abord avec l'exploitation du concentré à BOU-AZZER, et puis suivra la fluorine à la SAMINE en 1974, le Zinc et le Cuivre à GUEMASSA, en 1992, l'or à AKKA en 2001 ; et enfin l'exploitation aurifère de KIMERO en Guinée à partir de mars 2002.

Pendant les années 80, le groupe **SNI** commence son investissement dans d'autres secteurs (transport, agroalimentaire et les banques). Durant les années 90, la **SNI** a vu la nécessité d'investir dans les secteurs pionniers (communication, distribution et l'immobilier), d'où la création MAROC-CONNECT et le réseau de distribution MARJANE. Le groupe **SNI** prend le nom de Holding à partir de 1996.

1.2. Présentation du groupe MANAGEM

MANAGEM est un groupe minier et hydro métallurgique, il produit et commercialise le cobalt, les métaux de base et les dérivés métalliques. Etant engagé dans une politique de croissance et de développement de ses activités, MANAGEM ambitionne de :

- Devenir un groupe minier de taille mondiale développant et exploitant des gisements de qualité
- Créer de la valeur ajoutée, à travers le service et la satisfaction de ses clients, la recherche et l'innovation
- Se situer parmi les leaders nationaux et internationaux dans plusieurs filières intégrées et marchés riches en hydrométallurgie.

Les efforts permanents d'innovation, d'optimisation de la qualité, de mobilisation des ressources humaines permettent à MANAGEM de s'imposer comme une référence du secteur minier marocain et comme un opérateur solide sur le plan international.

A l'écoute d'évolutions du marché et des nouvelles attentes de ses clients, MANAGEM a su au fil de son histoire aller de l'avant et investir dans des projets créateurs de valeur.

La mise en place d'équipes dédiées à la recherche et développement, le démarrage des activités hydro métallurgiques au Maroc et l'ouverture de ses activités à l'international, sont autant d'exemples concrets de défis relevés par MANAGEM.

MANAGEM axe son activité autour de deux métiers : la mine et l'hydrométallurgie. Pour assurer les performances et le développement de ces deux métiers, MANAGEM s'appuie sur ses entreprises de services spécialisées dans l'exploration, la recherche & développement, l'ingénierie, les sondages et les travaux miniers. Au Maroc, le groupe opère à travers plusieurs sociétés réparties sur l'ensemble du territoire comme le montre la figure ci-après :

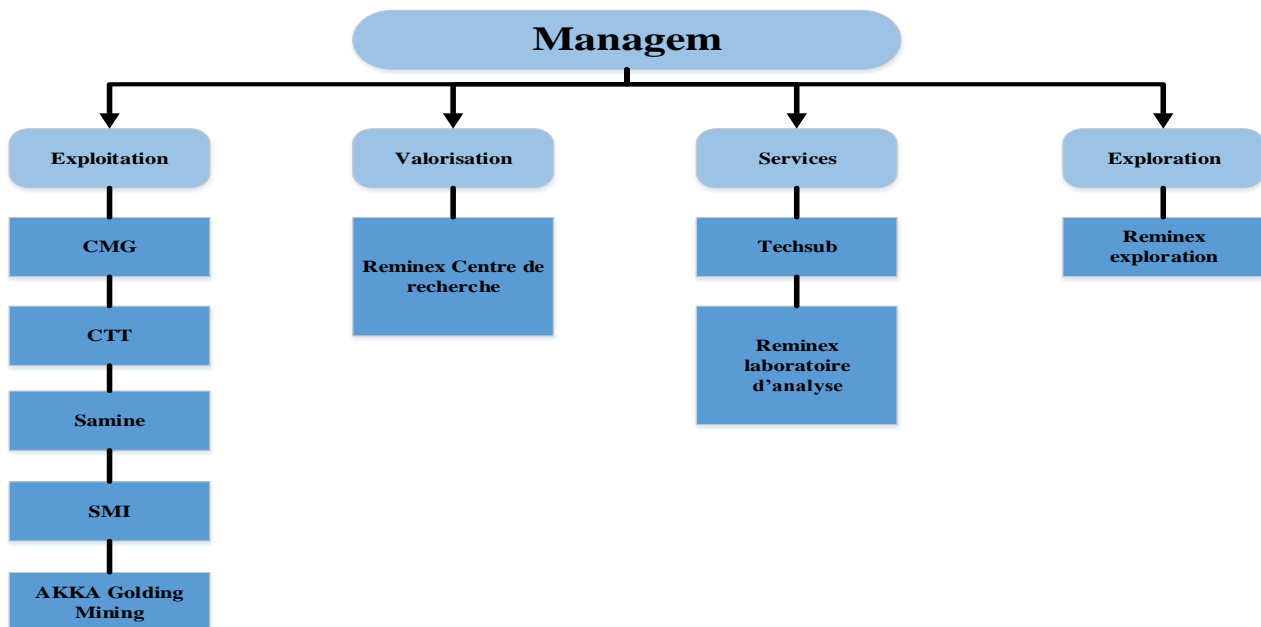


Figure 1 : Organigramme du groupe MANAGEM

1.3. Cadre géographique de la SMI :

La Société Métallurgique d'Imiter est une filiale du MANAGEM groupe minier qui exploite et traite le gisement argentifère d'Imiter. Elle se situe à 150 km à l'est d'Ouarzazate et à 30 Km de Tinghir au nord du Jbel Saghro. Le site de la mine se situe à 1500 m d'altitude et est caractérisé par un climat continental sec avec une faible pluviométrie.

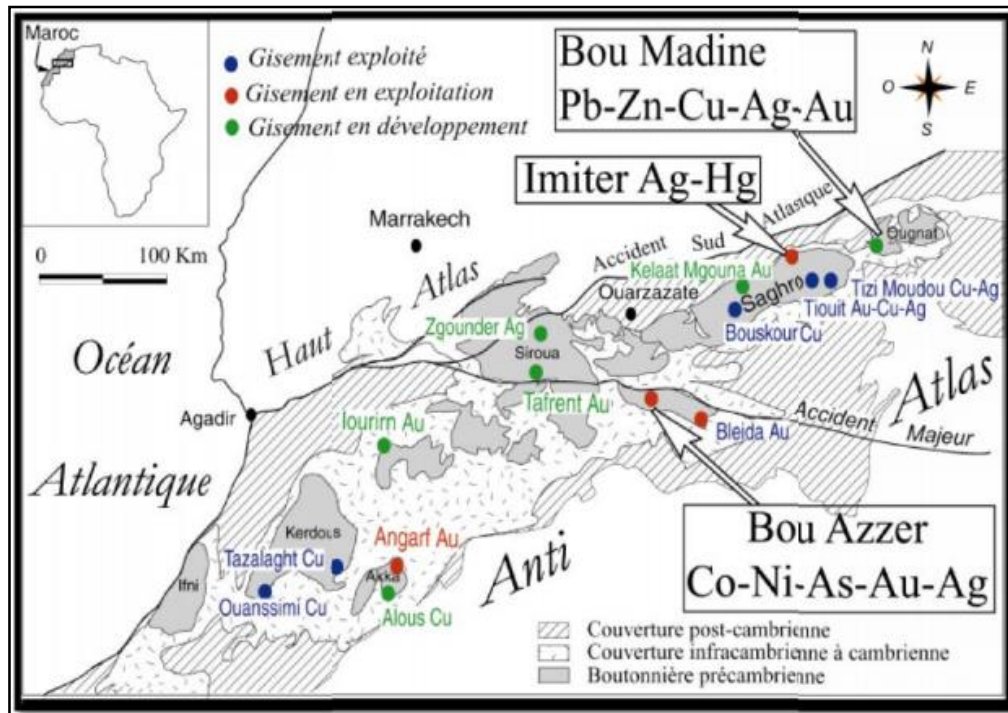


Figure 2 : Carte de localisation du gisement d'Imiter

1.4. Historique de la SMI

-1969 : Création de la Société Métallurgique d'Imiter (SMI) à l'initiative du Bureau de Recherche et de Prospection Minière (BRPM) et du groupe ONA (actionnaire à hauteur de 31%) pour l'exploitation des haldes argentifères du site d'Imiter ;

-1970 à 1975 : Gestion de la SMI confiée à l'ONA ;

-1983 : Les administrateurs de la société décident d'investir plus de 300 MDh pour adapter l'outil de production de la SMI à sa nouvelle vocation, décision alors justifiée par des réserves estimées à 1200 tonnes d'Argent métal et un programme d'exploitation d'une dizaine d'années ;

-1985 : Lancement des travaux pour la réalisation du projet d'extension ;

-1988 : Les travaux du projet d'extension sont achevés. Ils comprennent une nouvelle infrastructure minière, une nouvelle usine de traitement, une fonderie, un laboratoire d'analyse, un atelier d'entretien et d'autres réalisations annexes telles que la cité du personnel à Tinghir comptant plus de 300 logements. A l'issue de cette extension, la capacité de traitement de la

SMI est portée de 200t de minerai par jour à 650 t/jour, et sa capacité de production triple pour passer de 40 t à 120 t d'Ag métal par an ;

- 1994 : Grâce à une série d'aménagements effectués par la SMI sur les différentes phases de la production, la société parvient à augmenter sa capacité de production à 200t d'Argent métal/an en moyenne ;
- 1995 : Découverte du gisement Imiter II ;
- 1996 : Privatisation par cession de 36% du capital détenu par le BRPM à MANAGEM
- 1997 : Introduction en bourse par cession au public de 20% du capital détenus par le BRPM ; durant la même période, MANAGEM a exercé son option d'achat de 13% de la SMI, portant sa participation à 80%. Cette année a également été marquée par l'acquisition du gisement d'Igoudrane.
- 1998 : Lancement du projet d'extension de l'usine de traitement d'Imiter permettant de porter la capacité de traitement journalière à 1400 t/j. Le démarrage des installations de l'extension de l'usine de SMI a eu lieu en juillet 1999.
- 2013 : Lancement du projet d'extension de l'usine de traitement d'imiter de porter la capacité de traitement journalière à 2600 t/j.

1.5. Organigramme de la SMI

La structure organisationnelle du site se présente comme suit :

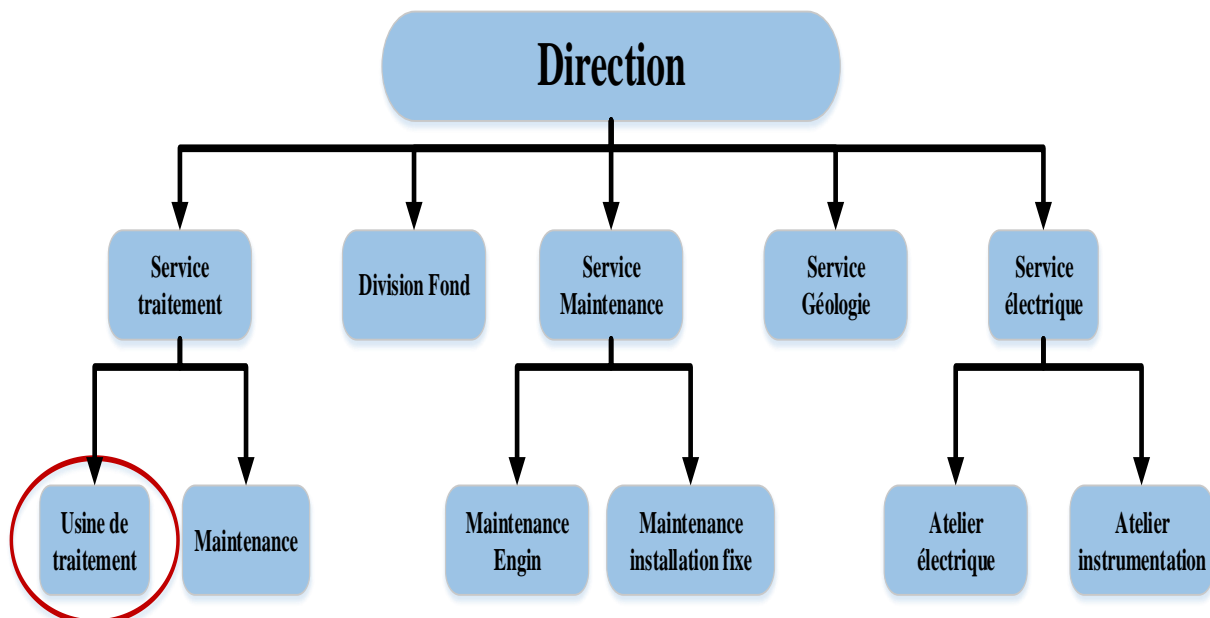


Figure 3 : Organigramme de la SMI

2. Description du traitement de l'argent

2.1. Introduction

Le traitement du minerai comporte les phases classiques de préparation mécanique, broyage, gravimétrie, flottation, Cyanuration et récupération d'un ciment d'argent par précipitation en plus d'une étape de lixiviation à l'acide nitrique.

Le schéma suivant illustre ces différentes étapes :

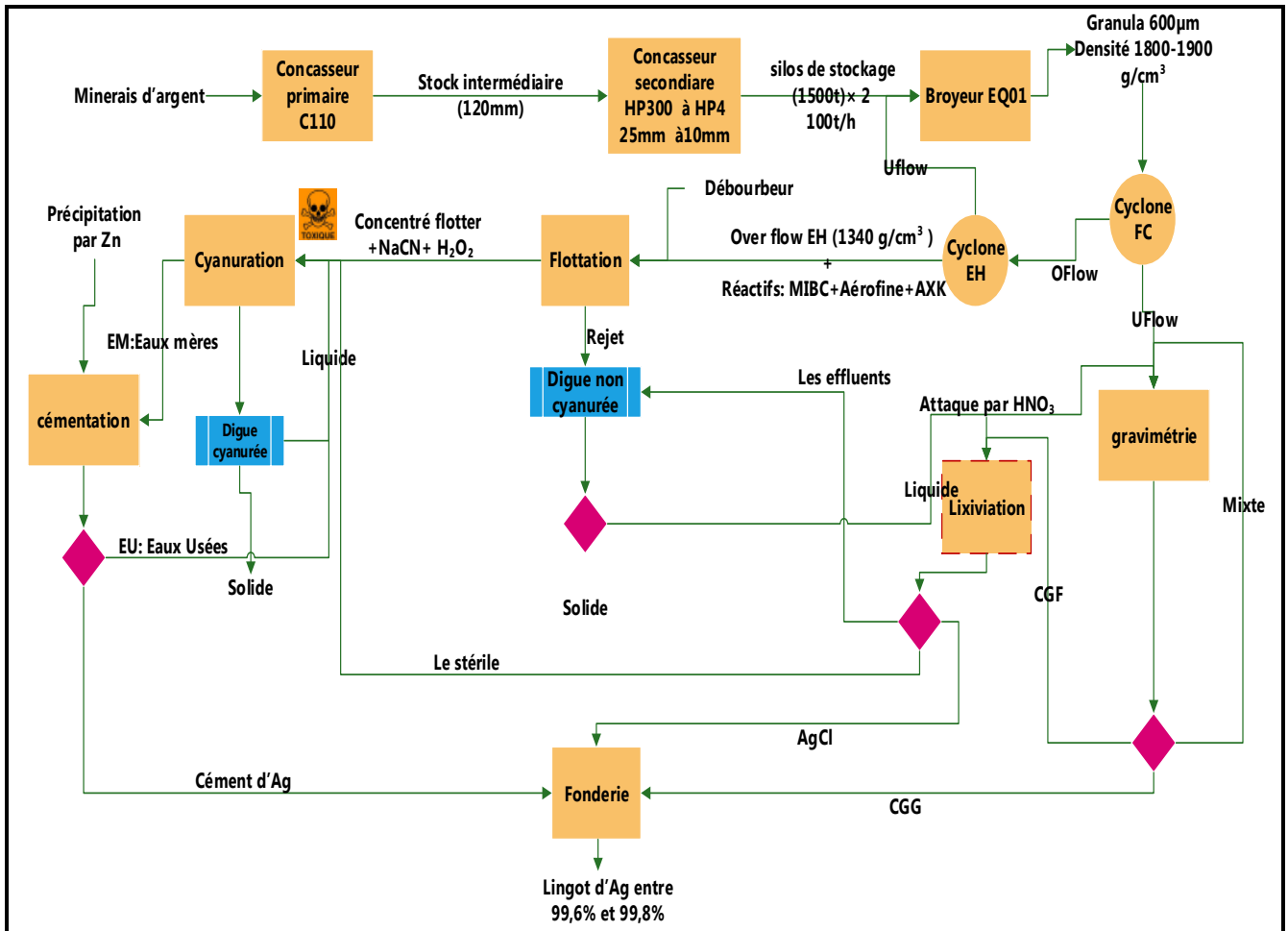


Figure 4: Schéma-bloc du traitement de l'argent

Par la suite, nous allons présenter en détail chacune des étapes du processus de traitement d'argent.

2.2. Concassage

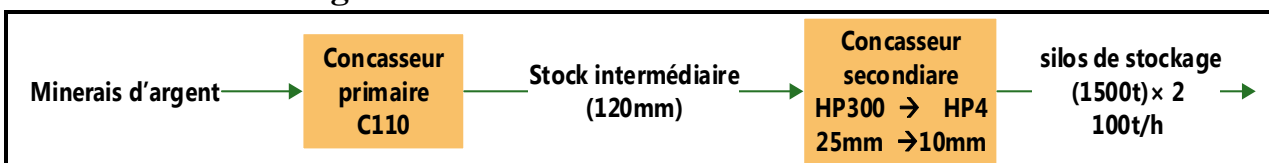


Figure 5 : Phases du concassage

L'objectif de l'étape de concassage est de préparer la roche d'entrée à être broyée, de sorte à obtenir à la sortie du concassage des grains d'un diamètre inférieur à 10mm. Pour ce faire, le T.V. (Tout-Venant) passe par deux étapes de concassage, primaire et secondaire.

Le T.V. de granulométrie de moins de 400mm est acheminé vers le concassage primaire.

2.2.1. Concassage primaire

Le rôle du concasseur primaire à mâchoires C110 étant de faire sortir des grains de moins de 120mm, on utilise un scalpeur en amont pour trier les grains de plus de 100mm. Ces grains de plus de 100 mm seront acheminés vers le concasseur primaire, tandis que ceux de moins de 100mm passeront directement au stock intermédiaire. Les grains obtenus à la sortie du concasseur primaire viennent s'ajouter au stock intermédiaire.

2.2.2. Concassage secondaire

Le concassage secondaire commence par le transport du stock intermédiaire vers un premier crible de 10mm. Les grains de moins de 10mm vont vers les silos de stockage tandis que le reste est acheminé vers un concasseur secondaire. Le concasseur secondaire est un concasseur giratoire réglé au repos à 25mm HP300, ce qui nous donne en sortie 60% de grains de moins de 50mm. Un convoyeur est placé à la sortie du concasseur secondaire pour acheminer les grains vers un deuxième crible de 10mm. Les grains de moins de 10 mm vont vers les silos tandis que le reste passe par un concasseur tertiaire giratoire réglé à 10 mm HP4, ce qui donne à la sortie 60% de grains de moins de 16mm. A la sortie du concasseur tertiaire, les grains sont renvoyés au deuxième crible. La même opération de tri se répète.

2.3. Broyage / Gravimétrie

Le broyage est la suite de la préparation mécanique de la roche, tandis que la gravimétrie a pour objectif de séparer les particules d'argent natif ou concentré (Concentré Gravimétrique Fin (CGF) et Concentré Gravimétrique Gros (CGG)) des particules d'argent sulfuré.

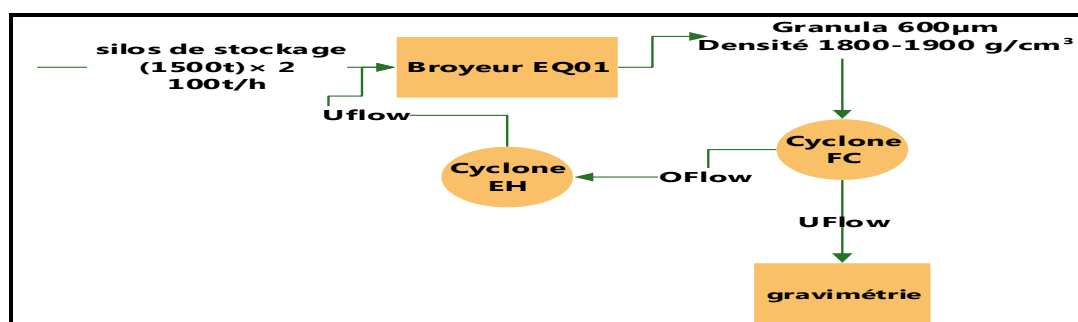


Figure 6 : Broyage et gravimétrie

Le contenu des silos de stockage est acheminé par des convoyeurs vers une cuve où il est mélangé avec de l'eau. Le mélange est ensuite broyé dans un broyeur à boulets. La pulpe obtenue est ensuite pompée vers une batterie d'hydrocyclone où les particules sont entraînées par une vitesse centrifuge. Cette vitesse permet de les classer selon le poids. Les plus lourds sont proches des parois, tandis que les plus légers sont proches du centre. L'effet de pression que crée la forme du cyclone repousse les particules légères (over flow ou surverse) vers le haut, ces particules vont être entraînées vers une bêche de stockage. Tandis que les plus lourdes (Under flow ou sous-verse) sont acheminées vers ce qu'on appelle des Jigs. A ce niveau, une séparation granulométrique est faite par la succession de deux effets : la pulsion et la succion. Les particules les plus légères (les rejets) sont acheminées vers la bêche de stockage tandis que les plus denses qui contiennent l'argent (le concentré) sont amenées vers une autre batterie d'hydrocyclones dont la surverse est envoyée à la bêche et la sousverse envoyée vers un broyeur secondaire. A la sortie du broyeur secondaire, on a une pulpe bien plus fine qui est envoyée vers les tables à secousse dont le rôle est la séparation gravimétrique. Trois produits sont recueillis à la sortie de la table : le concentré granulométrique fin (CGF), des rejets et un produit mixte.

Le CGF est envoyé à la lixiviation, les mixtes sont renvoyés au broyeur secondaire formant ainsi une boucle fermée et les rejets sont envoyés au niveau de la bêche. Toutes les pertes non cyanurées du processus de traitement sont également stockées dans la bêche. Le contenu de cette bêche est envoyé vers une troisième batterie d'hydrocyclones dont la surverse alimente le broyeur principal et la sous-verse est envoyée à la flottation.

En résumé, le broyage nous a permis d'affiner les grains, tandis que la gravimétrie nous a permis de séparer l'argent concentré gravimétrique fin qu'on envoie à la lixiviation, l'argent concentré gravimétrique gros qui va directement à la fonderie, et le moins concentré qui va alimenter la flottation.

2.4. Flottation

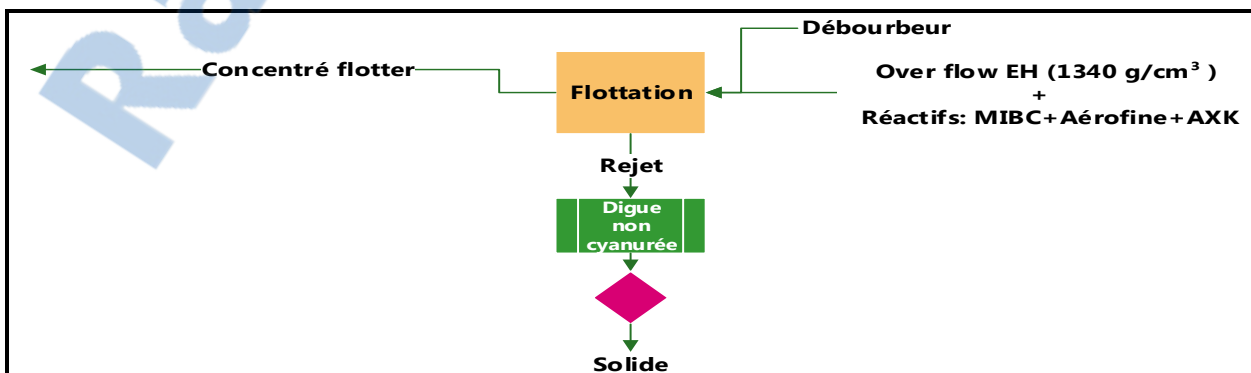


Figure 7 : Flottation

La flottation consiste à faire flotter l'élément qui nous intéresse, en l'occurrence l'argent, pour pouvoir le récupérer par débordement. Ceci se base sur les propriétés hydrophobes et hydrophiles des surfaces des solides : qu'active l'ajout d'un collecteur. On ajoute aussi un moussant en même temps que le collecteur, et qui a pour rôle d'assurer la stabilité de la mousse à la surface. Ainsi, en présence de bulles d'air, il y a un transport sélectif des particules hydrophobes qui se fixent aux bulles pour remonter en surface.

On observe donc une mousse chargée en surface tandis que les particules à surfaces hydrophiles restent en suspension dans la pulpe.

A Imiter, le moussant utilisé est le MIBC et les collecteurs utilisés sont l'aérophine et l'AXK.

A l'issue de l'étape de flottation, nous obtenons des rejets qui partent vers la digue non cyanurée, et une pulpe concentrée en argent et qui va alimenter l'étape de la cyanuration.

2.5. Cyanuration

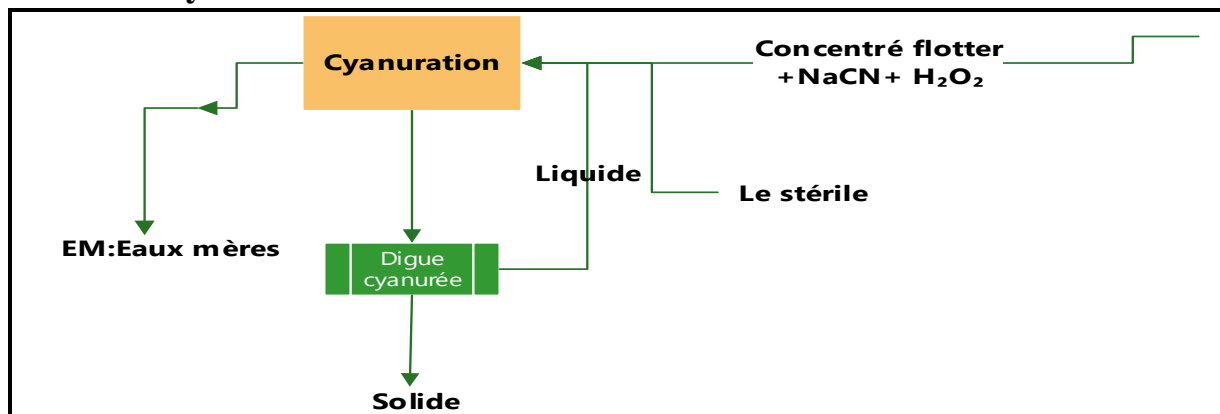


Figure 8 : Cyanuration

L'objectif de la cyanuration est de mettre l'argent en solution pour pouvoir le récupérer ensuite sous forme de ciments. L'étape commence par le stockage du concentré flotté il contient cinq agitateurs en série où l'on ajoute le cyanure de sodium (NaCN) pour dissoudre l'argent. Dans le premier agitateur on ajoute de l'eau oxygénée H₂O₂, et ce pour ne pas inverser le sens de la réaction de complexation de l'argent avec le cyanure. En plus du taux d'oxygène et de cyanure libre dans la solution, il est important également de contrôler la température et le pH (entre 11 et 12). A la sortie de cette étape, on retrouve une pulpe qui contient de l'argent liquide et une quantité d'argent solide qui n'a pas été dissoute.

En résumé, la cyanuration nous permet d'obtenir de l'argent liquide qu'on appelle eaux-mères et qui va alimenter la cémentation. On a également à la fin du circuit des rejets qui contiennent une certaine teneur en argent solide et en argent liquide.

2.6. Cémentation

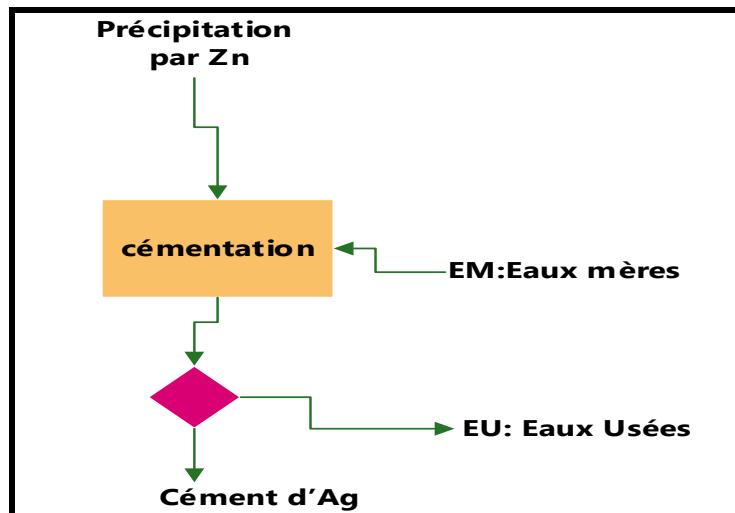
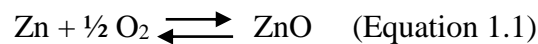


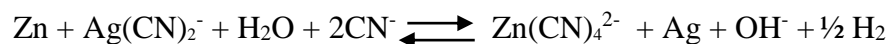
Figure 9 : Cémentation

L'objectif de la cémentation est de récupérer l'argent liquide à la sortie de la cyanuration sous forme de ciments d'argent (argent solide) et ce à travers une réaction de précipitation de l'argent avec le Zinc. Au préalable, on doit :

- Eliminer les matières en suspension par clarification sur des toiles filtrantes
- Eliminer l'oxygène gênant la précipitation en consommant le Zn selon l'équation 1.1.



Cette désoxygénation est réalisée par une pompe à vide. Ensuite la poussière de zinc est ajoutée aux eaux mères clarifiées et désoxygénées. Les principales réactions de dissolution de zinc et de précipitation d'argent sont :



Le mélange Eaux mère/Zinc alimente 4 filtres presses où le ciment d'argent est retenu. Ce dernier constitue l'un des intrants de la fonderie.

Les eaux à la sortie du filtre presse, dites eaux usées, devenues pauvres en argent (de l'ordre de 5 à 10 ppm d'argent), sont recyclées pour servir au lavage dans l'étape de la cyanuration.

2.7. Lixiviation

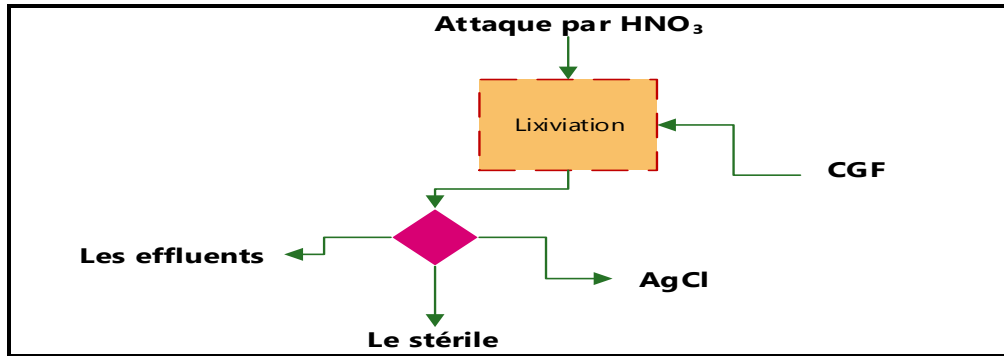


Figure 10 : Lixiviation

L'objectif de l'étape de lixiviation est d'augmenter la teneur en argent du CGF en transformant ce dernier en chlorure d'argent AgCl avant de l'envoyer à la fonderie. En effet, AgCl contient 70-72% d'argent tandis que le CGF en contient seulement 10-25%.

Les opérateurs ramènent le CGF dans des sacs à l'unité de lixiviation où il est introduit dans un réacteur contenant de l'eau et de l'acide nitrique HNO₃. L'ajout de HNO₃ a pour objectif d'obtenir du nitrate d'argent (AgNO₃). La solution obtenue est pompée vers un filtre à presse. Le nitrate d'argent est ensuite récupéré puis mis dans un réacteur avec NaCl pour obtenir du chlorure d'argent AgCl qui sera donc envoyé à la fonderie et qui a une plus forte teneur en argent.

La lixiviation nous permet donc de transformer le CGF en chlorure d'argent qui est plus riche en argent, et qui constitue l'un des intrants de la fonderie.

2.8. Fonderie

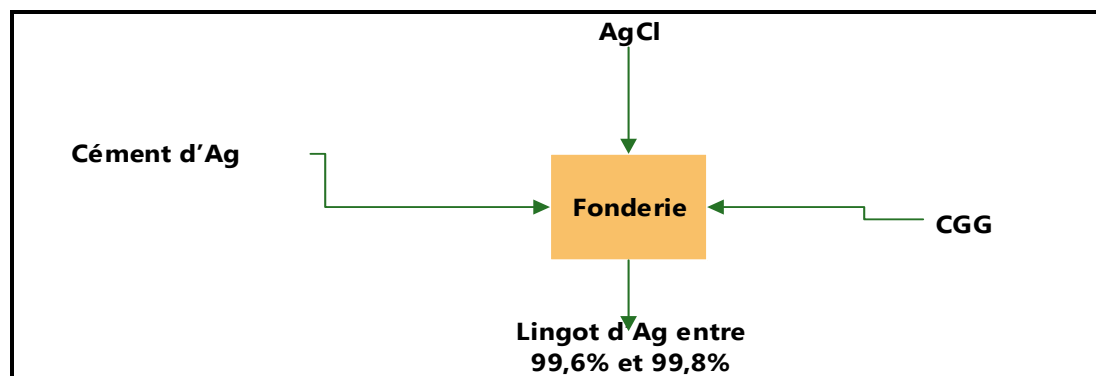


Figure 11 : Fonderie

La fonderie est la dernière étape du processus de traitement de l'argent. Son objectif est de mettre sous forme commercialisable l'argent qu'on a pu récupérer sous différentes formes. A l'issue de cette opération on retrouve de l'argent fini à une teneur entre 99,6 et 99,8%.

L'entrée de la fonderie est constituée des intrants suivants :

- Le CGG contenant 63% d'argent

- L'AgCl issue de la lixiviation contenant 70 - 72% d'argent
- Le ciment contenant 70 - 80% d'argent

Le ciment à lui seul constitue jusqu'à 80% des intrants de la fonderie, d'où l'importance des étapes qui précèdent la cémentation à savoir la flottation et la cyanuration.

La fonte de l'argent solide commence par :

- **Démércurisation** : Le but à ce niveau est de récupérer le mercure contenu dans les différents intrants. En effet, le ciment contient entre 1-4% de mercure, les plaques en contiennent 15% et les CGG environ 10%. Pour ce faire, on introduit le mélange d'intrants dans un four électrique à 650°C. La température d'évaporation du mercure (Hg) étant de 500°C, on récupère la vapeur Hg qu'on condense par la suite pour la protection de la santé du personnel et de l'environnement. Hg liquide est donc récupéré est aussi commercialisé.

- **La fusion** : L'objectif de cette étape est d'éliminer les impuretés et faire fondre l'argent provenant de la 1ère étape. Tous les intrants sauf AgCl sont introduits dans un four à propane avec de l'air à 962°C (température de fusion de Ag). Pour s'assurer que toute la quantité d'argent introduite sera fondue, on ajoute du Borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) qui a pour rôle de diminuer la température de fusion de l'argent. Comme les impuretés sont moins denses que l'argent, elles flottent à la surface formant ce qu'on appelle des scories. Une analyse en teneur d'argent est faite sur les scories. Si celle-ci est supérieure à 3%, les scories sont recyclées dans l'étape de la fusion. Sinon, elles sont renvoyées au niveau du concassage.

- **L'affinage** : L'affinage permet d'éliminer les impuretés contenues dans AgCl. La même opération précédente est faite dans les mêmes conditions sauf que l'on utilise du carbonate de sodium, de la chaux et de la farine. Comme AgCl contient encore du plomb (Pb) et du zinc (Zn), on l'oxyde pour éliminer ces impuretés. On obtient du PbO et du ZnO sous forme de poudre dans des filtres à manches. PbO est recyclé à la cyanuration et ZnO au niveau de la cémentation.

- **La coulée** : L'objectif de cette étape est de mettre l'argent sous forme commercialisable. Pour ce faire, on fait couler l'argent liquide dans les moules. On obtient ainsi des lingots d'argent de 10,3 Kg en moyenne avec une teneur de 99.7% d'argent appelés anodes d'argent. Les produits sont numérotés et des échantillons sont prélevés pour analyser la teneur d'argent.

3. Présentation et cadre du projet :

3.1. Introduction :

L'usage des différents fours à gaz est très courant dans l'industrie minière pour la fusion et le chauffage du métal, la plupart de ces équipements ont été installés lorsque le coût du combustible était relativement bas, sans tenir compte des possibilités de gestion de l'énergie. Même aujourd'hui les coûts d'exploitation et le rendement de la production demeurent souvent le premier critère de la sélection des équipements, sans soucis des économies d'énergie.

De nos jours des techniques de gestion de l'énergie applicable s'avèrent de plus en plus profitable en raison du coût élevé des combustibles, en effet l'introduction de ces techniques peut entraîner des économies très importantes.

Souvent, la mise en œuvre de possibilité de gestion de l'énergie représente l'un des investissements les plus rentables pour une industrie et dans ce cadre la société métallurgique d'imiter a décidé de s'engager dans un projet de régulation de température des fours de fusion afin d'optimiser la consommation du propane au niveau de la fonderie, sans oublier que ce dernier représente 37% du coût de revient annuel total de la fonderie.

Face à ce défi budgétaire, nous avons comme mission de trouver une solution de régulation fiable pour l'optimisation de la consommation de l'énergie des fours de fusion toute en préservant les caractéristiques requises du métal.

3.2. Objectifs du projet :

L'objectif du présent projet se résume comme suit :

- Optimiser la consommation du propane et améliorer les prévisions budgétaires de consommation du combustible dans les fours de fusions.
- Respecter le profil de la température de fusion de l'argent par régulation de température des creusets.
- Réduire le volume des fumées et donc protéger l'environnement d'une part et d'autre part augmenter/améliorer le rendement de combustion de four.
- Etablir une cohérence entre tous les paramètres d'influence sur la consommation du gaz.
- Améliorer les conditions de travail par installation des dispositifs d'allumage du four (bougie, détecteur de la flamme, détecteur de fuite de gaz...).

3.3. Principales étapes du projet :

Afin de mener à bien notre projet, tout en atteignant les objectifs tracés avec le respect des contraintes, nous comptons suivre les étapes suivantes :

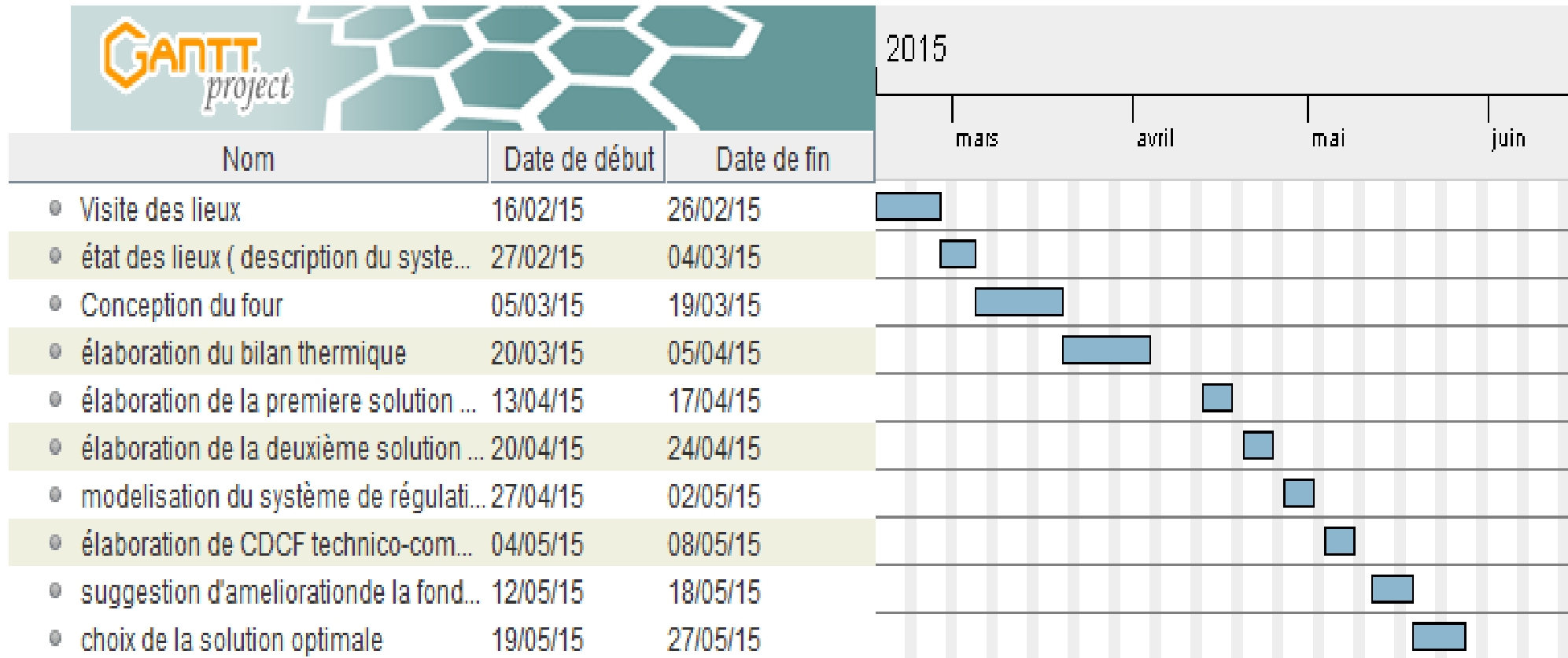
- Etats des lieux (description du four, diagnostiquer le système actuel d'allumage et de gestion du gaz propane...)
- Elaboration du bilan thermique (énergétique) et détermination du ratio Gaz/Métal
- Etude théorique de la combustion du propane et définition du rapport air/gaz nécessaire pour le propane.
- Etude du système de régulation de température des fours et élaboration du cahier de charge technico-commercial pour les solutions suggérées.
- Suggestion d'amélioration du rendement des fours et des conditions de travail dans la fonderie.

3.4. Planification

La réussite d'un projet est aussi fonction d'une gestion efficace du temps et des ressources et le plan mis en œuvre contribue à la maîtrise et à la mesure de son progrès.

Les phases et les tâches associées à notre projet sont classées et font l'objet d'un diagramme GANTT présenté ci-dessous.

Diagramme GANTT :



Chapitre II : Analyse de l'existant et évaluation des besoins énergétiques

Introduction

Avant tout départ d'étude, notamment lors d'une réhabilitation, il est nécessaire d'effectuer une visite des lieux pour mieux comprendre le contexte. En effet ne pas constater les faits par soi même implique parfois des erreurs le plus souvent conduisant à une étude moins fiable.

Dans le cas d'une réhabilitation, il est nécessaire de constater l'existant pour estimer l'ampleur des travaux. L'utilisation d'un appareil photo est essentielle dans ce type d'examen, ce détail peut paraître évident, mais sans preuve et souvenir visuel de la visite, il est difficile de réaliser un état des lieux rigoureux et cohérent.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à l'installation actuelle des fours de fusion en effectuant un état de lieu descriptif afin d'avoir une idée sur l'état des équipements utilisés et les problèmes rencontrés dans la fonderie.

Puis nous passerons à l'élaboration d'un bilan énergétique pour les fours dans le but d'évaluer les besoins énergétiques de la fonderie et nous finirons par une comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux.

1. Etat des lieux et diagnostique du système actuel :

1.1. Four de fusion :

La fonderie dispose de 4 fours de fusion qui sont des fours à creusets en matériaux graphite avec un brûleur ayant le propane comme combustible.

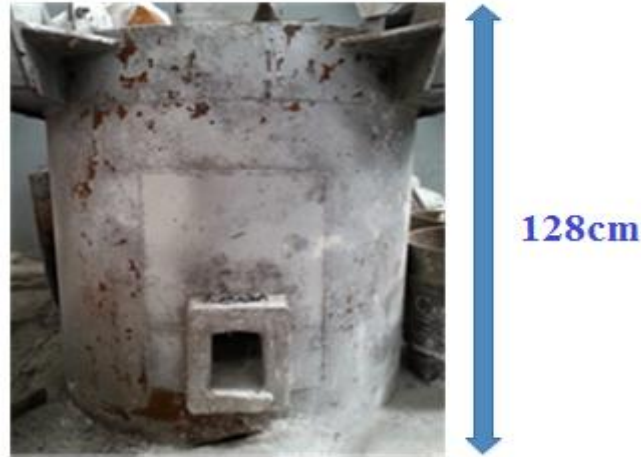


Figure 12 : Four à creuset

Ces 4 fours sont installés chacun dans une fosse de même géométrie, et entourés de 3 couches de briques réfractaires rouge servant comme isolants pour le creuset. D'autre part, le four est couvert d'une paroi final en matériaux ferreux avec une ouverture carrée servant pour l'aéragé de la chambre de combustion qui se situe entre le brûleur et le creuset.

Le fonctionnement actuel du four pourrait être qualifié de primitive et artisanal comme ceci est décrit dans la figure ci-dessous :

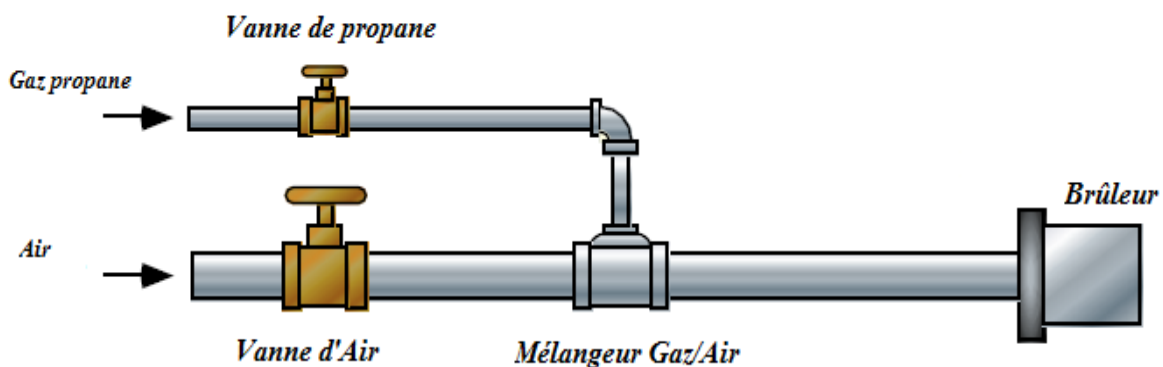


Figure 13 : Système d'alimentation en combustible du four

L'opérateur agit sur l'ouverture et la fermeture des vannes d'air et de gaz et surtout celui de gaz pour maintenir un mélange qui est proche du rapport stœchiométrique, en effet, il agit manuellement sur le mélange air/gaz pour maintenir une flamme de diffusion ayant une couleur bleu,

le contrôle de la couleur de la flamme est fait visuellement. De ce fait, ce système contient plusieurs inconvénients, mentionnant :

- L'absence des capteurs de température : le profil de température de fusion d'argent n'est pas respecté, ainsi la surconsommation du propane, influençant sur la qualité de l'argent fusionné.
- L'absence d'un système d'allumage du four : actuellement, la fonderie dispose d'une méthode d'allumage traditionnelle, c'est-à-dire l'allumage est fait par briquet ou allumette sachant que la manipulation de cette tâche expose les opérateurs aux différents dangers liés à la sécurité du travail, l'opérateur doit donc suivre quelques instructions afin de ne pas provoquer des dangereuses qui peuvent atteindre des risques d'explosion.
- L'absence des capteurs de débit : Aucune mesure de débit d'air et de gaz n'est effectuée lors de l'utilisation du four. Pour avoir une idée sur la consommation du propane, il faut avoir recours à l'historique de la consommation mensuelle prise avec des jauges de niveau installées dans des citernes où on stock le propane, ceci entraîne des incertitudes concernant la consommation du combustible.
- L'absence des jauges de pression : Le contrôle de pression ne se fait pas, et donc aucune information concernant la pression dans les canalisations d'air et de gaz n'est reçue.
- L'absence des détecteurs de flammes : Le contrôle de la flamme de gaz se fait visuellement, d'ailleurs c'est le seul indicateur dans la fonderie de la qualité de la combustion, Donc l'information est non fiable.
- L'absence des détecteurs de fuite de gaz : Le gaz et l'air peuvent former un mélange explosible, et sans surveillance des fuites de gaz, on met en danger le personnel et l'installation implantée au sein de la fonderie.
- L'absence de contrôle de volume des fumées : Ce qui augmente la probabilité d'engendrer des émissions pouvant nuire à l'environnement.
- Les portes des fours sont ouvertes la majorité du temps, ainsi que l'état détérioré des isolants.

1.2. Etat des lieux des équipements environnants

- Les conduites du propane ailleurs de la fonderie : sont simplement des tubes galvanisés non destinés pour la distribution du propane.



Figure 14 : Conduite de propane

- Les électrovannes et détendeurs : Mises en terre sans isolation contre la pluie et la chaleur, dégradés par l'effet de corrosion, et des joints usés, ce qui entraîne des fuites de propane dans les lieux. (Etat très grave)



Figure 15 : Electrovanne avec détendeur



Figure 16 : Etat de l'électrovanne

- Les conduites du propane à l'intérieur de la fonderie : Trop de coude et donc perte d'énergie tout au long de la conduite avec existence du jeu au niveau des vannes.



Figure 17 : Conduite équipée de vanne manuelle

- Les boîtiers électriques à l'intérieur de la fonderie : Encombrement des fils à proximité des fours risquant de déclencher un incendie à tout instant.



Figure 18 : boîtier électrique du ventilateur d'air

- L'ensemble de l'installation en dehors de la fonderie : L'absence de protection contre les contraintes du milieu peut endommager tous les équipements.



Figure 19 : Installation en dehors de la fonderie

1.3. Conclusion

Pour conclure, l'investissement dans la rénovation des installations de la conduite du combustible et des équipements électriques au sein de la fonderie est obligatoire pour avoir une bonne gestion du combustible, et d'autre part pour la sécurité et le bien du personnel et de la société.

2. Evaluation des besoins énergétiques au sein de la fonderie :

2.1. Introduction :

Afin d'évaluer les besoins énergétiques pour les fours de fusion, on est amené à élaborer un bilan thermique (énergétique), afin d'avoir une idée claire sur la consommation du propane et trouver un ratio gaz/métal, c'est-à-dire la quantité de propane consommée de propane pour avoir 1Kg d'argent fusionné. Le ratio calculé par la société varie entre 1.13 et 1,23 sachant que la société calcule ce ratio comme suit :

$$\frac{\text{la consommation mensuelle du propane}}{\text{l'ensemble de la charge qui entre a la fonderie au cours du mois}}$$

l'ensemble de la charge : -70% argent. – 1.5% plomb – 2 % zinc -1.8% cuivre

21% insolubles.

Pour trouver un ratio similaire à celui de la société, il faut d'abord connaître la capacité thermique de la presse, et ceci grâce à une analyse DSC, sinon dans le cas d'absence de cette analyse, il faut trouver une corrélation des capacités thermiques de tous les composants de la charge Dans la partie suivante, nous avons effectué le bilan thermique en utilisant juste la capacité thermique de l'argent dans des intervalles de températures spécifiques, sans considérer les autres composants de la charge (Cuivre, zinc, plomb, insolubles, mercure) car ils sont présent avec de faibles pourcentages, Ainsi le ratio théorique trouvé est comme suit :

$$\frac{\text{la consommation du propane mensuelle}}{\text{la quantité d'argent fusionné du mois (70\% de la charge)}}$$

Le calcul ne prendra compte que de d'argent contenu dans la charge vue la complexité de la maîtrise des pourcentages des matières contenues dans la presse.

2.2. Bilan thermique du four :

2.2.1. Schéma descriptif du four :

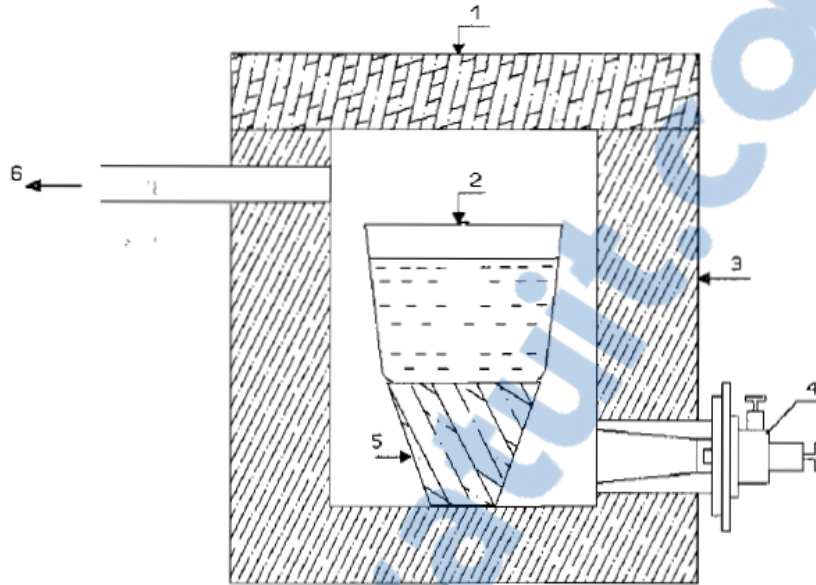


Figure 20 : Schéma du four

1. Voûte ou porte du four
2. Creuset contenant la charge
3. Parois réfractaires
4. Brûleur
5. Support de creuset
6. Echappement des gaz de la fumée

2.2.2. Evaluation des besoins en chaleur :

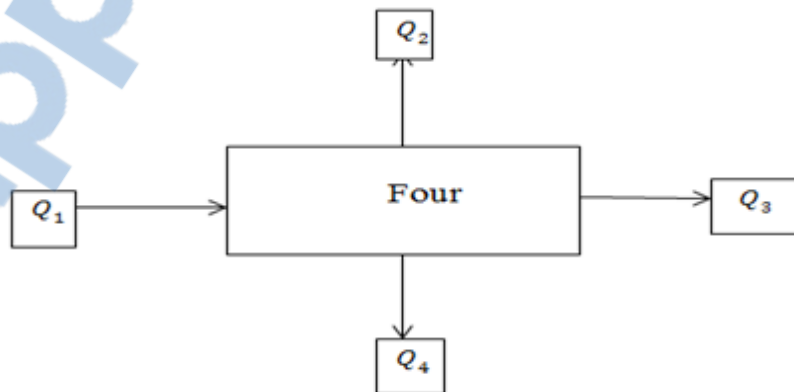


Figure 21 : Schéma simplifié d'un bilan thermique du four

Avec :

Q_1 : Quantité de chaleur apportée par le combustible

Q_2 : Quantité de chaleur absorbée par la charge (on considère que la charge contient 70% d'argent)

Q_3 : Quantité de chaleur absorbée par le creuset

Q_4 : Quantité de chaleur dissipée par les différentes sources (conduction par parois, rayonnement par ouvertures, les fumées)

2.2.3. Elaboration du bilan énergétique :

Pour commencer notre bilan, nous débutons par l'équation :

L'énergie entrante = énergie stockée + énergie sortante.

Donc :

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4$$

Avec :

$$Q_1 = M_{\text{propane}} \times \text{PCI}_{\text{propane}}$$

$$Q_2 = 0,7 \times M_{\text{argent}} \times C_{\text{argent}} \times (T_{\text{fusion}} - T_{\text{amb}}) + 0,7 \times M_{\text{argent}} \times L + 0,7 \times M_{\text{argent}} \times C_{\text{argent}} \times (T_{\text{coulé}} - T_{\text{fusion}})$$

$$Q_3 = M_{\text{creuset}} \times C_{\text{creuset}} \times (T_{\text{coulé}} - T_{\text{amb}})$$

L'absence de données sur les dimensions du four et sur la nature des matériaux de sa construction dans cette phase nous oblige, à recourir à des méthodes empiriques pour ce qui concerne le calcul des pertes. Si non, nous pouvons nous appuyer sur l'une des analyses réalisées sur le four.

D'après un essai réalisé par la société 'CIELEC électronique automatisme' sur le four (voir annexe 1), nous avons comme résultat :

Q_4 = les pertes de chaleur s'évaluent environ à 34% de la chaleur apportée par le combustible ce qui traduit par :

$$Q_4 = 0,34 \times Q_1$$

Donc :

$$M_{\text{propane}} \times \text{PCI}_{\text{propane}} = 0,7 \times M_{\text{argent}} \times C_{\text{argent}} \times (T_{\text{fusion}} - T_{\text{amb}}) + 0,7 \times M_{\text{argent}} \times L + 0,7 \times M_{\text{argent}} \times C_{\text{argent}} \times (T_{\text{coulé}} - T_{\text{fusion}}) + M_{\text{creuset}} \times C_{\text{creuset}} \times (T_{\text{coulé}} - T_{\text{amb}}) + 0,34 \times M_{\text{propane}} \times \text{PCI}_{\text{propane}}$$

Donc :

$$(1-0,34) \times M_{\text{propane}} \times \text{PCI}_{\text{propane}} = 0,7 \times M_{\text{argent}} \times C_{\text{argent}} \times (T_{\text{fusion}} - T_{\text{amb}}) + 0,7 \times M_{\text{argent}} \times L + 0,7 \times M_{\text{argent}} \times C_{\text{argent}} \times (T_{\text{coulé}} - T_{\text{fusion}}) + M_{\text{creuset}} \times C_{\text{creuset}} \times (T_{\text{coulé}} - T_{\text{amb}})$$

Donc :

$$0,66 \times M_{\text{propane}} \times \text{PCI}_{\text{propane}} = 0,7 \times M_{\text{argent}} \times [C_{\text{argent}} \times (T_{\text{fusion}} - T_{\text{amb}}) + L + C_{\text{argent}} \times (T_{\text{coulé}} - T_{\text{fusion}})] + M_{\text{creuset}} \times C_{\text{creuset}} \times (T_{\text{coulé}} - T_{\text{amb}})$$

Notons que la capacité thermique d'argent entre la température de fusion et la température ambiante a une valeur différente de la capacité thermique d'argent entre la température de coulée et la température de fusion.

C'est-à-dire : $C_{\text{argent}} = C1$ dans l'intervalle $[T_{\text{amb}}, T_{\text{fusion}}]$ et $C_{\text{argent}} = C2$ dans l'intervalle $[T_{\text{fusion}}, T_{\text{coulé}}]$

Donc l'équation devient :

$$0,66 \times M_{\text{propane}} \times \text{PCI}_{\text{propane}} = 0,7 \times M_{\text{argent}} \times [C1 \times (T_{\text{fusion}} - T_{\text{amb}}) + L + C2 \times (T_{\text{coulé}} - T_{\text{fusion}})] + M_{\text{creuset}} \times C_{\text{creuset}} \times (T_{\text{coulé}} - T_{\text{amb}})$$

Donc pour faire fondre 1kg de la charge, on a besoin de :

$$M_{\text{propane}} = \frac{0,7 \times [C1 \times (T_{\text{fusion}} - T_{\text{amb}}) + L + C2 \times (T_{\text{coulé}} - T_{\text{fusion}})]}{0,66 \times \text{PCI}_{\text{propane}}} + \frac{M_{\text{creuset}} \times C_{\text{creuset}} \times (T_{\text{coulé}} - T_{\text{amb}})}{0,66 \times \text{PCI}_{\text{propane}}}$$

Avec :

$$C1 = 8,25 \times 10^{-5} \text{ KWh/Kg. K} \quad C2 = 8,61 \times 10^{-5} \text{ KWh/Kg. K}$$

$$C_{\text{creuset}} = 1,02 \times 10^{-4} \text{ KWh/Kg. K} \quad L = 2,89 \times 10^{-2} \text{ KWh/Kg. K}$$

$$T_{\text{amb}} = 28^\circ\text{C} \quad T_{\text{fusion}} = 962^\circ\text{C} \quad T_{\text{coulé}} = 1160^\circ\text{C}$$

$$M_{\text{creuset}} = 98 \text{ Kg} \quad \text{PCI}_{\text{propane}} = 12,78 \text{ KWh/Kg}$$

Ainsi le ratio théorique Gaz/Métal égal à :

$$\frac{M_{\text{propane}}}{M_{\text{argent}}} = 1,32$$

Conclusion

Le bilan thermique du four nous a permis de calculer un ratio Gaz/Métal d'une valeur de 1,32, différente de la moyenne des ratios expérimentaux de 1,2. Nous constatons une différence de 9% entre les 2 ratios, ceci revient au fait que nous avons travaillé avec une charge contenant 70% d'argent, ce qui n'est pas le cas toujours dans la fonderie puisque la charge varie d'une presse à l'autre, et du fait que les capacités thermiques utilisées représentent des moyennes sur des intervalles en fonction de la température et non des valeurs constantes.

D'autre part l'estimation des pertes demeure relative et varie d'un four à l'autre, puisque nous ne maîtrisons pas les pertes dans les quatre fours, et dans notre cas nous avons effectué le bilan pour un seul four avec des pertes qui représentent 34% de la chaleur apportée au four. Représentant ainsi une source de perte majeure au niveau budgétaire pour la société. D'où l'imminence de la rénovation au sein de la fonderie, tâche qui fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III : Etude du système de régulation de température des fours de fusion

Introduction

Les techniques de l'automatique ne sont pas seulement des moyens pour commander des processus, mais aussi un moyen pour réduire les pertes de production, pour augmenter la qualité et la quantité des produits, pour optimiser la consommation de l'énergie et pour réduire les coûts marginaux de production.

Dans ce chapitre, nous développerons des solutions de régulation de température pour les fours de fusion, nous entamerons notre étude par la mise en œuvre des moyens matériels et techniques pour les solutions proposées.

Après la mise en œuvre des solutions, nous passerons à l'étape de modélisation du système en utilisant les méthodes d'identification afin de trouver le modèle convenable pour notre processus.

Ensuite, nous simulerons les résultats d'identification sur Matlab/Simulink qui permet la modélisation, la simulation et l'analyse des systèmes dynamiques (variable en fonction du temps) à partir de blocs dans le but d'avoir le maximum d'informations sur le nouveau système et le comparer avec le système actuel.

1. Généralités sur la régulation :

1.1. Définitions :

La régulation des procédés thermiques comme les fours de fusion regroupe l'ensemble des moyens matériels et techniques mis en œuvre pour maintenir une grandeur physique à régler, égale à une valeur désirée, appelée consigne. Lorsque des perturbations ou des changements de consigne se produisent, la régulation provoque une action correctrice sur une grandeur physique du procédé, appelée grandeur réglante, assurant un fonctionnement optimal prédéfini par un cahier des charges (conditions ou performances imposées). Les aspects de sécurité du personnel et des installations sont à prendre en compte comme ceux concernant l'énergie et le respect de l'environnement, ainsi que les critères imposés par le cahier de charge tels que la stabilité, la précision et la rapidité. Dans cette partie, nous nous intéresserons à l'étude théorique, aux moyens matériels et techniques de mise en œuvre de la régulation.

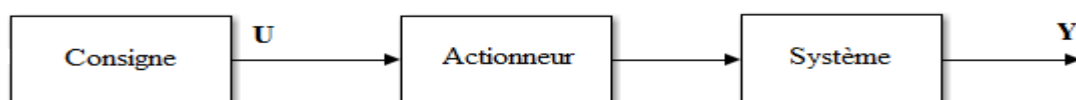
1.2. Technologies de régulation :

Il y a plusieurs types de régulations industrielles possibles telles que :

- TOR : Tout ou rien, élabore une action de commande qui prend deux positions ou deux états (0 et 1). Les régulateurs tout ou rien sont utilisés pour la commande des systèmes où la précision de régulation n'est pas importante.
- PID : Le régulateur standard le plus utilisé dans l'industrie est le régulateur PID (proportionnel, intégral, dérivé), car il permet de régler à l'aide de ses trois paramètres les performances du système. Le régulateur PID est bien adapté à la plupart des processus de type industriels et est relativement robuste par rapport aux variations des paramètres du système. Il existe trois types d'algorithme PID, le PID série, le PID parallèle et le PID mixte.

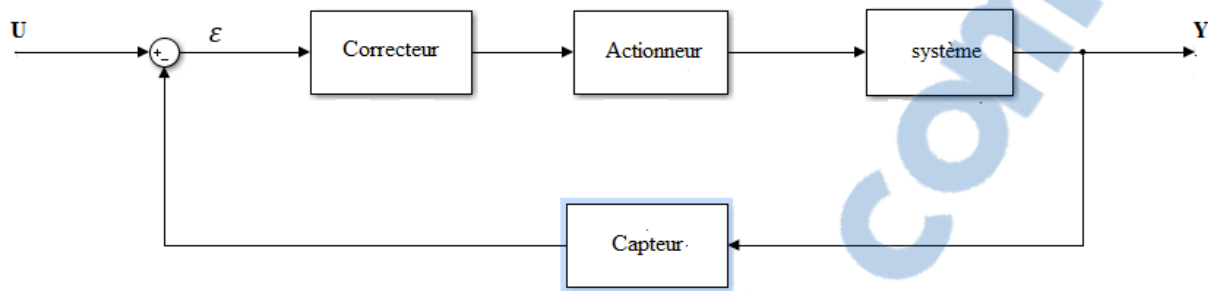
1.3. Définitions des paramètres du système :

- Boucle ouverte



Un système de régulation est dit en boucle ouverte lorsque la réaction du système n'est pas prise en compte.

- **Boucle fermée**



Un système de régulation est dit en boucle fermée si la réaction du système est prise en compte.

1.3.1. Caractéristiques des systèmes :

Les caractéristiques attendues d'un système régulé sont entre autre :

- **Stabilité :** Un système est dit stable si à une entrée limitée, correspond une sortie elle aussi limitée.
- **Rapidité :** La rapidité d'un système de régulation automatique peut être évaluée sur la base de sa réponse indicielle en régulation de correspondance.
- **Précision :** Correspond à la valeur de l'erreur statique observée en régime permanent par rapport à la consigne.

1.3.2. Identification des systèmes :

L'identification d'un système c'est la détermination de son modèle mathématique sur la base des observations expérimentales entrées-sorties. Le modèle obtenu est dit de conduite ou de représentation.

L'identification du système comporte trois étapes :

- ✓ Etape qualitative : Sur la base d'une connaissance du comportement du système identifié, on fixe une structure du modèle comportant des coefficients inconnus.
- ✓ Etape quantitative : Elle consiste à la détermination des coefficients inconnus du modèle de façon que la différence entre les sorties réelles du système et celles du modèle soit minimale.

Parmi les méthodes d'identification les plus connue Strejc, et Broïda.

2. Mise en œuvre des moyens matériels et techniques pour la régulation des fours :

2.1. 1^{ère} solution de régulation :

2.1.1. Schéma descriptif du système de régulation :

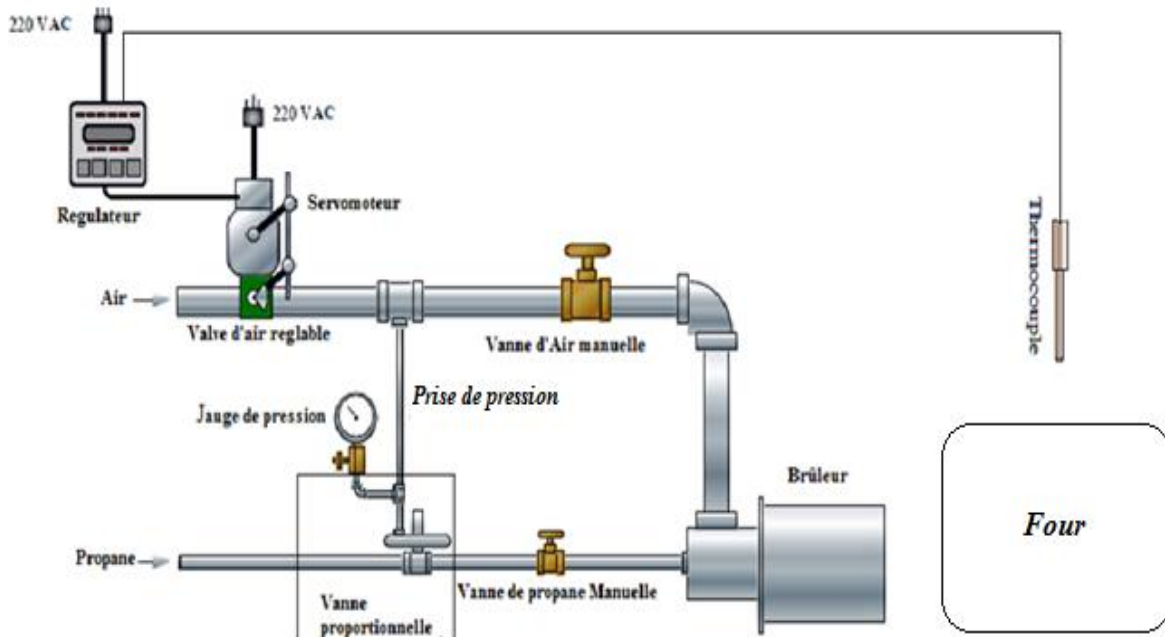


Figure 22 : Schéma de régulation de température du four

2.1.2. Matériel utilisé dans l'installation du système de régulation :

L'installation est décrite sur la figure ci-dessus, Matériellement, le système comporte trois blocs, le four, son coffret électrique et le régulateur. D'un point de vue fonctionnel, le processus se constitue:

- D'un four équipé d'un brûleur de gaz.
- Le capteur, un thermocouple, fournit un signal électrique très faible (quelques mV), qui évolue de façon non linéaire. Ce signal est transmis au régulateur, à quelques mètres, par un câble compensé. L'amplification, la linéarisation et la mise à l'échelle se font par un module de traitement de signal inclus dans le régulateur.
- L'actionneur est une électrovanne proportionnelle avec un servomoteur de modulation de débit utilisé pour manœuvrer l'ouverture et la fermeture de la vanne d'air.
- Robinet de propane et d'air.
- L'électrovanne pneumatique proportionnelle de gaz qui va maintenir le rapport stœchiométrique air/gaz. (Voir annexe 5)

- Le régulateur est un PID en boîtier autonome; La communication se fait essentiellement par le régulateur :
 - Affichage numérique en façade des températures désirées et réelles.
 - Introduction par clavier de la consigne, des réglages, des valeurs d’alarme.
 - Signalisation des alarmes (dépassement d’un seuil de température, rupture du thermocouple).
 - Possibilité de transférer des informations analogiques (mesures) et TOR (alarmes) vers un système de supervision.

2.1.3. Fonctionnement des éléments principaux du système :

2.1.3.1. Régulateur de température PID :

Le régulateur PID de température est l’appareil qui va nous permettre de contrôler la température et garantir les comportements statiques et dynamiques du procédé conforme au cahier de charge défini.



Figure 23 : Exemple de régulateurs de température

C’est l’organe de contrôle le plus utilisé dans l’industrie permettant d’effectuer une régulation en boucle fermée d’un système industriel.

La figure 24 représente un schéma descriptif du fonctionnement d’un régulateur PID, ce type des régulateurs se compose de deux blocs :

- Un comparateur : Son rôle est de calculer l’erreur en comparant la consigne entrée par l’utilisateur et la mesure prise par le capteur.
- Un correcteur PID : permettant trois actions en fonction de l’erreur calculée. Une action proportionnelle, une action intégrale et une action dérivée.

Chaque action est destinée à appliquer un changement sur l’erreur calculée :

- L’action proportionnelle : l’erreur est multipliée par un gain G

- L'action intégrale : l'erreur est intégrée sur un intervalle de temps puis divisé par T_i
- L'action dérivée : l'erreur est dérivée suivant un temps, puis multiplié par un gain T_d

Il existe plusieurs architectures pour combiner les trois actions (série, parallèle, mixte) ceci dépend du système à réguler.

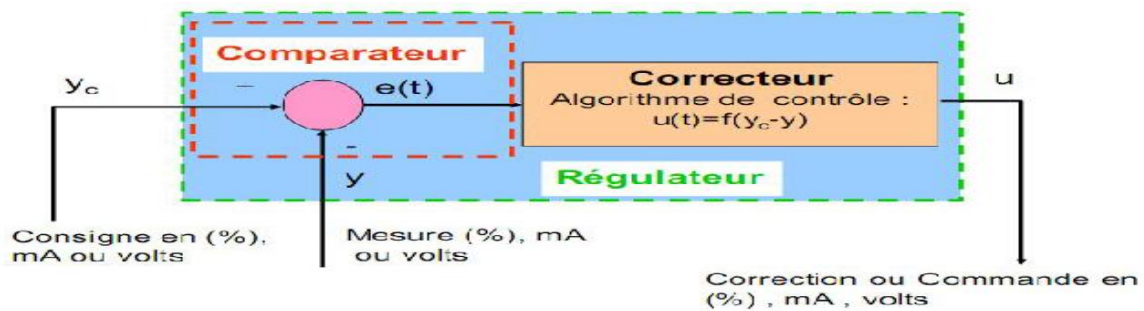


Figure 24 : Schéma descriptif du corps du régulateur PID

2.1.3.2. Electrovanne proportionnelle pour l'admission d'air :

La plupart des électrovannes fonctionnent en "tout ou rien" sur deux positions : ouverte ou fermée. Les électrovannes proportionnelles fonctionnent de façon progressive. En faisant varier le signal électrique d'une électrovanne proportionnelle, le débit du fluide circulant au travers de la vanne peut être réglé de façon continue de 0 à 100 % du débit maximum nominal.



Figure 25 : Electrovanne proportionnelle

L'électrovanne utilisée dans notre installation est constituée d'un servomoteur électrique de modulation de débit.

2.1.3.3. Electrovanne pneumatique proportionnelle

C'est l'organe qui va nous permettre de maintenir le rapport stœchiométrique souhaité.

En général les électrovannes proportionnelles se composent de deux éléments :

- Un volant ou actionneur (actuateur) élément extérieur à la vanne, qui permet de manœuvrer celle-ci. Dans notre cas c'est un servomoteur pneumatique
- Le corps de la vanne est l'élément qui assure le réglage du débit. Il existe plusieurs types de corps de vanne.



Figure 26 : Electrovanne pneumatique proportionnelle

Les servomoteurs pneumatiques sont généralement constitués d'une chambre séparée par un diaphragme sur lequel est attaché un ou deux ressorts. L'air comprimé est injecté d'un côté du diaphragme et contrebalance la poussée des ressorts. La tige se déplace selon la pression exercée sur le diaphragme.

2.1.3.4. Capteur de température : thermocouple

L'un des transducteurs de température les plus fréquemment utilisés est le *thermocouple*. Les thermocouples sont particulièrement durcis et économiques, et peuvent opérer sur une large gamme de températures. Dans notre cas, nous utiliserons un thermocouple de type S avec doigt de gant protecteur.



Figure 27 : Thermocouple

Le thermocouple est un circuit électrique fermé, constitué par deux métaux différents A et B, dont les jonctions sont soumises à un gradient de température. La conversion d'énergie thermique crée un déplacement d'électrons et génère une force électromotrice (f.é.m.) de Seebeck, qui dépend de la nature des deux métaux et de la différence des températures au niveau des jonctions.

2.1.4. Fonctionnement du système :

Le système illustré sur le schéma ci-dessous fonctionne comme suit : les vannes de gaz et d'air assurent le maintien du rapport air/gaz adéquat pour le brûleur, En général c'est l'air qui pilote le gaz de manière à garantir qu'il n'y ait de gaz au brûleur que s'il y a de l'air (donc pas d'air => pas de gaz). Pour cela, il y a éventuellement une liaison pneumatique entre les deux vannes. Le régulateur reçoit la valeur de la température du four par l'intermédiaire d'un thermocouple, il la compare avec la consigne, si la température réelle chute sous la consigne, le régulateur envoie le signal au servomoteur pour actionner l'ouverture de la vanne d'air qui ouvre la vanne de gaz. Lorsque la température chute sous la consigne, le régulateur commande l'ouverture de la vanne d'air et une mesure du débit d'air au moyen d'un diaphragme permettant le calcul du débit de gaz requis. Ce calcul consiste à diviser le débit d'air mesuré par le rapport air/gaz demandé (la consigne de rapport air/gaz) :

$$\text{consigne de débit de gaz (Nm}^3/\text{h)} = \frac{\text{débit d'air mesuré (Nm}^3/\text{h)}}{\text{consigne de rapport air/gaz}}$$

La vanne d'air (pression d'air) adapte l'ouverture de la vanne proportionnelle de gaz de manière à obtenir une mesure de débit de gaz (diaphragme) aussi proche que possible de la consigne calculée.

2.2. 2^{ème} solution de régulation

2.2.1. Schéma descriptif du système de régulation

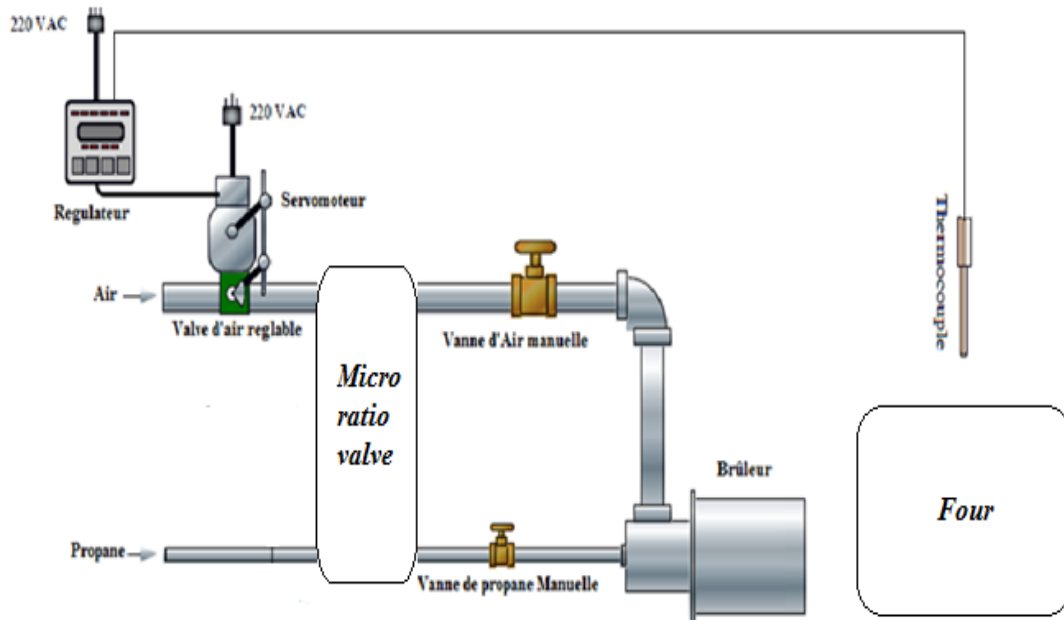


Figure 28 : schéma du système de régulation de température du four

2.2.2. Matériel utilisé dans l'installation du système de régulation

Le matériel utilisé dans cette installation est similaire aux matériels de l'installation précédente sauf que la vanne proportionnelle est remplacée par un micro ratio valve qui va accomplir la fonction de la vanne proportionnelle et maintenir le ratio ou le rapport stœchiométrique pour avoir une combustion parfaite.

2.2.2.1. Micro ratio valve (Vanne micro ratio)



Figure 29 : Micro ratio valve

Pour contrôler le rapport du mélange de combustion, des combinaisons de vannes de régulation de débit Micro-ratio sont utilisées pour une régulation proportionnée de l'air de combustion et du gaz. L'ensemble de came à vis multiple permet des possibilités d'ajustage du rapport air/combustible, à chaque position de la vanne sur toute la plage de puissance du système de combustion industriel. La loi d'ouverture de cette vanne est complètement réglable et conçue pour la plage de modulation extrêmement importante des systèmes de combustion modernes.

2.2.3. Fonctionnement du système

Le système dans le schéma ci-dessous fonctionne comme suit : le régulateur envoie un signal de commande 4-20mA au servomoteur de l'électrovanne d'air, qui à son tour, commande l'ouverture de la vanne avec les débits souhaités. Ensuite le micro ratio valve intervient pour assurer la régulation proportionnée de l'air et du gaz.

A la sortie du micro ratio valve, l'air et le gaz sont acheminés vers le brûleur en maintenant le rapport stœchiométrique voulu entre ces 2 fluides.

3. Modélisation et identification du système de régulation de température des fours de fusion

3.1. Introduction

Dans la partie précédente, nous avons proposé deux solutions de régulation de température pour les fours de fusion et donc nous avons été amené à élaborer le modèle de commande ou de conduite qui est utilisé pour commander notre procédé. Pour élaborer ce modèle nous avons besoin des méthodes d'identification.

Ces méthodes peuvent avoir deux buts :

- Identifier ou modéliser un processus réel
- Déterminer, en première approximation, les paramètres des correcteurs à utiliser

3.2. Modélisation de régulation du processus

3.2.1. Schéma fonctionnel du système régulé

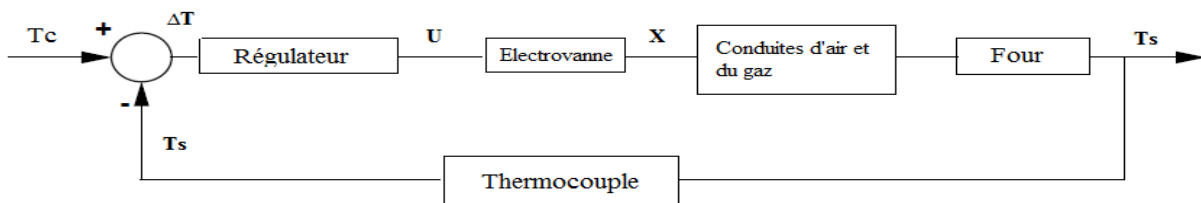


Figure 30 : Schéma fonctionnel du processus

3.2.2. Fonction de transfert du système en boucle ouverte et en boucle fermée

3.2.2.1. Schéma bloc du processus

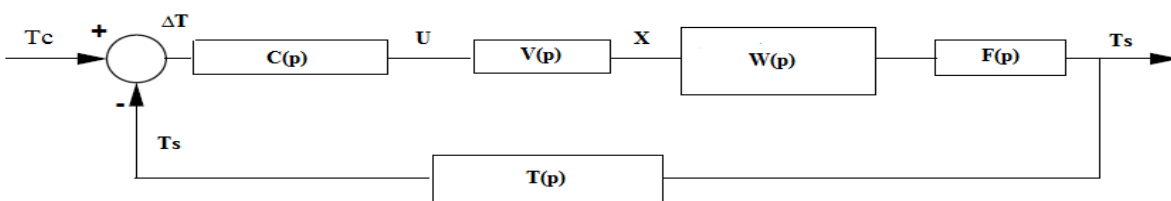


Figure 31 : Schéma bloc du processus

3.2.2.2. Fonction de transfert en boucle ouverte (sans correction)

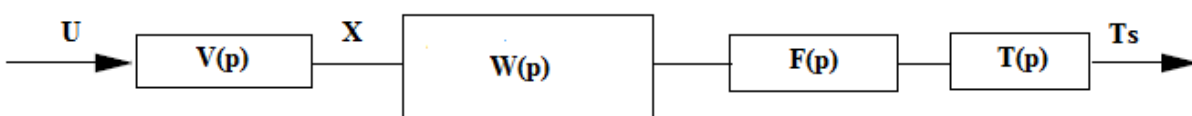
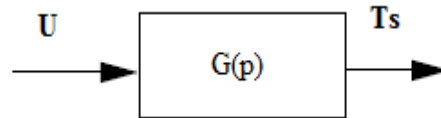


Figure 32 : Schéma fonctionnel en boucle ouverte

On a : $U(p) \times V(p) \times W(p) \times F(p) \times T(p) = Ts(p)$

Donc :
$$\frac{Ts(p)}{U(p)} = V(p) \times W(p) \times F(p) \times T(p)$$

Ainsi le système est équivalent à :



La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit sous la forme :

$$G(p) = V(p) \times W(p) \times F(p) \times T(p)$$

3.2.2.3. Fonction de transfert en boucle fermée (avec correction)

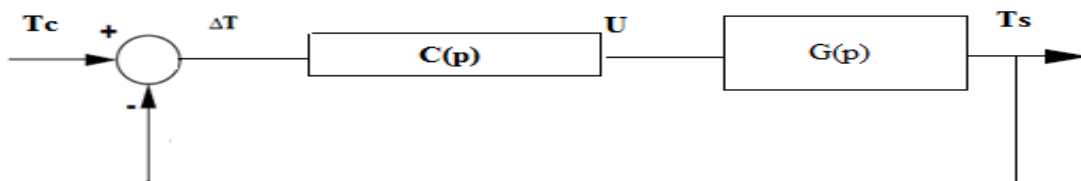
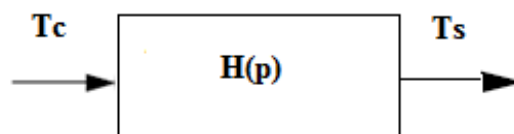


Figure 33 : Schéma fonctionnel en boucle fermée

On a :
$$Tc(p) \times \frac{C(p) \times G(p)}{1 + C(p) \times G(p)} = Ts(p)$$

Donc :
$$\frac{Ts(p)}{Tc(p)} = \frac{C(p) \times G(p)}{1 + C(p) \times G(p)}$$

Ainsi le système est équivalent à :



La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit sous la forme :

$$H(p) = \frac{C(p) \times G(p)}{1 + C(p) \times G(p)}$$

3.3. Identification du processus de régulation :

3.3.1. Essai en boucle ouverte :

Dans le but d'identifier la dynamique des fours, nous avons effectué un essai en boucle ouverte pour avoir une idée sur l'évolution de la température du four par rapport au temps.

L'enregistrement de la sortie est réalisé en effectuant un suivi de température avec un appareil de mesure de température qui prélève comme température maximale 1150°C.

Le suivi a duré presque 2h en prenant plusieurs valeurs de température à plusieurs instants (voir annexe 2).

L'enregistrement de l'entrée n'a pas été réalisé expérimentalement car les débitmètres ne sont pas installés sur les conduites d'air et du gaz, mais nous avons essayé de recueillir le maximum d'informations auprès du personnel expérimenté sur l'ouverture des vannes et les débits approximatifs pour modéliser l'entrée du système.

Les mesures des températures ont été effectuées à l'intérieur du creuset tout en essayant de fixer le point de prélèvement à cause de la non-uniformité de la répartition de la température à l'intérieur du creuset.

Pendant cet essai, nous avons constaté que les débits d'air et gaz sont maintenus à une valeur constante. Autrement dit, l'opérateur n'agit sur les vannes qu'au démarrage du système.

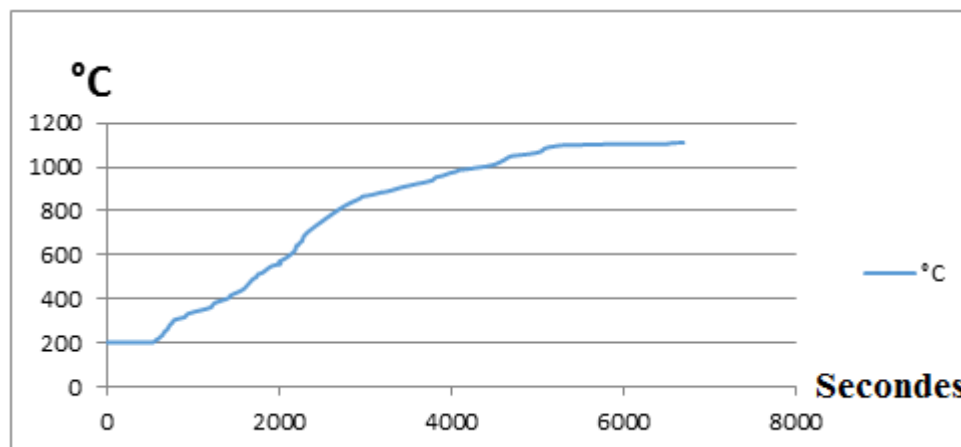


Figure 34 : Evolution de la température du four en fonction du temps

Afin de rendre cette courbe plus exploitable pour identifier le processus, nous avons opté une courbe de tendance à l'aide du logiciel Excel et nous avons comme résultat la courbe suivante :

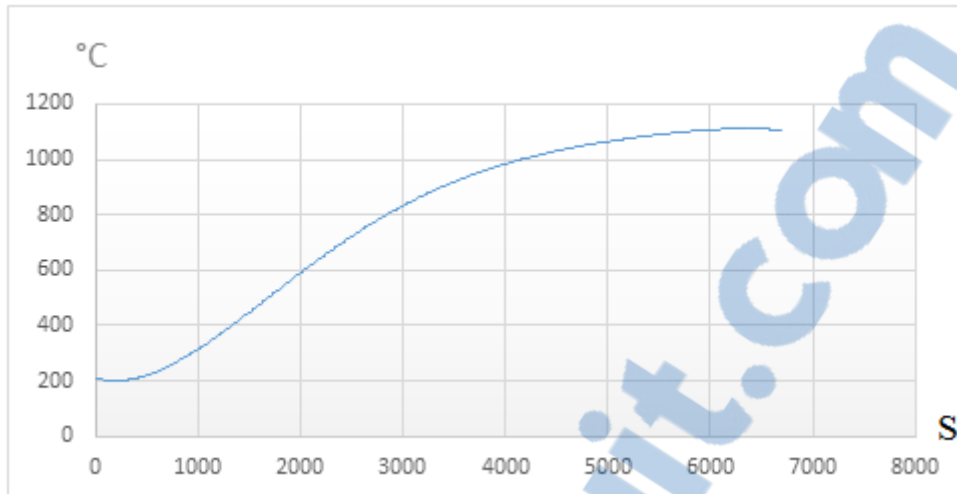


Figure 35 : Courbe de tendance

Dans la suite nous considérons cette courbe comme la réponse indicielle de notre système.

3.3.2. Identification du processus de régulation de température :

3.3.2.1. Choix de méthode d'identification :

Dans l'intention de choisir la méthode d'identification adéquate pour notre processus, nous nous sommes basés sur la réponse indicielle de notre système ayant comme entrée un échelon unitaire démontré sur la (figure 39).

D'après la réponse trouvée, nous constatons que le processus est stable avec un régime transitoire trop long (Figure 35) et ne présente aucun dépassement, c'est un système de 1^{er} ordre retardé ou second ordre non résonnant. La stabilité du processus nous permet de choisir entre deux méthodes d'identification : Broïda et Strejc.

Finalement nous avons choisi la méthode de Broïda puisque celle-ci a simplifié la méthode de Strejc en passant d'un ordre n à un ordre 1, Broïda a estimé que :

- La tangente au point d'inflexion était une source d'erreur importante,
- La durée des essais pouvait être longue sur les systèmes lents avec le risque d'avoir une entrée qui varie pendant l'essai

3.3.2.2. Modélisation par la méthode de Broïda :

La méthode de Broïda est une méthode d'identification en boucle ouverte d'une réponse indicielle qui consiste à assimiler la fonction de transfert d'un système d'ordre n à celle du premier ordre affecté d'un retard pur :

$$H(p) = \frac{K}{1 + Tp} \times e^{-\tau p}$$

T : Constant du temps (sec)

τ : Temps de retard (sec)

Broïda a montré par l'expérience qu'une réponse d'un premier ordre coupe toujours celle d'un ordre supérieure en deux points situés de part et d'autre du point d'inflexion.

Il a choisi deux points assez éloignés pour que la coïncidence entre les deux courbes soit significative, mais le dernier point a été pris assez bas de façon à réduire la durée des essais.

Ces calculs montrent que pour obtenir les temps t_1 et t_2 , nous prenons respectivement pour $s(t)$ les valeurs $0,28\Delta Y_s$ et $0,40\Delta Y_s$. Puis, on en tire :

$$\tau = 2,8(t_1 - t_0) - 1,8(t_2 - t_0) ; T = 5,5(t_2 - t_1) ; K = \frac{\Delta Y_s}{\Delta X_e}$$

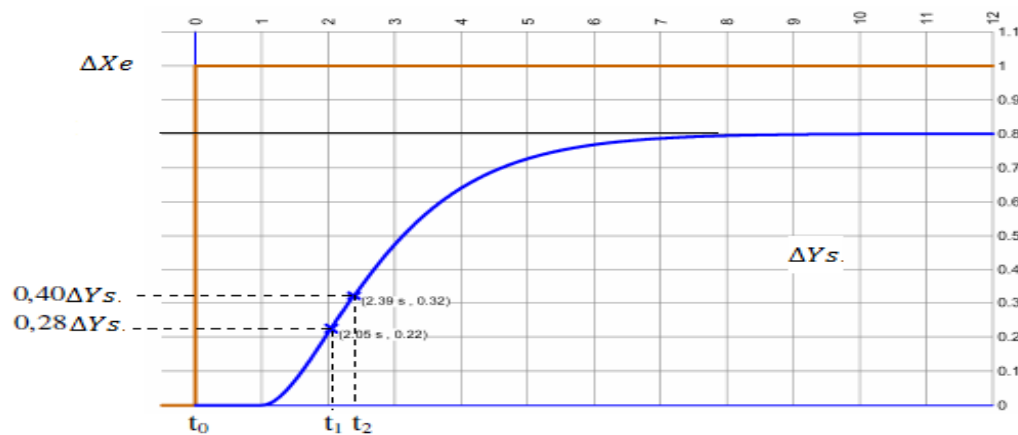


Figure 36 : Modélisation par la méthode de Broïda

D'autre part, Broïda a montré aussi que nous pouvons obtenir un modèle optimale en travaillant avec le point d'ordonné $0,63\Delta Y_s$, on obtiendra directement les 2 constantes τ et T. (voir figure 36)

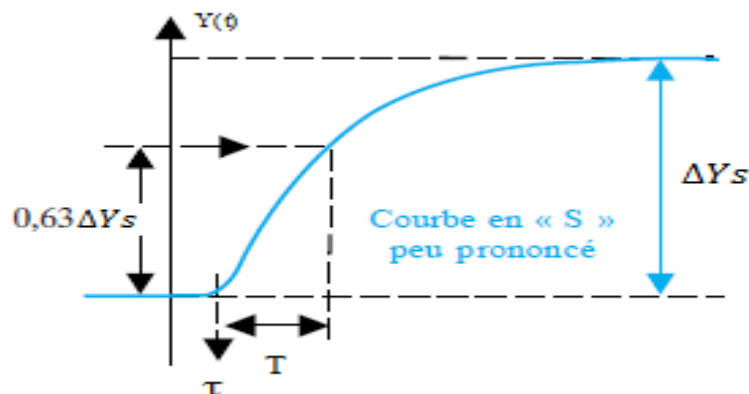


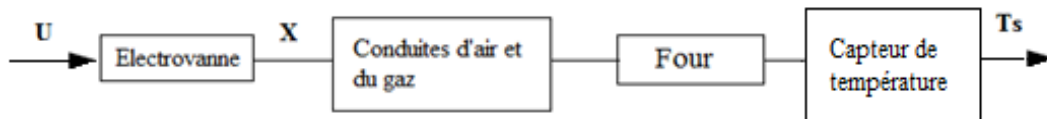
Figure 37 : Obtention directe par le modèle de Broïda

3.3.2.3. Application du modèle de Broïda pour le processus :

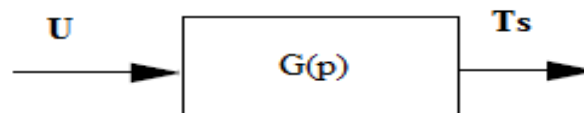
Dans cette partie, nous appliquerons les 2 méthodes de Broïda sur notre processus afin de trouver le modèle en boucle ouverte adéquat avec la réponse de notre système.

Ensuite, nous simulerons les deux modèles sur Matlab/Simulink dans le but de choisir le modèle optimale et convenable pour notre système.

Voici la boucle ouverte à identifier :



Ceci est équivalent à :



Donc ces deux modèles de commande nous permettrons de trouver la fonction de transfert $G(p)$ du système en boucle ouverte en évitant les développements mathématiques trop complexe à exploiter au sens de l'automatique.

- **1^{er} modèle de Broïda :**

Le signal à la sortie a l'allure suivante :

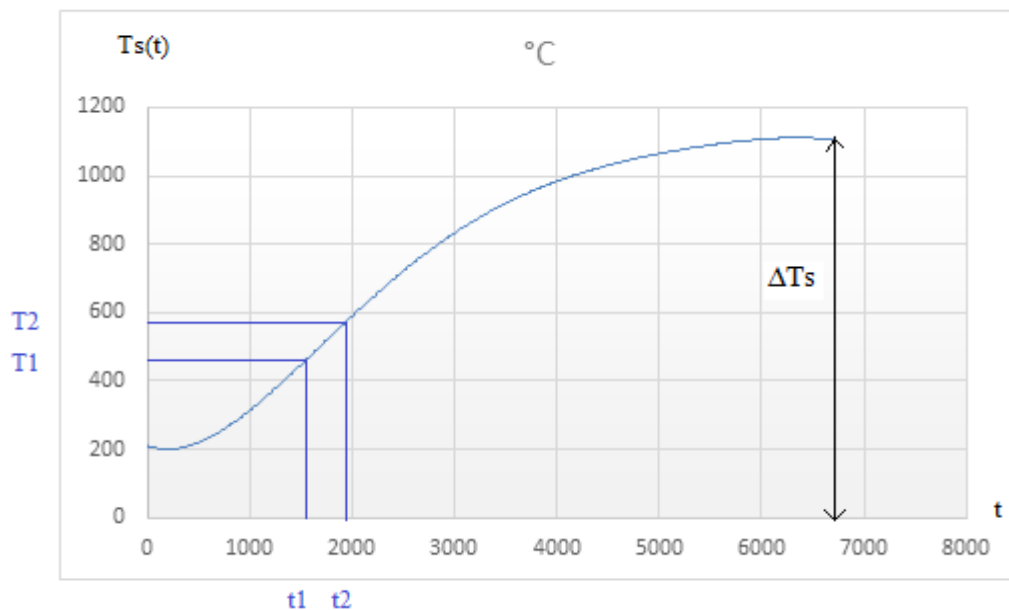


Figure 38 : la température du creuset en fonction du temps

Tout d'abord nous avons commencé par calculer T et τ , d'après ce qu'on a relevé de la courbe :

$$T1 = 0,28 \times \Delta Ts + Ti = 0,28 \times 907,5 + 203 = 457^\circ\text{C}$$

$$T2 = 0,40 \times \Delta Ts + Ti = 0,40 \times 907,5 + 203 = 566^\circ\text{C}$$

$$\text{Avec : } \Delta Ts = 1110,57 - 203 = 907,5$$

D'après la courbe de la figure 38 :

T1 correspond à $t1 = 1549,01\text{s}$ et T2 correspond à $t2 = 1960,78\text{s}$

Ceci implique que :

$$T = 5,5 \times (1960,78 - 1549,01) = 2264,73\text{s} \quad \text{et} \quad \tau = (2,8 \times 1549,01) - (1,8 \times 1960,7) = 807,96\text{s}$$

La fonction de transfert $G(p)$ peut s'écrire sous la forme :

$$G(p) = \frac{K}{1 + 2264,73p} \times e^{-807,96p}$$

On chercha à approximer la fonction $p \rightarrow e^{-807,96p}$ par une fonction polynôme du premier, par le biais d'un développement limité d'ordre 1, afin de rendre la fonction de transfert plus exploitable pendant la simulation.

Avec

$$\text{Au voisinage de } 0, \quad e^x = 1 + x + x \varepsilon(x) \quad \text{où } \lim_{x \rightarrow 0} \varepsilon(x) = 0.$$

$$\text{Donc} \quad e^{-807,96p} = \frac{1}{1 + 807,96p}$$

Il nous reste de déterminer le gain K :

Le signal u à la sortie du régulateur est un signal 4-20mA équivalent à un intervalle de température de 0°C - 1200°C dans l'interface du régulateur, donc nous appliquerons un signal en échelon plus ou moins 10% de la valeur nominal égal à 12mA :

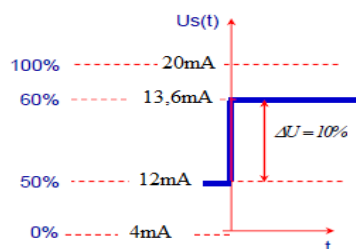


Figure 39 : Signal à l'entrée de la boucle ouverte

Le gain K se calcule comme suit :

$$K = \frac{\Delta Y_s}{\Delta X_e} = \frac{\frac{\Delta T_s}{\Delta T_{smax}}}{\frac{\Delta U}{\Delta U_{max}}} = \frac{907,5}{\frac{1200-203}{1,6}} = 9,10$$

Ainsi la fonction de transfert en boucle ouverte de notre système est :

$$G(p) = \frac{9,10}{1+2264,73p} \times e^{-807,96p} = \frac{9,1}{(1+2264,37p) \times (1+807,96p)}$$

Afin de vérifier le modèle trouvé et le comparer avec le résultat expérimental, nous avons utilisé Simulink l'extension graphique de Matlab. Nous avons tracé le schéma en boucle ouverte :

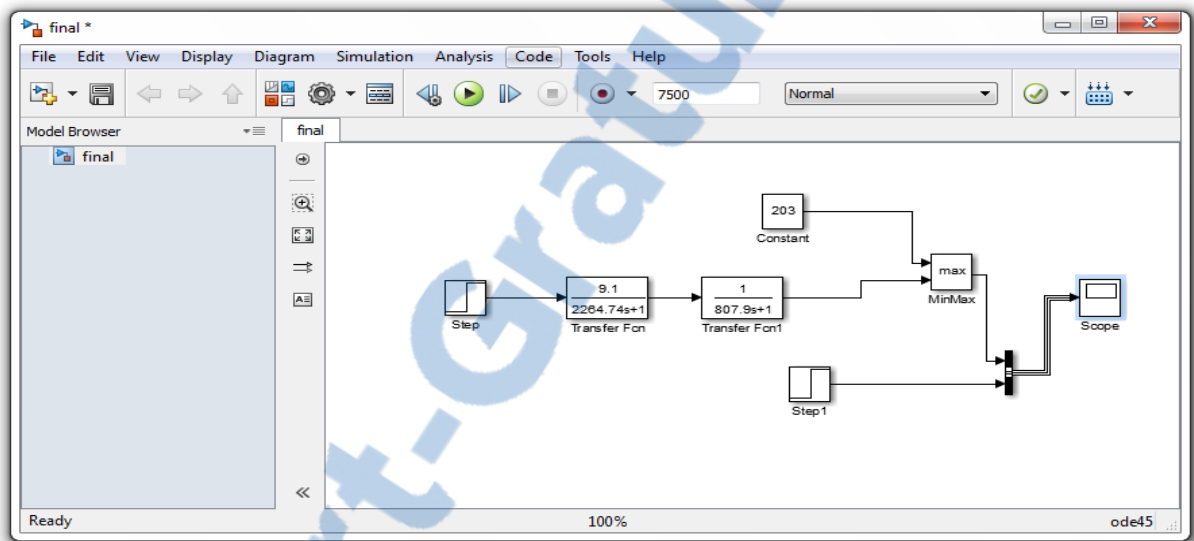


Figure 40 : 1er modèle en boucle ouverte

Le résultat obtenu est le suivant :

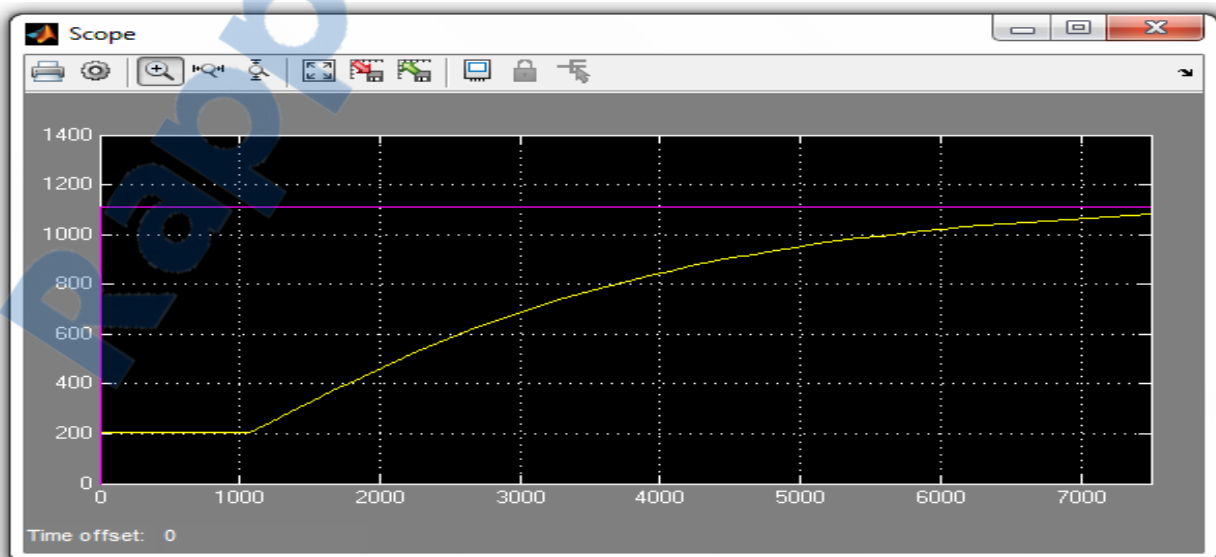


Figure 41 : Réponse indicielle du système

La figure 41 représente la réponse du 1^{er} modèle élaboré pour notre système c'est-à-dire l'évolution de la température de creuset en fonction du temps.

- 2^e modèle de Broïda :

Le signal de la sortie est comme suit :

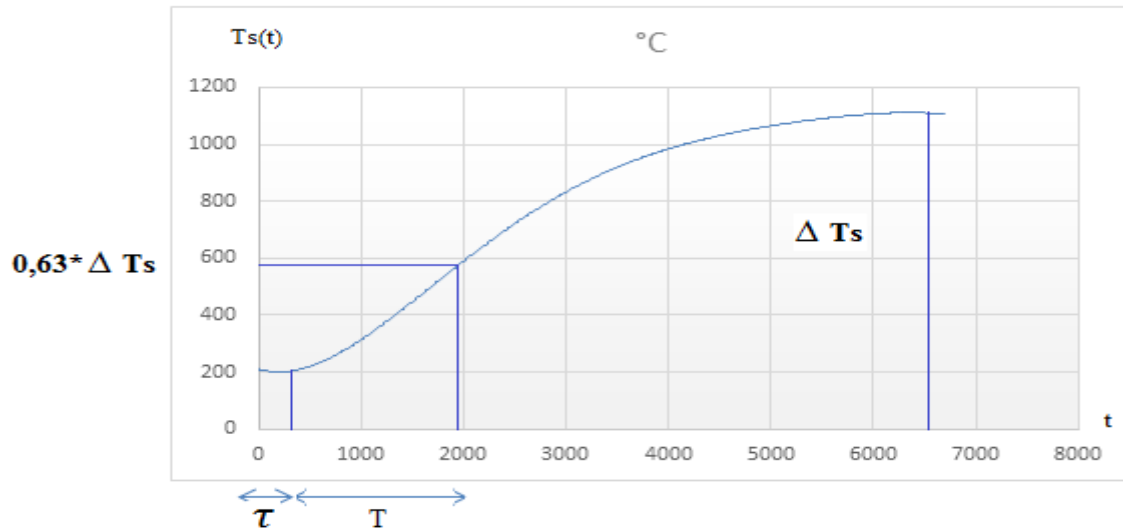


Figure 42 : Température du four en fonction du temps

Comme pour le modèle précédent $\Delta T_s = 907,5$

Nous prélevons les valeurs des 2 constantes T et τ directement de la courbe et nous avons trouvé:

$$\tau = 313,72s \text{ et } T = 1627,44s$$

$$G(p) = \frac{9,1}{1+1627,44p} \times e^{-313,72p}$$

On chercha à approximer la fonction $p \rightarrow e^{-313.72p}$ par une fonction polynôme du premier, par le biais d'un développement limité d'ordre 1, afin de rendre la fonction de transfert plus exploitable pendant la simulation.

Avec

$$\text{Au voisinage de } 0, \quad e^x = 1 + x + x \varepsilon(x) \quad \text{où } \lim_{x \rightarrow 0} \varepsilon(x) = 0.$$

$$\text{Donc } e^{-313.72p} = \frac{1}{1+313.72p}$$

Ainsi la fonction de transfert de la boucle ouverte peut être écrite sous la forme :

$$G(p) = \frac{9,1}{1+1627,44p} \times e^{-313,72p} = \frac{9,1}{(1+1627,44p) \times (1+313,72p)}$$

On trace le schéma en boucle ouverte sur Simulink pour ce modèle :

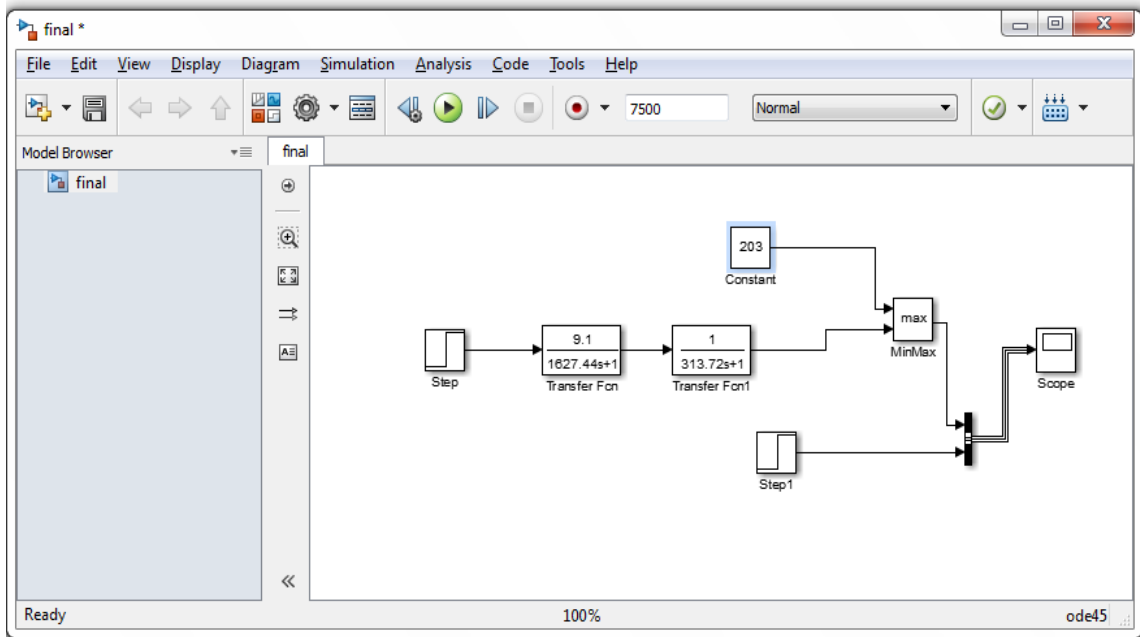


Figure 43 : Schéma en boucle ouverte sur Simulink

La réponse trouvée est de :

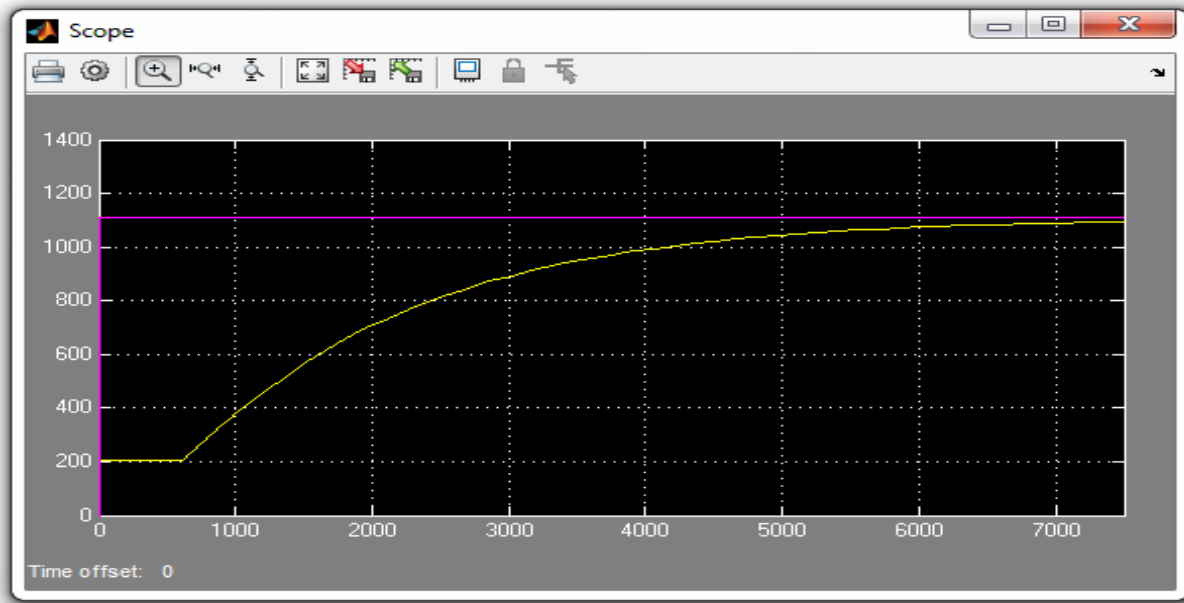


Figure 44 : Réponse du 2ème modèle en boucle ouverte

La figure 44 représente la réponse du 2^e modèle effectué pour la boucle ouverte du processus. Nous remarquons que le 2^e modèle est plus proche à la courbe réelle que le premier modèle. Vue son temps de réponse similaire à celui de la courbe réel ainsi que la durée du régime transitoire, et la température de sortie du système.

Dans la suite de cette partie, nous essayerons de simuler le fonctionnement du processus de régulation de température du four en boucle fermée en se basant sur les deux modèles trouvés.

3.3.3. Simulation du processus de régulation de température des fours :

Pour finir cette étude de régulation, il faut étudier le comportement du processus en boucle fermée pour qu'on puisse voir la différence entre le système actuel dans la fonderie et le système de régulation proposé.

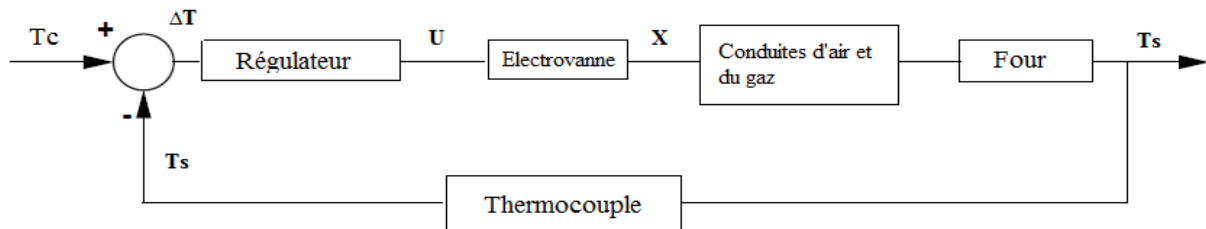
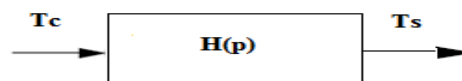


Figure 45 : schéma bloc de la boucle fermée du processus de régulation de température du four

Son schéma équivalent :



Avec $H(p)$ la fonction de transfert du système en boucle fermée :

$$H(p) = \frac{C(p) \times G(p)}{1 + C(p) \times G(p)}$$

De manière à ne pas entrer dans les développements mathématiques complexes et pour donner un aspect technique à cette partie en vue d'avoir des résultats proches à ceux appliqués dans l'industrie, nous avons traité la boucle fermée dans la figure ci-dessus avec le logiciel de simulation Matlab/Simulink approprié à ce genre d'étude. Dans le but d'avoir des résultats satisfaisants, nous simulerons les deux modèles trouvés dans la partie précédente en boucle fermée afin de trouver le type de correction adéquat avec notre processus, ensuite comparer les résultats des deux modèles et choisir le modèle le plus optimale et convenable avec notre processus.

3.3.3.1. Simulation du 1er modèle en boucle fermée :

Boucle fermée sans correction : Pour choisir le type de régulation, Broïda nous a donné un tableau (voir annexe 3) dans lequel nous trouvons plusieurs valeurs de T/τ , chacune correspondante à un type de régulation.

En calculant T/τ pour ce modèle, nous avons trouvé 2,80 et donc nous avons travaillé avec correcteur PID selon le tableau de Broïda.

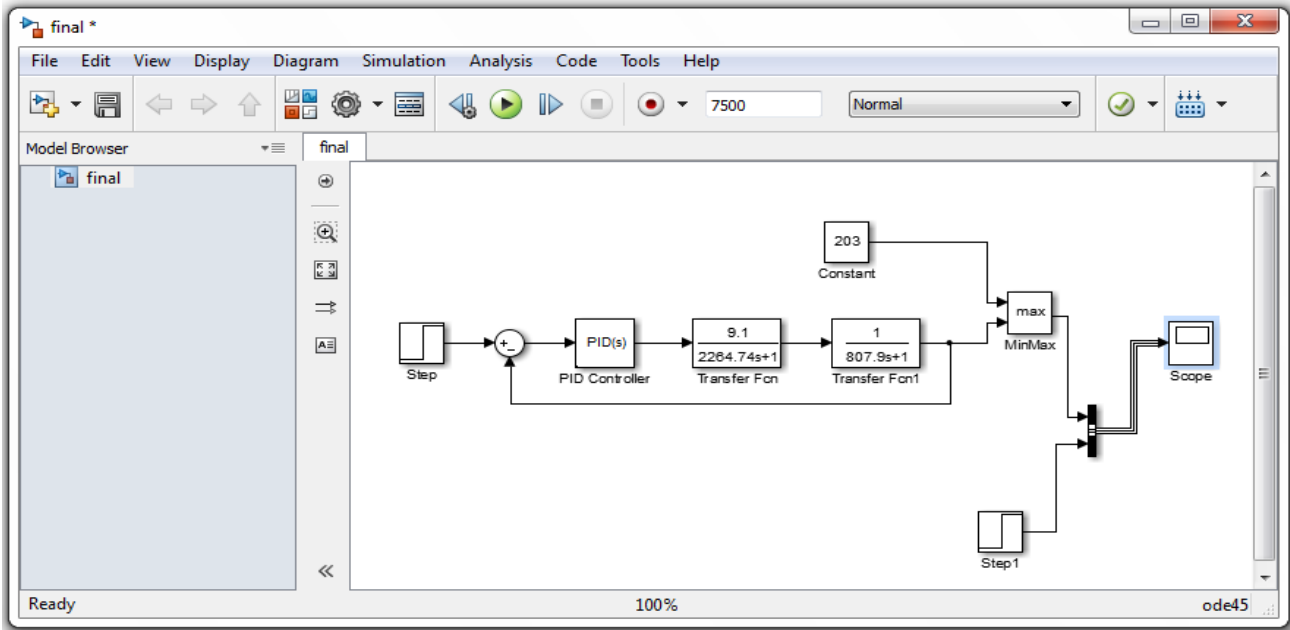


Figure 46 : Schéma en boucle fermée sans correction

Les valeurs PID sont : $P=1$ $I=0$ $D=0$; La consigne est de 1000°C sous forme d'un signal échelon. Cette simulation est réalisée en boucle fermée sans correction pour avoir une idée sur l'erreur statique et le temps de réponse de notre système avant d'introduire la correction PID.

La réponse trouvée est :

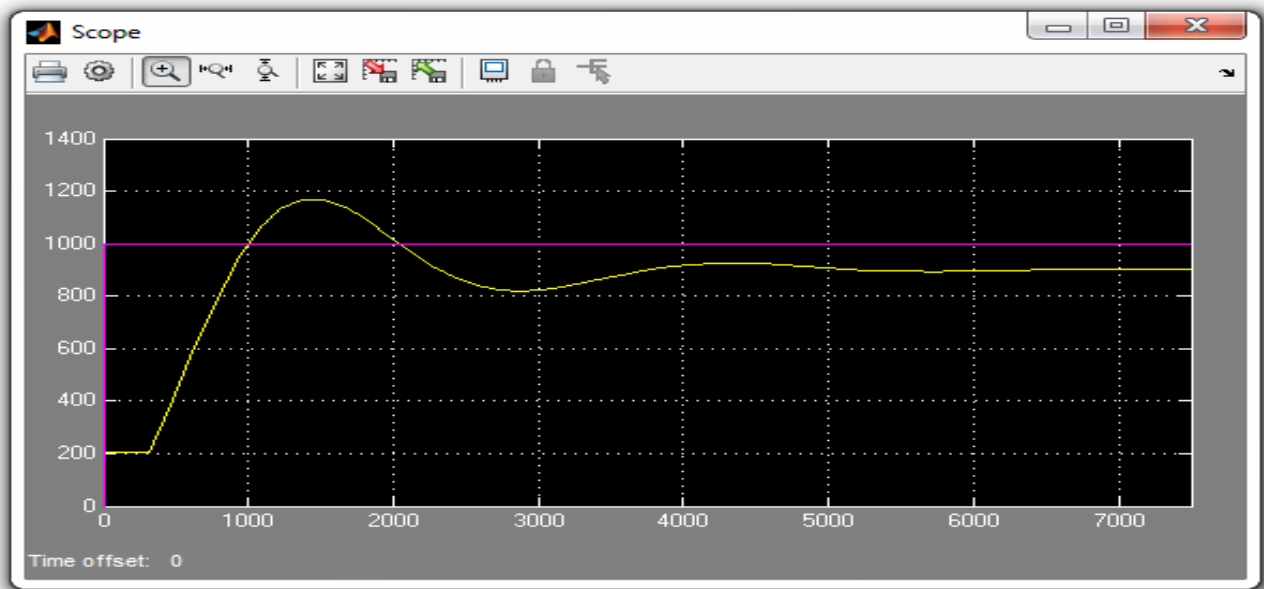


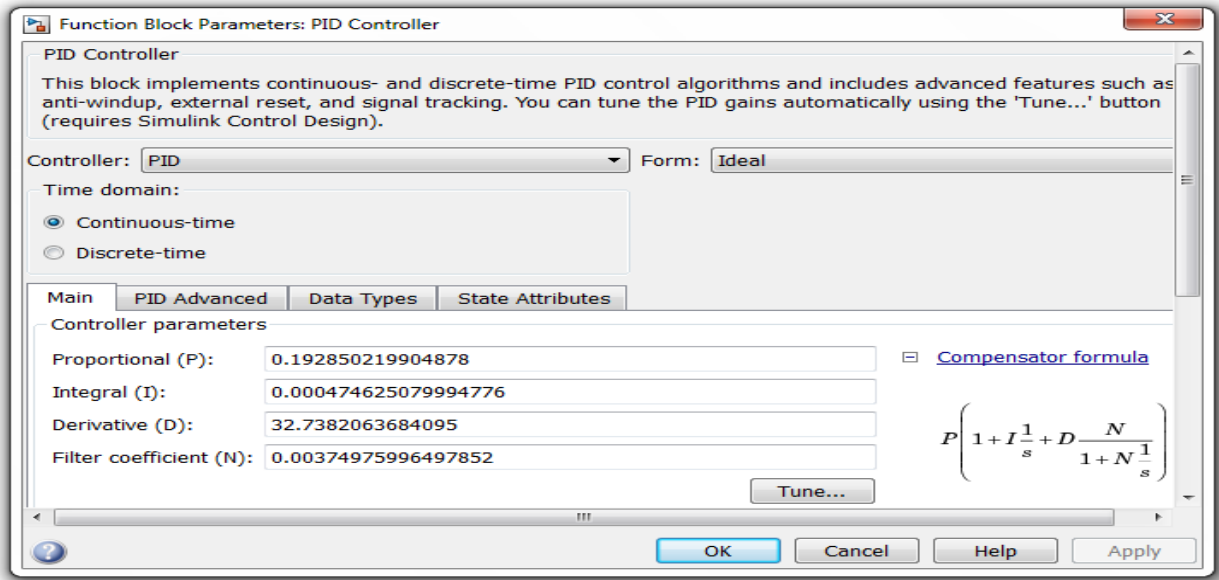
Figure 47 : réponse du système en boucle fermée sans correction

On constate que le système présente des dépassements dans le régime transitoire avant qu'il ne se stabilise dans un régime permanent au-dessous de la consigne souhaitée appelée une erreur statique. Les valeurs du dépassement et de l'erreur statique sont prélevées à partir de la figure ci-dessus. (Voir annexe 4)

Boucle fermée avec correction :

Afin de corriger notre système, nous avons utilisé l'option Tune du bloc PID dans Matlab/Simulink, cette option nous facilite la tâche de trouver les paramètres PID en effectuant un calcul numérique, il nous présente les paramètres convenables avec notre système.

Les valeurs du PID trouvés sont comme suit :



La réponse du système avec correction a donné l'allure suivante :

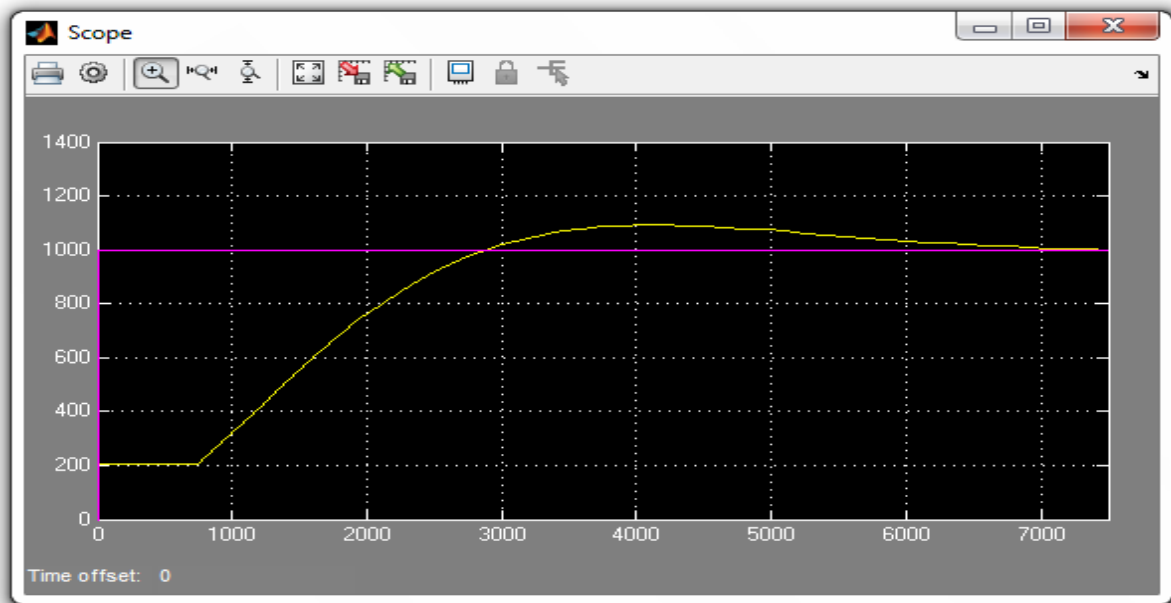


Figure 48 : Réponse du système en boucle fermée avec correction PID

Nous constatons que l'erreur statique est éliminée et le système passe par un régime transitoire avec un déplacement tolérable et après il rentre dans un régime permanent en suivant la consigne demandée.

Dans la figure suivante, le temps de réponse et le temps de la montée du système avec le dépassement présenté par ce dernier sont prélevés.

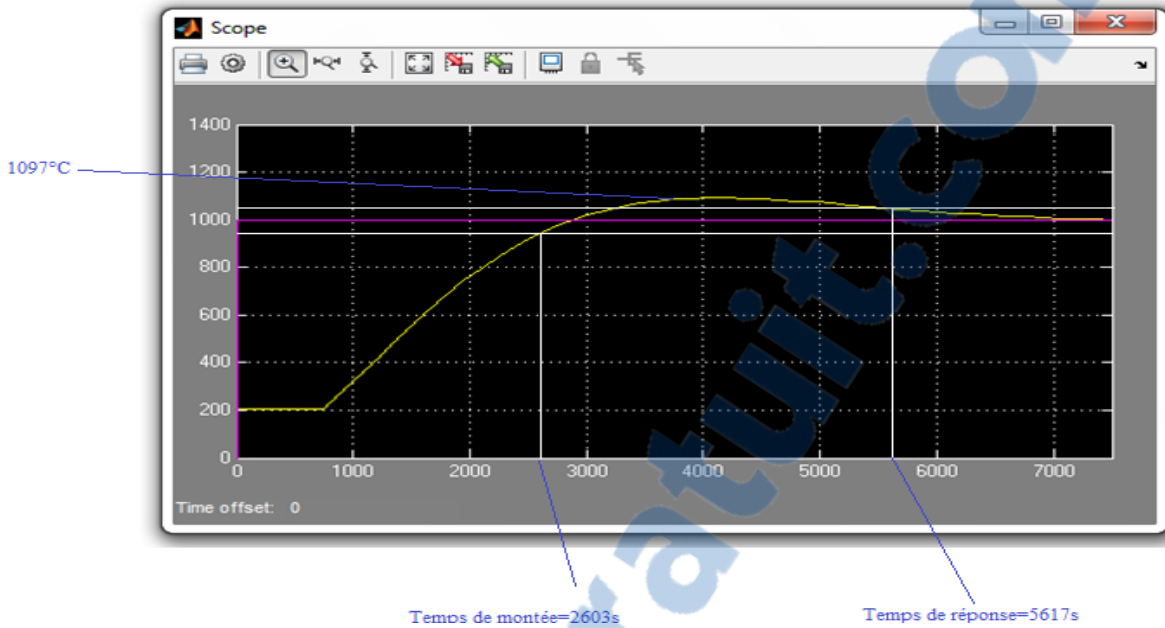


Figure 49 : Performance du système corrigé

D'après ces valeurs, nous pouvons qualifier notre système de stable, précis mais il manque de rapidité. Ceci ne présente pas un grand problème dans notre cas puisque la précision et la stabilité sont plus importantes dans notre processus que la rapidité.

3.3.3.2. Simulation du 2e modèle en boucle fermée : Boucle fermée sans correction :

En calculant T/τ pour ce modèle, nous trouvons 5,19 et donc nous avons travaillé avec correcteur PI. La boucle est tracée sous forme diagramme Simulink :

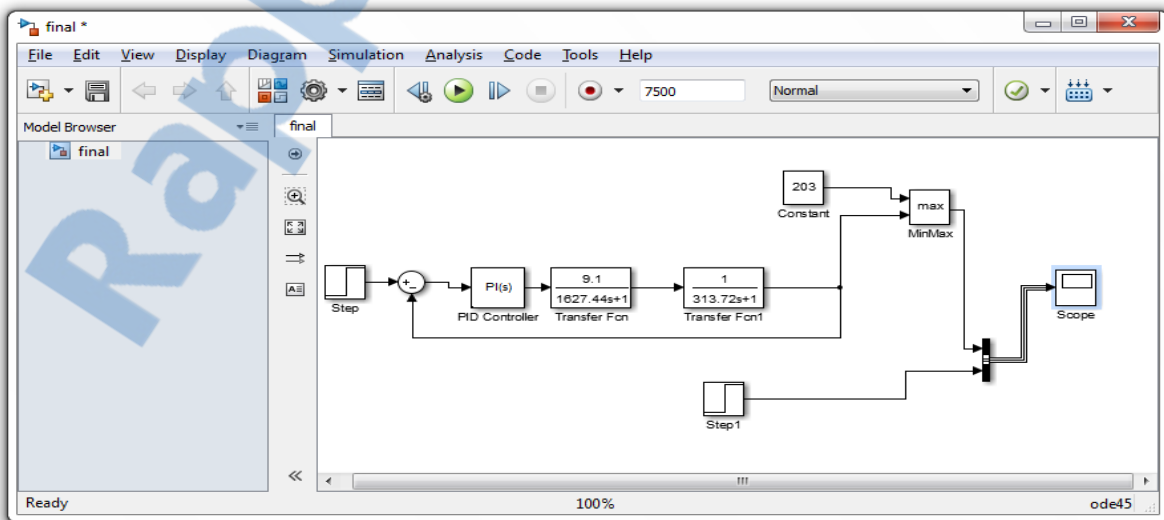


Figure 50 : Schéma en boucle fermée sans correction

Les valeurs PI sont : P=1 I=0 ; La consigne est de 1000°C. Ainsi, Le résultat trouvé est :

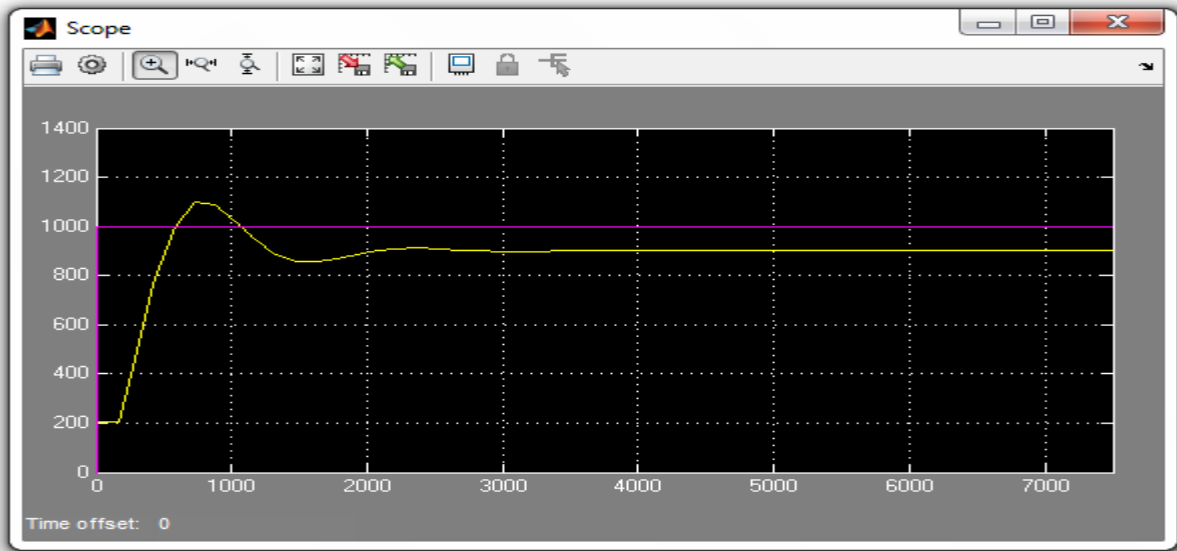


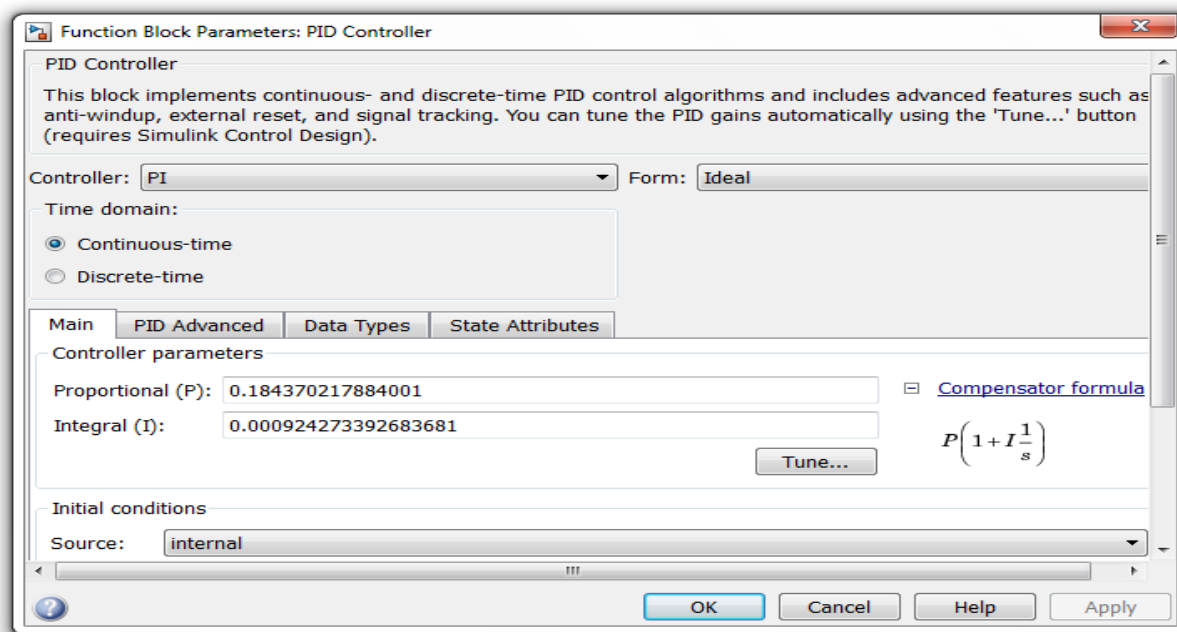
Figure 51 : Boucle fermée du système sans correction

Nous remarquons que le système présente un léger dépassement avec un régime transitoire court, et après il passe à un régime permanent sans respecter la consigne souhaité et donc il présente une erreur statique.

Les valeurs du dépassement et de l'erreur statique sont prélevées à partir de la figure ci-dessus. (Voir annexe 4)

Boucle fermé avec correction PI :

Les valeurs PI trouvé par l'option Tune sont :



La réponse du système avec cette correction a donné le résultat suivant :

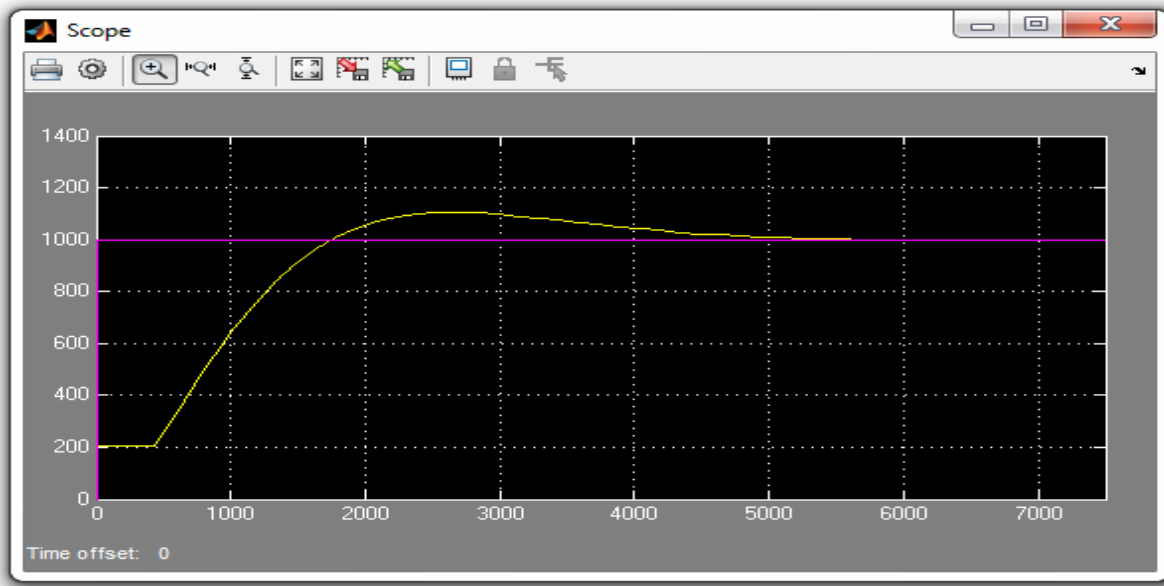
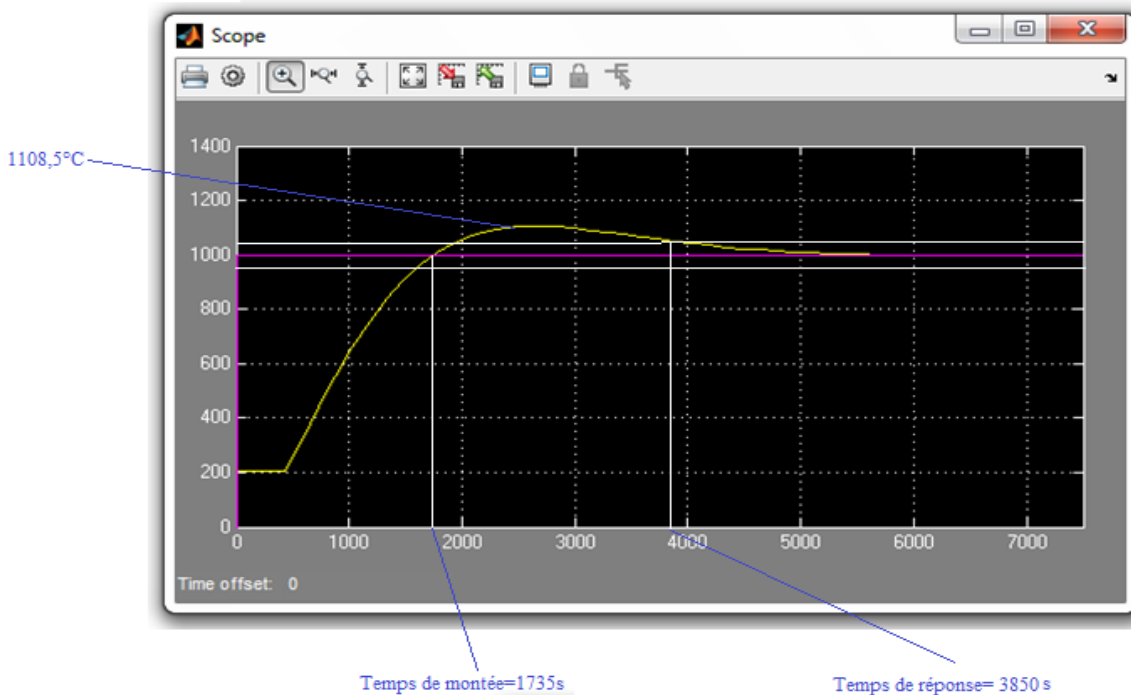


Figure 52 : Réponse du système avec correction PI

Nous remarquons que le système passe d'un régime transitoire avec un dépassement acceptable puis il suit la consigne dans le régime permanent en éliminant l'erreur statique avec la correction PI effectué

Dans la figure suivante, nous mentionnons le temps de réponse et le temps de la montée du système avec le dépassement présenté par ce dernier ;



D'après la figure, le système est stable, précis et plus au moins rapide.

3.3.3.3. Comparaison entre les 2 modèles après simulation en boucle fermé :

Après la simulation des 2 modèles en boucle fermé avec et sans correction, nous constatons que les deux modèles sont précis et stables après régulation mais les performances du 2^e modèle sont plus importantes que du 1^{er} modèle puisque nous remarquons une différence de 1767s dans le temps de réponse du système et donc le 2^e modèle passe par un régime transitoire plus court que celui du 1^{er} modèle ; ainsi la réponse du 2^e modèle est plus rapide que celle du le 1^{er} modèle.

D'autre part, en calculant τ/T pour chaque modèle on trouve :

1^{er} modèle : $\tau/T = 0,35$; 2^e modèle : $\tau/T = 0,19$

Selon Broïda le modèle optimale est définie par τ/T inférieur à 0,25, ainsi le 2^e modèle est plus optimale que le 1^{er} modèle. Pour finir cette comparaison, nous avons décidé de choisir le 2^e modèle comme modèle finale pour notre processus et donc nous allons effectuer une correction PI dans notre cas.

4. Conclusion

Pour conclure, dans ce chapitre nous avons essayé de proposer des solutions adéquates avec l'installation existante pour la régulation de température des fours de fusion en respectant le rapport stœchiométrique de la réaction de combustion du propane.

Afin de concrétiser ces solutions, et pour avoir une idée sur les résultats de la régulation, nous avons effectué une identification en boucle ouverte qui nous a mené à un modèle approximatif du processus sur lequel on a travaillé et réaliser des simulations sur Matlab/Simulink de notre système de régulation.

D'après les résultats de la simulation, nous constatons une grande différence entre le système actuel dans la fonderie et le système après régulation de manière que le profil de température souhaité sera respecté tout au long du cycle de la fusion de la charge.

Avec ce système de régulation, le rapport stœchiométrique sera respecté dans le but d'avoir une combustion parfaite et riche, ceci va réduire les émissions des gaz dans la fumée et donc protéger l'environnement d'une part et d'autre part améliorer le rendement de la combustion.

Vue les performances démontrées par les deux solutions de régulation proposées au cours de ce chapitre, nous avons opté pour la deuxième solution, puisque Le Micro ratio valve garantit un ratio air/gaz fixe, et avec ce dernier la régulation sera plus précise vue que la première solution nécessite un prélèvement de pression pour actionner la vanne de gaz rendant ainsi l'installation plus complexe et moins fiable.

Enfin, cette régulation va permettre l'optimisation de la consommation du propane, ce qui sera traité dans une partie dans le chapitre 4.

Chapitre IV :

- **Impact de la régulation sur la consommation du propane et amélioration du rendement et des conditions de travail dans la fonderie.**
- **élaboration du cahier de charge technico-commercial pour la rénovation de la fonderie.**

Introduction

Ce chapitre est consacré à des solutions d'amélioration du fonctionnement, ainsi que des recommandations qui auront pour conséquence l'optimisation de la consommation du propane dans le but d'atteindre les objectifs budgétaires tracés par la société, vue le flambement des prix du combustible, alors que la plupart de ces équipements ont été installés lorsque le coût du combustible était relativement bas, et sans tenir compte des possibilités de gestion de l'énergie. Même aujourd'hui les coûts d'exploitation et le rendement de la production demeurent souvent le premier critère de la sélection de l'équipement, sans souci des économies d'énergie.

De nos jours, des techniques de gestion d'énergie applicables aux installations nouvelles ou déjà existantes s'avèrent de plus en plus profitables en raison du coût élevé des combustibles de plus en plus profitables en raison du coût élevé des combustibles. En effet l'application de ces techniques peut entraîner des économies importantes et, dans la plupart des cas, la mise de fond est récupérée dans un délai relativement court. Souvent, la mise en œuvre de possibilités de gestion de l'énergie représente l'un des investissements les plus rentables pour une industrie. Ce chapitre traite quelques techniques de gestion de l'énergie susceptibles de réduire les coûts d'exploitation des fours.

1. Impact de la régulation :

Cette partie a pour objectif de concrétiser l'impact économique de la solution de régulation, afin de démontrer l'importance et la nécessité de mettre en œuvre ce projet de rénovation.

Les estimations suivantes seront basées sur l'historique de consommation du propane ainsi que l'historique de production de l'argent

1.1. Comparaison qualitative entre le système actuel et le système régulé :

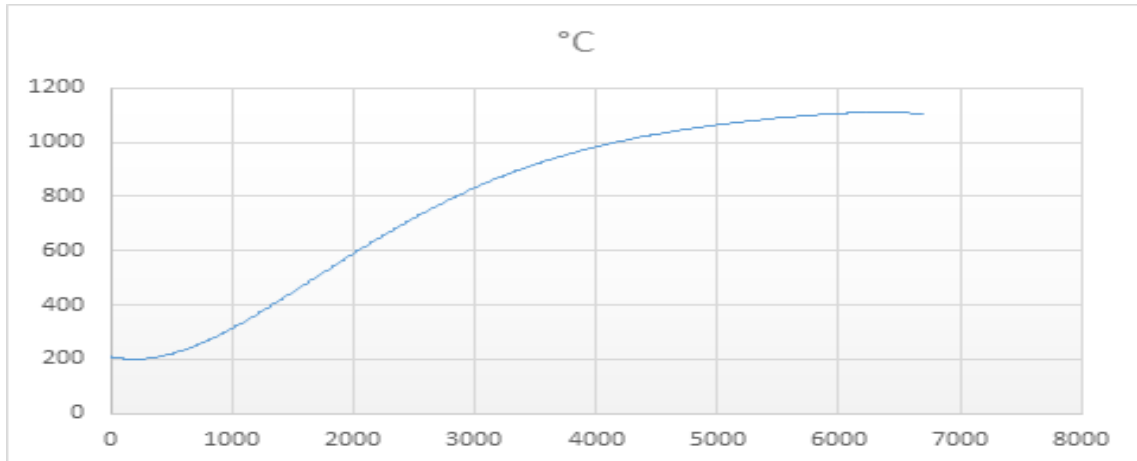


Figure 53 : Evolution de la température sans régulation

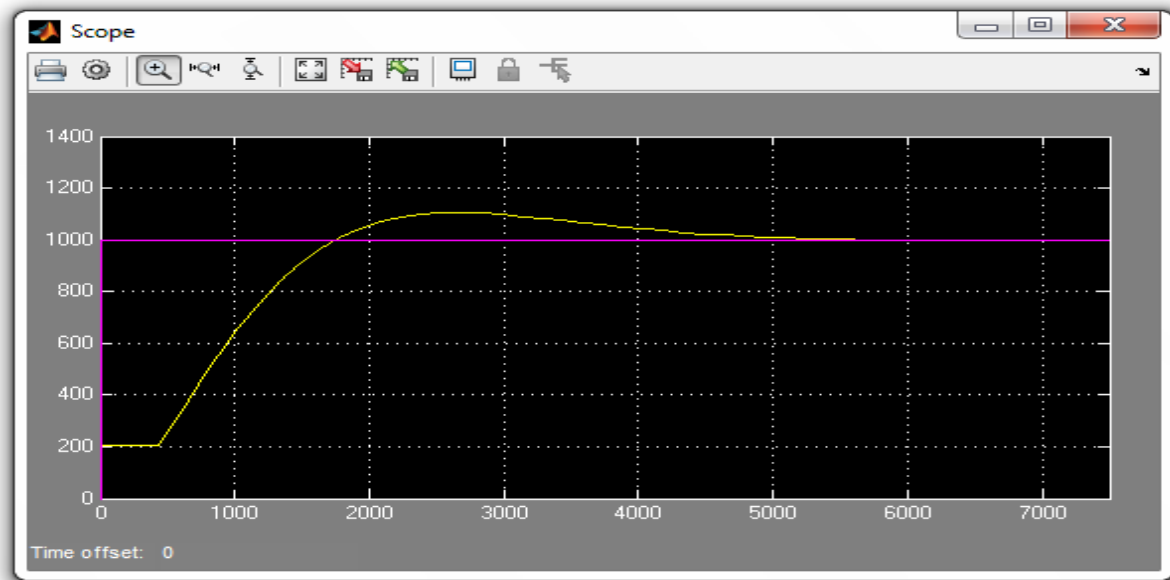


Figure 54 : Evolution de la température du système régulé

En boucle ouverte le système atteint le régime permanent après 6800s établi à 1110°C, Après régulation, le système atteint le régime permanent après 3850s à 1000 °C.

Les heures de marches d'un four sont définies à une moyenne de 380h/mois, Sachant qu'un cycle de fusion d'argent dure 5h en moyenne.

1.1.1. Bénéfice en régime transitoire :

Au régime transitoire, nous avons constaté que le débit du propane dépasse largement le débit fourni aux fours au régime permanent.

Sachant qu'un cycle de fusion de l'argent dure 5h, avec une moyenne des heures de marches de 380 h/mois. Et que le régime transitoire représente 40% du cycle en boucle ouverte, alors qu'en boucle fermée, il représente 22%. Engendrant ainsi un gain en temps notable de la consommation du propane pendant le régime transitoire.

1.1.2. Bénéfice en régime permanent :

Durant le régime permanent de la boucle ouverte, la température maximale atteint une valeur de 1110 °C. D'autre part, pour le système régulé, la consigne de température en régime permanent est de 1000 °C, et donc on fournit plus de puissance pour le système actuel afin d'atteindre 1110°C. Ainsi en respectant la température de fusion d'argent, on diminuera considérablement la consommation du propane

D'après le paragraphe précédent, le régime permanent en boucle ouverte représente 60% du cycle, alors qu'il représente 71% pour le système régulé. Avec une consommation notamment plus basse.

1.2. Comparaison des ratios propane/argent :

D'après l'historique de consommation, du propane pendant la période où le système était régulé.

Années	Ratio
1988	0.9
1989	0.93
1990	0.92
1991	0.95

Tableau 1 : Historique des ratios avec régulation

Pendant ces dernières années, le ratio a flambé et ses valeurs ont subi une augmentation considérable comme montré dans le tableau ci-dessous.

Années	Ratio
2011	1.15
2012	1.13
2013	1
2014	1.18

Tableau 2 : Historique des ratios sans régulation

Afin d'estimer la consommation du combustible traduit par le ratio air/gaz, nous nous baserons sur la consommation totale du propane de l'année 2014, établi à 240 tonnes.

Pour une charge mensuelle moyenne à l'entrée de la fonderie de 17400 kg. La consommation mensuelle estimée pour le ratio actuel est

$$17400 * 1.15 = 20010$$

Avec un bon système de régulation, le ratio reviendra à sa moyenne initiale de 0,92, diminuant ainsi la consommation mensuelle pour cette même charge.

Donc, la quantité de propane consommée afin de fusionner cette charge est de

$$17400 * 0.92 = 16008$$

Avec une réduction de 4.002 tonnes de propane par mois, donc de 48.024 tonnes de propane par an, la consommation annuelle baissera à 192 tonnes.

Sachant que le prix d'une tonne de propane avoisine les 15000 DH, le coût annuel du propane est donc de ($15000 * 240 = 3.600.000$ DH). Ainsi, le gain budgétaire mensuel serait de ($15000 * 4 = 60000$ DH/mois), engendrant ainsi un gain annuel estimé à **720000 DH**.

Le coût de revient actuel du propane parmi les dépenses de la fonderie est estimé à 37% d'un coût de revient total au voisinage de **9.730.000 DH**. Donc, après les travaux de rénovation de la fonderie, le coût de revient total diminuera de **720.000 DH**, ainsi celui du propane baissera à 32% du prix de revient total.

Pour conclure, le coût de revient du propane a considérablement baissé.

2. Amélioration :

2.1. Système d'allumage :

Comme ce qui est indiqué dans le chapitre d'état des lieux de la fonderie, la mise en place d'un système d'allumage est indispensable afin d'assurer un démarrage des fours en toute sécurité et éviter la surconsommation de carburant causée par combustion non complètes et ainsi, limiter les émissions des fumées en oxyde d'azote. Composé essentiellement d'une bougie d'allumage placée à l'entrée du brûleur et générant un arc électrique (ou étincelle) sautant entre les électrodes à un moment exactement prédéfini, la quantité nécessaire de mélange air/propane respectant le rapport stœchiométrique assuré par un micro ratio valve doit être présente à l'entrée du brûleur. Une bougie d'allumage moderne doit répondre aux conditions suivantes :

- Les bougies d'allumage doivent fournir une puissante étincelle d'allumage.
- Elles doivent assurer que la température de service sera rapidement atteinte même aux conditions extrêmes.
- **Electrique :**
 - ✓ Transmission fiable de la haute tension également pour des tensions d'allumage atteignant 40 000 volts
 - ✓ Grande capacité d'isolation dans notre cas d'application à des températures supérieures à 1 000 °C.
- **Thermique :**
 - ✓ Résistance aux chocs thermiques (gaz d'échappement chauds, mélange aspiré froid)
 - ✓ Bonne conductibilité thermique du pied de l'isolateur et des électrodes
- **Mécanique :**
 - ✓ Fermeture étanche à la pression et aux gaz de la chambre de combustion,
 - ✓ résistance aux pressions oscillantes au sein de la chambre de combustion
 - ✓ Résistance mécanique élevée pour un montage sûr

Bougie d'allumage recommandée :

Les bougies d'allumage en Iridium représentent la solution technique la plus aboutie du marché. Elles possèdent une pointe fine en Iridium sur l'électrode centrale. L'Iridium est un métal précieux et l'un des matériaux les plus solides au monde. Il commence à fondre à partir de 2450°C et résiste particulièrement bien à l'érosion électrique créée par l'étincelle, ainsi qu'aux usures

excessives. La durée de vie d'une bougie Iridium est 2 fois supérieure à celle d'une bougie standard.



2.2. Détecteurs de fuite de gaz :

Durant notre visite des lieux nous avons constaté plusieurs sources de fuite de gaz mettant en danger Le personnel de la fonderie. Pour cela, la disponibilité d'un détecteur de fuite de gaz au sein de la fonderie est primordiale. Ils doivent être installés dans la fonderie afin d'assurer la sécurité du personnel en premier lieu, ainsi que les installations, Il est mis au niveau des tuyauteries afin de déceler toute fuite de propane à un seuil remarquablement inférieur au seuil d'explosion.



2.3. Détecteur de flamme :

Pour qu'un brûleur fonctionne correctement, il faut que le signal de flamme soit provoqué, uniquement par la flamme du brûleur. Lorsque d'autres phénomènes ou défauts simulent un signal de flamme, le dispositif de surveillance de flamme lié à une entrée TOR du régulateur qui interdira tout service ultérieur du brûleur, afin d'éviter toute fuite de gaz menaçant la sécurité du personnel et des équipements industriels. Pour détecter un signal de flamme défectueux, un test de fonctionnement du circuit de surveillance de flamme est automatiquement exécuté après chaque arrêt par régulation (au plus tard lors du prochain ordre de démarrage pour le brûleur), ainsi un arrêt commandé par le

régulateur avec mise sous sécurité est déclenché lors d'un signal de flamme défectueux. La protection offerte par ce test est d'autant plus efficace que le brûleur est enclenché fréquemment et que les périodes d'enclenchement sont courtes. Les normes exigent au moins un arrêt par régulation par 24 heures afin qu'une fréquence de test minimale soit assurée en service intermittent.

Mises en garde

- ✓ Poser les câbles d'allumage toujours séparément, avec la distance la plus grande possible l'appareil et d'autres câbles.
- ✓ Condensation et influence de l'humidité doivent être évitées.
- ✓ Assurer par le montage la protection contre les contacts accidentels sur l'appareil et tous les raccordements électriques.



3. Recommandations :

3.1. Les Brûleurs :

Les brûleurs sont conçus pour bien mélanger le combustible et l'air afin de les pulvériser pour l'allumage. Un bon mélange de combustible et d'air s'obtient en créant de la turbulence à la sortie du brûleur. Il faut pour cela produire une chute de pression entre la gaine d'alimentation en air du brûleur et la sortie du brûleur au four. Les brûleurs peuvent être conçus pour brûler un ou plusieurs combustibles.



L'état actuel des brûleurs influence énormément sur le rendement des fours, vue leur durée de vie et le manque d'étanchéité aux parois du brûleur, rendant ainsi le remplacement des brûleurs imminent pour pouvoir constater et optimiser l'impact de la régulation sur le rendement. Les brûleurs de nouvelles technologies fournissent un courant de gaz de combustion chaud qui augmente la circulation dans votre four, en améliorant à la fois l'uniformité de la température et la pénétration de la charge de travail.

Le brûleur choisi doit être adapté aux conditions de travail et assurer une sécurité de fonctionnement pour :

- les combustibles utilisés (type, pression, etc.).
- les conditions de travail rencontrées (pression, température, atmosphère, etc.).
- le débit calorifique nominal (capacité maximale et minimale).
- la facilité de la surveillance visuelle.

3.2. Régulateurs de brûleur :

Une bonne installation assure la combustion efficace du combustible en maintenant la quantité minimale d'excès d'air sans présence importante de corps combustibles dans les gaz de combustion. Une bonne régulation du rapport combustible-air des fours à combustible minimise les pertes dans les gaz de combustion.

La pression du combustible, le rendement du ventilateur d'admission d'air ou d'autres conditions peuvent entraîner des variations indésirables dans le rapport combustible-air que l'on tente de contrôler par le système de régulation. On peut régler le rapport de manière plus précise en mesurant les débits

réels du combustible et de l'air aux brûleurs et en utilisant ces mesures pour régler de nouveau le débit d'air et maintenir automatiquement le rapport désiré.

Une autre méthode consiste à mesurer de manière continue la teneur en oxygène dans les gaz de combustion. Le débit d'air est réglé automatiquement pour maintenir une quantité déterminée d'oxygène dans ceux-ci. On obtient par cette méthode un pourcentage constant d'excès d'air aux brûleurs. Dans certains cas, il peut être avantageux de mesurer la teneur en combustibles des gaz de combustion et de maintenir les combustibles à un très bas niveau.

3.3. Récupération de chaleur :

Echangeurs de chaleur :

De grandes quantités de chaleur sont perdues dans les gaz de combustion, même lorsque l'excès d'air est réglé à une valeur minimale. La récupération de cette chaleur peut entraîner de grandes économies d'énergie. La façon la plus efficace de récupérer cette chaleur est d'installer un échangeur de chaleur à la sortie du four pour récupérer la chaleur dans les gaz de combustion. Il peut être utilisé pour transmettre la chaleur des gaz chauds de combustion à l'air de combustion d'admission. Le débit de transmission de chaleur est proportionnel à la surface de l'échangeur de chaleur et différentiel de température entre les gaz de combustion et l'air de combustion.

3.4. Isolation :

Les couches d'isolation des fours doivent être remplacées de manière périodique, ou bien renforcées. On utilise aujourd'hui des isolants en fibre de céramique qui isolent mieux que le matériau réfractaire solide et qui demandent moins de chaleur pour atteindre la température de service. On installe habituellement une couche de réfractaire sur le plancher du four et à d'autres endroits pouvant être endommagés pour protéger la fibre de céramique. D'autres couches de fibre de céramique peuvent être installées à l'extérieur de la couche de réfractaire au besoin.

3.5. Systèmes de distribution du propane

3.5.1. Tuyauteries

La conception de la tuyauterie doit prendre en compte la composition et les propriétés du propane et des besoins d'évacuation, de purge et de nettoyage. La tuyauterie doit être facilement identifiable en tant que tuyauterie de propane.

3.5.2. Raccords

Les raccords de conduites de gaz doivent être à raccords vissés, à compression, à brides, brasés ou soudés.

Les autres types de raccords, tels que les accouplements pour installations mobiles, doivent assurer un raccordement étanche au gaz. Les raccords vissés ne doivent être utilisés que pour les combinaisons diamètre-pression suivantes :

- les pressions jusqu'à 100 mbar et un diamètre jusqu'à DN 80.
- les pressions jusqu'à 2 bar et un diamètre jusqu'à DN 50.
- les pressions jusqu'à 5 bar et un diamètre jusqu'à DN 25.

La tuyauterie doit être conçue de manière à éviter de soumettre les joints à des efforts en traction.

3.5.3. Flexibles

Les flexibles doivent répondre simultanément aux prescriptions générales suivantes:

- être aussi courts que possible.
- supporter les températures maximale et minimale de service.
- supporter une pression équivalente à 1,5 fois la pression maximale de service aux températures maximales et minimales de service.
- être équipés d'un robinet d'isolement en amont directement accessible.
- être montés de manière à éviter toute déformation, tout effet coup de fouet et toute détérioration.
- être équipés de raccords d'extrémité intégrés.

4. Cahier de charge technico-commercial

Après élaboration du cahier de charge technico-commercial, nous avons posé un appel d'offre concernant la liste des équipements cités dans la partie améliorations et recommandations via le service d'achats de la SMI.

Basé sur notre demande, on a reçu le devis suivant basé sur la deuxième solution de régulation proposée, ainsi que les suggestions et les recommandations citées à la partie précédente :

Désignation matériels	Unités
brûleur à gaz Maxon type Kinémax 3 pouces avec bloc standard 1349°C	01
Micro Ratio Valve M-2½ -1P air et gaz	01
servo moteur de modulation de débit Honeywell M-7284-Q-1082.	01
vanne pneumatique 3 pouces avec Actuator pneumatique d'admission d'air.	01
robinets manuels bridés Boisseau Sphérique inoxydable 01 pouce	02
détendeur de pression Fisher R-622 1.5 Bars à 37 millibars ajustable	01
pressostats Honeywell C-6097-A-2210	02
pressostat Honeywell C-6097-A-2310	01
électrovanne Honeywell VE-415-EE-1016	01
électrovannes Honeywell VE-4032-A-1000	02
vannes manuelles bridées Boisseau sphérique inoxydable ½ pouce	02
flexible 2 ½ pouce avec tresse métallique protection inoxydable	01
flexible 01 pouce avec tresse métallique protection inoxydable	01
flexible ½ pouce avec tresse métallique protection inoxydable	01
Manomètre de pression 0-2.5 bars avec robinet manuel d'isolation	01
Manomètre de pression 0-30 millibars avec robinet manuel d'isolation	01
Manomètre de pression 0-250 millibars avec robinet manuel d'isolation	01
relais Honeywell d'amplification R-7849-A-1023	01
Carte Honeywell prépurge ST-7800-A-1054	01
Détecteur de flamme Honeywell C-7027-A-1064	01
Isolateur thermique Honeywell 136-733.	01
Afficheur numérique de fonctionnement Honeywell S-7800-A-1035	01
Transformateur d'allumage Maxon 7.5 Kv	01
Bougie d'allumage Maxon 134-762	01
Rajah connecteur d'isolation	01
Câble haute température d'allumage en silicone	01
Coffret de commande et contrôle 500 x 500 200	01
Transformateur de tension Honeywell 198-162-AA 220-24 Volts	01
Régulateur de température Eurotherm 3208CCLRR	01
Sonde de température Type -S- avec doigt de gant protecteur	01
Mètres de câble de compensation Type -S-	06
Disjoncteur principal de sécurité Télémécanique	01
Disjoncteur de sécurité C-2 Télémécanique	01
Câblage du coffret avec repères de câblage	01
boutons Télémécanique XB-2 de commande et contrôle	02
Lampes témoins d'indication de fonctionnement	04
Lampe témoin d'indication d'alarme	01
relais Télémécanique 220 volts	01
Borniers de raccordements du câblage avec fusibles	

Tableau 3 : Cahier de charges technico-commercial

Montant unitaire : 406 000.00 Dhs H.T.

En se basant sur ce devis, les équipements concernant la rénovation des quatre fours de fusions coûteront alors **1.948.800 DH**.

De plus le coût d'installation sera estimé à 72.500 DH par four.

Ainsi le coût total de rénovation des fours reviendrait à un montant avoisinant les 2.238.800 DH.

Sachant que le montant économisé (annuellement) résultant de la partie impact est de 720.000 DH, l'estimation du temps d'amortissement des frais de rénovation est de :

$$2.238.800 / 720.000 = 3 \text{ ans}$$

Conclusion

L'objectif principal de notre projet de fin d'étude est de faire une étude de régulation de température des fours de fusion en vue de l'optimisation de la consommation du propane au sein de la société SMI. Ceci permettrait l'automatisation du processus de fusion dans la fonderie. En parallèle, nous avons élaboré un bilan thermique du four et nous avons trouvé un ratio Gaz/Métal théorique. Nous avons également mené une étude détaillée d'un système de régulation de température visant à assurer un fonctionnement optimal du processus de fusion de l'argent en fonction de la consommation d'énergie.

Dans un premier temps, nous avons commencé par un état des lieux détaillé de l'installation du four et des conduites du propane et de l'air au sein de la fonderie. Dans un deuxième temps, nous avons développé une étude thermique afin d'élaborer un bilan énergétique pour le four de fusion. Il a été démontré à travers cette étude et sur la base de calculs des chaleurs au niveau du four que le ratio gaz/métal est de 1,32 et donc du gaspillage de l'énergie dans la fusion de chaque Kg du propane.

Ensuite, nous avons enrichi notre projet par la proposition d'une solution de régulation de température des fours, basé sur une nouvelle installation des électrovannes proportionnelles, d'un régulateur PID et des capteurs convenables afin de respecter le rapport air/gaz et le profil de température exigé par le cahier de charge.

Par la suite, nous avons forcé notre travail par une étude d'identification de notre système de régulation en boucle ouverte et une étude numérique sur Matlab/Simulink pour s'assurer du fonctionnement normale du système de régulation en boucle fermé.

Enfin, nous avons achevé notre travail par une étude de l'impact de la régulation sur la consommation du propane et la réalisation du défi budgétaire. Nous avons également proposé des recommandations pour l'amélioration du rendement de la fonderie. Finalement nous avons élaboré un cahier de charge technico-commercial pour la rénovation de l'installation des fours de fusion.

Sur l'aspect formation, nous pouvons confirmer que la réalisation de ce projet au sein de la SMI, nous a donné la possibilité de nous familiariser avec l'environnement de travail de l'ingénieur et de nous rendre compte des contraintes et des exigences du milieu industriel. Elle a ainsi constitué pour nous, une expérience professionnelle très riche et fructueuse aussi bien sur le plan technique que sur le plan relationnel.

Bibliographie et Webographie

- Instrumentation et régulation en 30 Fiches. Edition Dunod, Paris 2010.
- Techniques d'ingénieur, Automatismes et régulation des équipements thermiques, Jean-François BOURGEOIS.
- Techniques d'ingénieur, Éléments de thermique des fours, Gérard PANIEZ.
- <https://simtronics.eu/fr/detecteurs-de-flamme>
- <http://www.eurotherm.tm.fr/industries/heat-treatment/metals-applications/modulating-burner-combustion-control/>

Annexe 1



Four N° 5

HIGAZ 200 PRO

Num. série : 14.11.3921

Combust. : Propane

Date : 15/01/2015

Heure : 16:45:57

Valeurs mesurées

O2	1.1 %
CO	21 ppm
T amb.	26.3 °C
T fum.	1019.5 °C
NO	125 ppm

Valeurs calculées

CO/CO2	0.02 %
CO2	13.2 %
Exc. air	1.05
Rdt inf.	61.8 %
Rdt sup.	61.8 %
Pertes	38.2 %
T diff.	993.2 °C
NOx	129 ppm
Pt rosée	50.4 °C
CO (O2)	0 ppm
NO (O2)	0 ppm
NOx(O2)	0 ppm
CO nd	22.4 ppm
O2 réf.	21.0 %

Entête 1
Entête 2
Entête 3
Entête 4

Opérateur : Operateur 1
Signature :

AVANT REGLAGE
O2 + Air




S.A.R.L au Capital de 1.000.000 DH - R.C Casa 39015 - N° I.F. 01000869 - C.N.S.S 1013755 - Patente 35707895
173, Rue Nahas Ennahoui Maârif - Casa - Tél.: (212) 522 25.17.52 / 23.57.30 / 99.24.07 / 98.44.16 - Fax : (212) 522 23.40.21
B.P 5197 - Bd. Bin Anzarane - Maârif - Casablanca 20330 - Email:Cielec@Cielec.ma - Web : www.cielec.ma

Four N° 5.

HIGAZ 200 PRO

Num. série : 14.11.3921

Combust. : Propane

Date : 15/01/2015

Heure : 16:51:53

Valeurs mesurées

O2	0.1 %
CO(D)	--- ppm
T amb.	28.4 °C
T fum.	974.6 °C
NO	93 ppm

Valeurs calculées

CO/CO2	1.61 %
CO2	13.9 %
Exc. air	1.00
Rdt inf.	65.4 %
Rdt sup.	65.4 %
Pertes	34.6 %
T diff.	946.2 °C
NOx	96 ppm
Pt rosée	51.2 °C
CO (O2)	--- ppm
NO (O2)	0 ppm
NOx(O2)	0 ppm
CO nd	2260.2 ppm
O2 réf.	21.0 %

Entête 1
Entête 2
Entête 3
Entête 4

Opérateur : Operateur 1
Signature :

Après REGLAGE
GAZ + Air



Annexe 2

Le suivi de température réalisé pour le four de fusion :

temps(s)	°C	temps(s)2	°C3	temps(s)3	°C2
0	203	1200	360,86	3190	884,41
20	203	1220	363,99	3270	889,54
45	203	1240	377,12	3420	906,67
60	203	1260	383,25	3540	917,8
90	203	1400	401,38	3780	938,93
120	203	1435	410,51	3820	953,06
175	203	1445	417,64	3910	961,19
220	203	1520	430,77	3980	971,32
315	203	1580	441,9	4050	978,45
360	203	1630	460,03	4080	983,58
420	203	1700	491,16	4100	986,71
460	203	1740	499,29	4220	991,84
500	203	1760	513,42	4280	995,97
540	203	1810	519,55	4400	1002,1
574	212,13	1920	550,68	4520	1013,23
581	217,26	2020	558,81	4620	1032,36
605	219,39	2000	565,94	4640	1037,49
614	223,52	2020	574,07	4700	1049,62
630	230,65	2060	581,2	4770	1052,75
650	234,78	2180	616,33	4940	1060,88
660	241,91	2200	637,46	5050	1071,01
668	247,04	2210	644,59	5100	1086,14
680	254,17	2220	642,72	5300	1099,27
700	259,3	2245	655,85	5500	1100,4
720	270,43	2265	661,98	5550	1101,53
730	278,56	2275	665,11	5580	1102,66
740	284,69	2285	680,24	6500	1103,79
762	290,82	2340	705,37	6510	1104,92
790	304,95	2550	766,5	6520	1106,05
910	318,08	2700	807,63	6530	1107,18
930	329,21	2760	821,76	6580	1108,31
960	335,34	2850	839,89	6600	1109,44
1000	339,47	2940	856,02	6700	1110,57
1025	342,6	2980	867,15		
1140	353,73	3080	873,28		

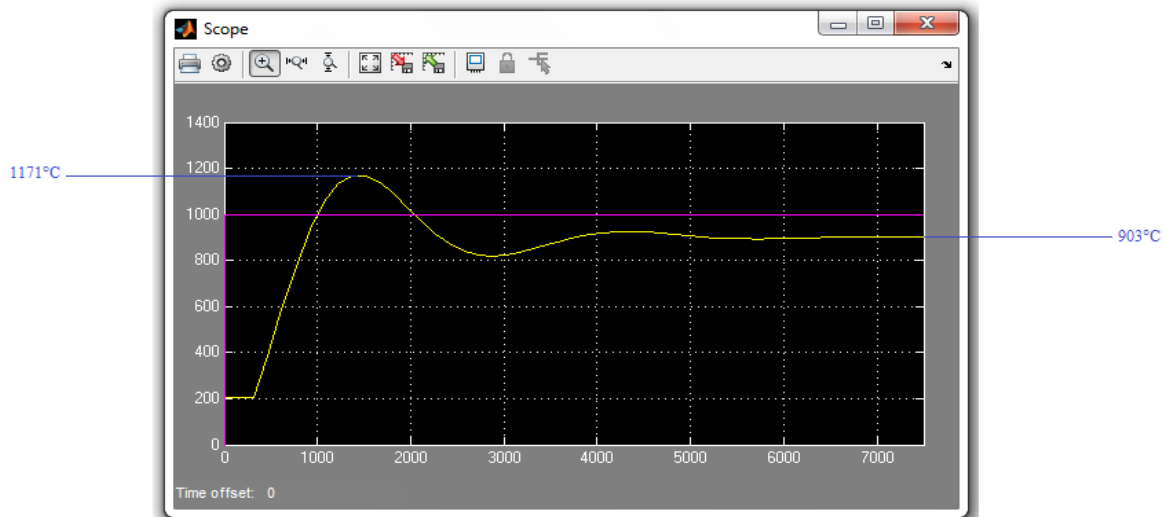
Annexe 3

Tableau de choix de type de régulation selon Broïda :

θ/τ	Action	Commentaires
> 20	T.O.R	<i>Tout Ou Rien : appelée « On Off Control » le régulateur agit sur l'actionneur souvent un contact en l'ouvrant 0% ou en le fermant 100% parfois on utilise le rapport temps d'ouverture sur le temps de fermeture comme pourcentage d'action, exemple 3s ON et 7s OFF donne 30% d'action sur le contact.</i>
10 à 20	P	<i>Proportionnelle : Est caractérisée par (K_p ou G_r) la constante de proportionnalité ou le gain du régulateur, sa valeur est multipliée par l'écart instantané consigne -mesure influençant ainsi l'action sur le système le rendant ainsi plus rapide dans la limite de sa stabilité, on définit aussi la bande proportionnelle $BP\% = 100/G_r$</i>
5 à 10 2 à	P.I P.I.D	<i>Proportionnelle Intégrateur : En ajoutant l'effet Intégrateur à la proportionnalité l'action sur le système se dose avec finesse et précision qui dépend inversement du temps de l'intégrale T_i, pour les procédés stables comme ce cas, on permet un dépassement de la mesure par rapport à la consigne, alors cette action se charge de le ramener rapidement le stabilise. Proportionnelle Intégrateur Dérivateur : L'action dérivée ajoutée à l'action PI apporte une lucidité imparable à la réponse, en</i>

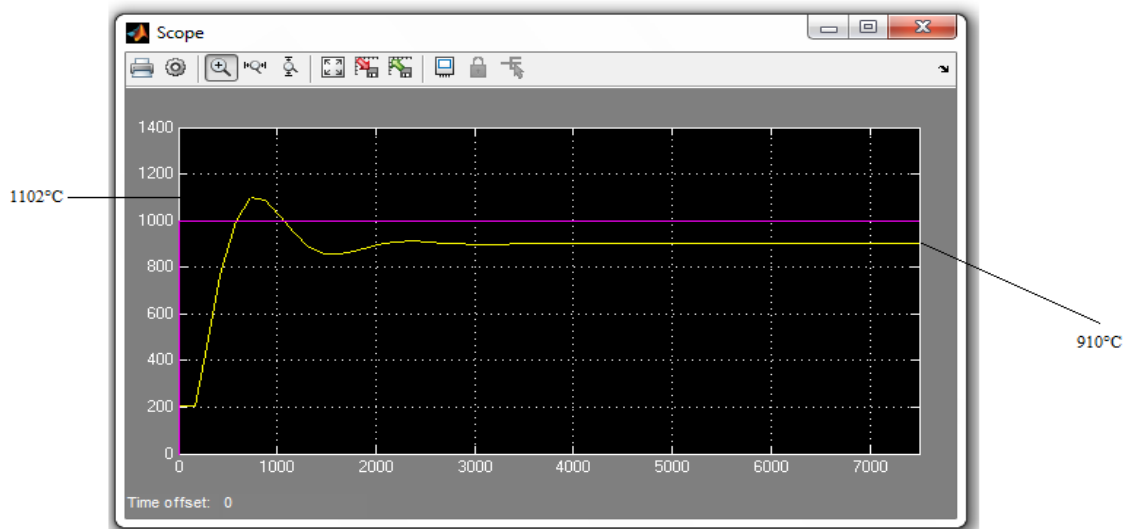
Annexe 4

Les valeurs du dépassement et de l'erreur statique pour le modèle 1



- Le dépassement maximum est: $D = 171^{\circ}\text{C}$
- L'erreur statique : $\varepsilon = 97^{\circ}\text{C}$

Les valeurs du dépassement et de l'erreur statique du 2^e modèle :



- Le dépassement maximum est de ; $D = 102^{\circ}\text{C}$
- L'erreur statique : $\varepsilon = 90^{\circ}\text{C}$

Annexe 5

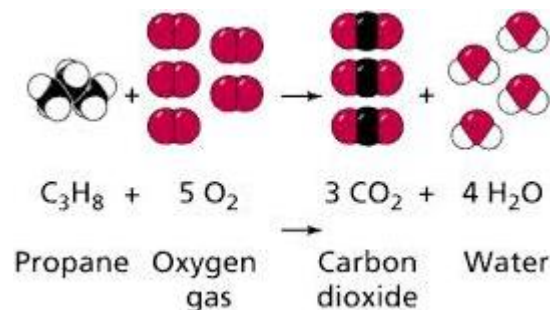
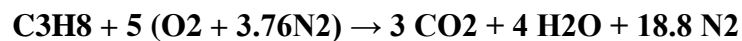
Il est nécessaire tout d'abord de bien illustrer le processus de combustion du mélange air-propane dans la chambre de combustion.

Ce mélange combustible est composé de deux éléments essentiels :

Le carburant (le propane) ayant pour but de développer une énergie calorifique, et le comburant (le dioxygène de l'air) qui va permettre cette combustion.

Pour qu'il ait combustion parfaite - c'est-à-dire qu'à la fin de la combustion il ne reste ni propane ni dioxygène - il faut que les éléments soient correctement dosés, c'est ce qu'on appelle le dosage stœchiométrique.

Ainsi la combustion complète du mélange dioxygène + propane produit de l'eau du dioxyde du carbone, du Diazote, et de l'énergie provenant de la fission des molécules de propane.



La combustion d'une mole de propane nécessite donc 5 moles de dioxygène pour produire exactement trois moles de dioxyde de carbone et quatre moles d'eau

La masse d'une mole de propane C_3H_8 :

$$3 \cdot M(\text{C}) + 8 \cdot M(\text{H}) = 3 \times 12 + 8 \times 1 = 44 \text{ g}$$

La masse de l'air nécessaire pour avoir une combustion complète, sachant que l'air est composé de 21% de dioxygène O_2 et de 79% de diazote N_2 en volume.

$$5 \times (2 \times M(\text{O}) + 3.76 \times 2 \times M(\text{N})) = 5 \times (2 \times 16 + 3.76 \times 2 \times 14) = 686.6 \text{ g}$$

Pour conclure il faut donc 686.6 g d'air pour 44 g de propane. Ce qui donne un rapport stœchiométrique de : **15.6**

Résumé

Dans le cadre de sa démarche de rénovation des différents Ateliers et son engagement environnemental, la Société Métallurgique d'Imiter (SMI) a lancé un ensemble de projets ayant pour objectifs, entre autres, la réhabilitation des installations et la maîtrise d'énergie. Des projets ayant un impact direct sur la production, la fonderie.

C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent projet de fin d'étude intitulé «Etude pour l'optimisation de la consommation du propane par le biais d'une régulation de température des fours de fusion».

La démarche de l'entreprise a été la réalisation d'un bilan thermique des fours de fusion, ainsi qu'une analyse de l'existant, afin de déceler les points faibles, d'apporter des solutions d'amélioration, de concevoir et proposer des technologies de régulation de la température des fours de fusion à la lumière des solutions d'amélioration proposées respectant le cahier des charges imposé.

Finalement, nous avons déterminé le coût de rénovation ainsi que l'impact financier de cet investissement.

Abstract

As part of its approach of renovation of various workshops and environmental commitment, MANAGEM the mining holding of National Investment Company, has launched a set of projects among its objectives, the rehabilitation of equipments and installations and energy management. Projects that have a direct impact on production, in particular the foundry.

In this spirit, this graduation project entitled «Study for propane consumption's optimization through a melting furnace temperature control. »

We have set a thermal analysis of the melting furnaces, and analyzed the current situation, to identify vulnerabilities and provide solutions for improvement, to design and propose solutions for regulation of the temperature of melting furnaces based on the proposed improvement solutions which respect the functional specifications.

Finally, we have determined the restoration's cost as well as the financial impact of this investment.