



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
– المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة  
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE - ANNABA

Département Génie des Procédés et Energétique

## MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme d'INGÉNIEUR D'ETAT

Spécialité : Energétiques et développement durable

Présenté par

**MOUSSAOUI Naima**  
**HAOUARI Imane**

### **Analyse exergetique d'une unité de production sidérurgique : Cas de SMS chez AQS**

Encadré par

**MCA. Mehdi BELHANI**  
ENSTI Annaba

#### **Membres du jury :**

MCA. KERBOUA Kaouther	Présidente	ENSTI
MCB. OTMANI Abdessalam	Examineur	ENSTI

# **Dédicace**

*Louange à Allah qui a facilité les débuts, complété les fins, et par Sa grâce nous a permis d'atteindre les objectifs.*

*Je dédie mon diplôme et le fruit de mes efforts : d'abord*

*À **moi-même**, à celle qui n'a jamais abandonné, qui a tenu bon malgré les chutes, et qui se tient aujourd'hui fièrement devant vous pour célébrer ce beau couronnement.*

*À celui qui a travaillé dur sans jamais se plaindre, à celui dont je porte le nom avec fierté, à celui qui a facilité mon chemin et a toujours été mon soutien dans la vie : **mon cher papa**.*

*À celle qui a été mon premier soutien, celle grâce à qui j'ai découvert ma voie dans la vie et la fierté de mon être, celle qui portait mon nom dans ses prières : **ma chère mère**.*

*À celle que Dieu m'a donnée comme un cadeau précieux dans ma vie, celle qui a changé ma vision de l'amour et de l'amitié : **ma petite sœur Inas***

*À ma précieuse binôme **Naima**, je te dédie cette réussite que nous avons bâtie côte à côte, Je suis fière d'avoir partagé ce parcours avec toi, et je te souhaite du fond du cœur encore plus de succès à venir.*

*À mon ami **Nasro**, même si le destin nous a menés sur des chemins différents, ton souvenir reste lié à chaque étape de ce parcours que nous avons commencé ensemble.*

*À ceux que j'ai côtoyés durant mes années d'études, à mes compagnons de route, chacun avec son nom et sa place dans mon cœur (**Amina, Inas, Ahlem**) à ceux qui ont partagé avec moi les joies, les peines et les défis : merci d'avoir fait partie de cette étape de ma vie.*

***Celui qui dit "Je suis capable", le devient. Et moi, je l'ai dit. Et même si elle m'a résisté, je l'ai conquise.***

***Imane Haouari***

## **Dédicace**

*Louange à Dieu, Celui qui éclaire les débuts, parachève les fins et nous guide vers l'accomplissement.*

*À moi-même, à celle qui a connu dans le silence les luttes, les doutes et les sacrifices. À celle qui, malgré les chutes, s'est relevée encore et encore, jusqu'à franchir cette étape. Seule moi connais réellement le prix de ce parcours.*

*À mon père, mon modèle et mon refuge, dont le nom est pour moi une source de force et de fierté. Que chaque pas accompli soit un hommage à tes efforts inestimables.*

*À ma mère, lumière de ma vie, dont l'amour m'a portée et les prières m'ont protégée. C'est dans tes larmes discrètes et ton soutien inconditionnel que j'ai puisé ma persévérance.*

*À mes frères et sœurs : Afaf, Aïcha, Hanine, Mohamed Elamine, Oussaïde vous êtes les battements de mon cœur et la chaleur de mon chemin.*

*À ma famille, à mon grand-père Athman, à toutes celles et ceux qui m'entourent d'un amour sincère : vous êtes mon prolongement, mon ancrage.*

*À mes précieuses proches : Baharia, Radhia, Linda, Nadjah, Aya, Fadhila, Ahlem, Ines, Ghofrane, Aziza... et à tous ces visages chers croisés sur le chemin. Vous avez laissé une empreinte douce et durable dans mon cœur.*

*À Imane, ma sœur de mémoire, ma partenaire dans cette aventure académique. Merci pour ta présence, ton sérieux et ton engagement. Que la réussite t'accompagne toujours*

*Enfin de compte, ce diplôme n'est pas une fin, mais le commencement « par la grâce de Dieu », d'un avenir que j'espère riche en réussites et en sens.*

**Mark Twain disait :**

*"Ils ne savaient pas que c'était impossible, alors ils l'ont fait."*

*Et moi... je l'ai fait.*

**Naima Moussaoui**

## Remercîment

Louange à Dieu, source de force et de patience, qui nous a permis d'aller jusqu'au bout de ce travail, malgré les défis et les moments de doute.

Nous tenons à remercier de tout cœur notre encadrant **Dr BELHANI Mahdi**, pour sa gentillesse, sa disponibilité et ses conseils qui nous ont guidées pas à pas dans la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à **Monsieur MEDJERAB Aziz** l'encadrant de stage, pour son encadrement attentif, ses orientations méthodologiques et ses conseils précieux tout au long de notre stage. Nous remercions également chaleureusement les ingénieurs et techniciens de l'unité SMS de l'usine AQS Bellara pour leur disponibilité, leur accueil et le partage de leurs connaissances, qui ont grandement enrichi notre travail et notre expérience sur le terrain.

Nous exprimons aussi notre reconnaissance à l'ensemble des enseignants et membres de **L'École Nationale Supérieure de Technologie et d'Ingénierie d'Annaba** pour tout ce qu'ils nous ont transmis durant ces années. Leur encadrement a été un pilier de notre parcours.

Un merci tout particulier à nos familles, pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements dans les moments difficiles, et leur présence rassurante à chaque étape.

À nos amis, camarades de promotion et à tous ceux qui nous ont entourées durant cette période : merci pour vos mots gentils, vos sourires, vos échanges sincères et vos encouragements. Vous avez rendu cette période plus douce.

Enfin, à toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont laissé une empreinte sur ce projet : merci d'avoir été là.

## **Résumé**

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche d'analyse exergétique appliquée à une unité de production sidérurgique, en l'occurrence l'unité SMS de l'entreprise AQS à Bellara. En s'appuyant sur des données réelles, l'étude a permis d'évaluer les rendements exergétiques des équipements clés : four à arc électrique (EAF), four à poche (LF) et coulée continue (CCM). Les résultats révèlent que le four EAF est le plus énergivore, avec un rendement exergétique de 40,52 %, contre plus de 90 % pour les deux autres unités. Des propositions concrètes d'optimisation (récupération de chaleur, préchauffage, isolation) ont été formulées. L'analyse exergoéconomique a aussi mis en évidence les coûts liés aux pertes d'exergie, soulignant l'importance d'une amélioration ciblée pour une meilleure efficacité énergétique et économique.

### **Mots-clés :**

Exergie, four à arc électrique, four à poche, coulée continue, rendement énergétique, pertes exergétiques, optimisation, analyse exergoéconomique, sidérurgie.

## **Abstract**

This thesis presents an exergy analysis of a steel production unit, focusing on the SMS unit at AQS Bellara. Using real industrial data, the study assesses the exergy performance of key equipment: Electric Arc Furnace (EAF), Ladle Furnace (LF), and Continuous Casting Machine (CCM). The results show that the EAF has the lowest exergy efficiency (40.52%), while the LF and CCM exceed 90%. Practical optimization strategies such as heat recovery, preheating, and thermal insulation are proposed. The exergoéconomique analysis highlights the cost of exergy destruction, emphasizing the need for targeted improvements to boost both energy and economic performance.

### **Keywords:**

Exergy, Electric Arc Furnace, Ladle Furnace, Continuous Casting, Energy efficiency, Exergy losses, Optimization, Exergoéconomique analysis, Steel industry.

## ملخص

يتناول هذا البحث تحليلاً إكسرجياً لوحدة إنتاج الصلب، وتحديدًا وحدة SMS بمجمع AQS في بلارة. بالاعتماد على بيانات صناعية حقيقية، تم تقييم كفاءة الأداء الإكسرجي لأهم المعدات: الفرن القوسي الكهربائي (EAF)، فرن التنقية (LF)، وآلة الصب المستمر (CCM). أظهرت النتائج أن فرن القوس هو الأقل كفاءة بنسبة 40.52%، مقارنة بكفاءة تتجاوز 90% للوحدتين الأخرين. وقد قُدمت مقترحات لتحسين الأداء من خلال استرجاع الحرارة، التسخين المسبق، وتحسين العزل الحراري. كما أبرز التحليل الإكسرجي الاقتصادي التكاليف المرتبطة بفقدان الإكسرجي، مما يؤكد أهمية تحسين الأداء الطاقوي والاقتصادي.

### الكلمات المفتاحية:

الإكسرجي، الفرن القوسي الكهربائي، فرن التنقية، الصب المستمر، كفاءة الطاقة، فقدان الإكسرجي، تحسين الأداء، التحليل الإكسرجي الاقتصادي، صناعة الصلب.

## Liste des figures :

<b>Figure I.1</b> : Vue du complexe sidérurgique AQS.....	3
<b>Figure I.2</b> : Présentation de l'atelier de fusion (SMS).....	5
<b>Figure I.3</b> : Schéma d'un four à arc électrique.....	6
<b>Figure I.4</b> : Four à poche.....	7
<b>Figure I.5</b> : Schématisation de la machine de coulée continue.....	8
<b>Figure II.1</b> : Interaction entre un système et son environnement.....	11
<b>Figure II.2</b> : Système thermodynamique quelconque.....	15
<b>Figure II.3</b> : Bilan exergétique du four à arc électrique.....	17
<b>Figure II.4</b> : Bilan exergétique du four à poche.....	17
<b>Figure II.5</b> : Bilan exergétique de la coulée continue.....	18

## Liste des tableaux :

<b>Tableau I.1</b> : Mélanges de charges pour le four à arc électrique.....	6
<b>Tableau I.2</b> : Composition typique des ajouts dans le four à poche.....	7
<b>Tableau II.1</b> : Espèces de référence dans l'atmosphère.....	12
<b>Tableau III.1</b> : Composition chimique de l'acier B500W.....	20
<b>Tableau III.2</b> : Valeurs de Cp à 1823,15 K.....	21
<b>Tableau IV.1</b> : Résultats finaux des rendements exergetiques.....	26
<b>Tableau IV.2</b> : Coût des exergies détruites.....	28

## Table des matières

• Dédicace .....	i
• Remerciements .....	ii
• Résumé – Abstract – ملخص.....	iii
• Liste des figures .....	vi
• Liste des tableaux .....	vii
• Introduction Générale .....	1

## Chapitre I : Description du complexe sidérurgique Bellara

I.1 Introduction .....	3
• I.2 Présentation de l'entreprise AQS .....	3
• I.3 Description du complexe .....	3
• I.4 Présentation de l'unité SMS .....	4
○ I.4.1 Four à arc électrique (EAF).....	4
○ I.4.2 Four à poche (LF).....	6
○ I.4.3 Machine de coulée continue (CCM).....	7
○ I.4.4 Système de traitement des fumées.....	8
• I.5 Conclusion .....	8

## Chapitre II : Analyse exergetique de l'unité SMS

• II.1 Introduction .....	10
• II.2 Concepts d'exergie et définitions .....	11
○ II.2.1 Définition de l'exergie.....	11
○ II.2.2 État mort.....	11
○ II.2.3 Importance de l'état mort .....	13
• II.3 Formes d'exergie .....	13
○ II.3.1 Exergie de matière.....	14
▪ II.3.1.1 Exergie physique.....	13
▪ II.3.1.2 Exergie chimique.....	14
▪ II.3.1.3 Exergie cinétique.....	14
▪ II.3.1.4 Exergie potentielle.....	14
▪ II.3.1.5 Exergie de chaleur .....	14
○ II.3.2 Exergie de travail .....	15
• II.4 Intérêt de l'analyse exergetique .....	15
• II.5 Bilan exergetique général .....	15
• II.6 Rendement exergetique .....	16
• II.7 Bilans exergetiques des sous-unités .....	16
○ II.7.1 Bilan du four à arc électrique (EAF).....	16
○ II.7.2 Bilan du four à poche (LF).....	17
○ II.7.3 Bilan de la coulée continue (CCM).....	18
• II.8 Conclusion .....	18

### I.1.1 Chapitre III : Calculs exergetiques de l'unité SMS

- **III.1** Introduction ..... 20
- **III.2** Modélisation et hypothèses ..... 20
  - III.2.1 Exergie physique.....20
  - III.2.2 Exergie chimique.....21
  - III.2.3 Capacité calorifique.....21
  - III.2.4 Exergie de chaleur.....21
  - III.2.5 Exergie de travail.....22
  - III.2.6 Rendement exergetique (partiel et global) .....22
- **III.3** Résultats des calculs et interprétations .....23
- **III.4** Conclusion ..... 24

**Chapitre IV : Évaluation des performances exergetiques et solutions d’optimisation**

- **IV.1** Introduction ..... 26
- **IV.2** Interprétation des résultats ..... 26
  - IV.2.1 Four à arc électrique (EAF).....26
  - IV.2.2 Four à poche (LF).....26
  - IV.2.3 Coulée continue (CCM).....27
  - IV.2.4 Analyse globale.....27
  - IV.2.5 Classification des pertes exergetiques.....27
- **IV.3** Propositions d’optimisation ..... 28
- **IV.4** Analyse exergoéconomique ..... 28
- **IV.5** Conclusion ..... 28
  
- **Conclusion générale** ..... **30**
- **Références bibliographiques** ..... **32**
- **Annexes** ..... **34**

# **Introduction Générale**

## **Introduction Générale**

Dans un contexte mondial marqué par la raréfaction des ressources énergétiques et la nécessité impérieuse de réduire les émissions de gaz à effet de serre, l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les procédés industriels est devenue un enjeu majeur. Le secteur sidérurgique, fortement énergivore, est au cœur de cette problématique, en particulier les unités de production continue telles que les installations SMS (Steel Making Shop) utilisées dans la fabrication de produits sidérurgiques semi-finis.

Parmi les outils d'analyse les plus performants pour évaluer la performance énergétique des systèmes industriels, l'analyse exergetique se distingue par sa capacité à quantifier les pertes irréversibles et à identifier les sources de gaspillage énergétique de manière rigoureuse. Contrairement à l'analyse énergétique classique qui ne tient compte que de la quantité d'énergie, l'exergie permet d'apprécier la qualité de cette énergie et son aptitude à produire du travail utile.

Ce travail de fin d'études s'inscrit dans un mémoire d'ingénieur pour le thème « Analyse exergetique d'une unité de production sidérurgique : Cas de SMS chez AQS »

Cette logique d'optimisation énergétique, et vise à appliquer une analyse exergetique approfondie sur une installation réelle spécialisée dans la production d'aciers longs.

L'objectif principal est de déterminer les performances exergetiques des différentes unités (four électrique, four à poche, coulée continue...), de localiser les pertes majeures, et de proposer des pistes d'amélioration pour accroître le rendement global du système.

Le manuscrit consacré à ce projet est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est dédié à la description du complexe sidérurgique Bellara avec un focus sur l'unité SMS et ses principaux équipements (EAF, LF, CCM).

Le deuxième chapitre expose les bases théoriques de l'analyse exergetique, en expliquant les types d'exergie, les bilans associés et leur application aux procédés sidérurgiques.

Le troisième chapitre est consacré aux calculs exergetiques appliqués à l'unité SMS, en s'appuyant sur des données réelles, et présente les rendements, les pertes et les flux exergetiques.

Le quatrième chapitre propose une évaluation des performances exergetiques et des solutions d'optimisation pour améliorer l'efficacité énergétique globale de l'unité.

Une conclusion générale vient résumer les résultats essentiels et les recommandations, suivie d'une bibliographie qui regroupe les références utilisées.

Ce mémoire contribuera à renforcer l'intégration de démarches énergétiques avancées dans l'industrie métallurgique algérienne, tout en valorisant les approches d'analyse thermodynamique appliquée dans un contexte industriel concret.

**Chapitre I :**  
**Description du complexe sidérurgique**  
**Bellara.**

## I.1 Introduction ch.1

Dans le cadre d'une coopération stratégique entre l'Algérie et le Qatar, un partenariat a été conclu en 2014 pour la création d'un complexe sidérurgique moderne. Cet accord visait une production initiale de 2 millions de tonnes d'acier en 2017, avec une montée en capacité progressive pour atteindre 5 millions de tonnes.

## I.2 Présentation de l'Entreprise AQS

Algerian Qatari Steel (AQS) est une entreprise issue d'un partenariat entre l'Algérie et le Qatar, ayant pour mission de développer et moderniser l'industrie sidérurgique nationale. Située dans la zone industrielle de Bellara, à El-Milia (wilaya de Jijel), l'usine couvre une superficie de 216 hectares. Grâce à ses infrastructures modernes et à l'intégration de technologies avancées, AQS joue un rôle clé dans la production d'acier de haute qualité, destiné à la fois au marché national et à l'exportation. L'entreprise bénéficie du savoir-faire de ses partenaires, SIDER et Qatar Steel, qui exploitent respectivement les complexes d'El Hadjar en Algérie et de MIC au Qatar. [1]



Figure I.1 : Vue de complexe [1]

## I.3 Description du Complexe

Le complexe AQS fonctionne actuellement à 80 % de sa capacité maximale. Une partie de sa production est destinée à l'exportation, avec des livraisons vers plusieurs pays, dont :

- **Chine** : 50 000 tonnes,
- **Italie** : 30 000 tonnes,
- **Syrie** : 20 000 tonnes,
- **Tunisie** : 5 000 tonnes.

En parallèle, le marché national absorbe environ 30 % de la production, un chiffre sujet à variation en fonction de la demande locale. [1]

AQS utilise la technologie MIDREX®, reconnue mondialement pour son efficacité et son faible impact environnemental. L'entreprise a obtenu trois certifications majeures :

- **ISO 9001** (gestion de la qualité),

- **ISO 14000** (sécurité environnementale),
- **ISO 45000** (santé et sécurité au travail).

Le projet a été développé en deux phases et comprend neuf unités de production, réparties comme suit :

- **3 unités principales :**

- **L'unité DRI (Direct Reduction Iron.)** : est la plus récente du complexe, lancée en 2021. C'est aussi la plus grande et la plus stratégique, avec une capacité impressionnante de 2,5 millions de tonnes par an. Elle fonctionne selon un procédé de réduction directe, ce qui permet d'obtenir du fer métallique à partir de pellets sans faire fondre la matière. À la sortie, on obtient deux types de produits : le fer spongieux froid, appelé CDRI, et le fer spongieux chaud, appelé HDRI.
- **L'unité de l'élaboration de l'acier** : L'unité SMP (Steel Making Plant) est la doyenne du complexe. Elle abrite des fours à arc électrique capables de produire jusqu'à 2,2 millions de tonnes d'acier chaque année. Sa mission : transformer l'acier brut en acier liquide, puis en billettes, ces produits semi-finis aux propriétés bien précises. Cette transformation se fait en trois étapes, réparties entre deux ateliers de fusion indépendants, appelés SMS (Steel Melting Shop).
- **Unité de laminage** : L'unité compte trois laminoirs qui, ensemble, peuvent produire jusqu'à 2 millions de tonnes par an. Chacun a son rôle bien défini : deux sont destinés à fabriquer des ronds à béton, et le troisième s'occupe du fil machine. [1]

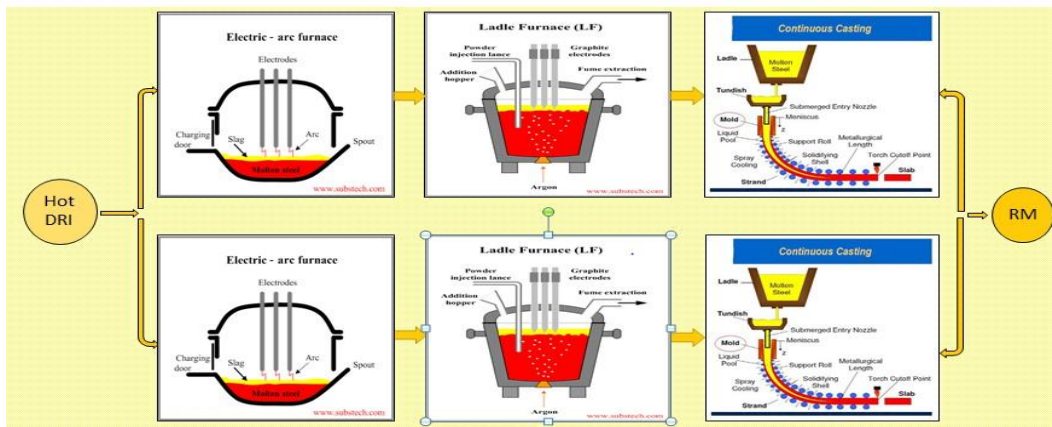
- **6 unités secondaires**, conformes aux normes environnementales et garantissant une production optimale. Les six unités de l'entreprise sont :

- Unité de séparation de l'air (ASU).
- Unité de production de chaux.
- Sous-station électrique (MRSS).
- Station générale de traitement des eaux (WTP).
- Un système de manutention.
- Un système d'équilibre.

#### **I.4 Présentation d'unité de stage :**

##### **I.4.1 L'unité de l'élaboration de l'acier**

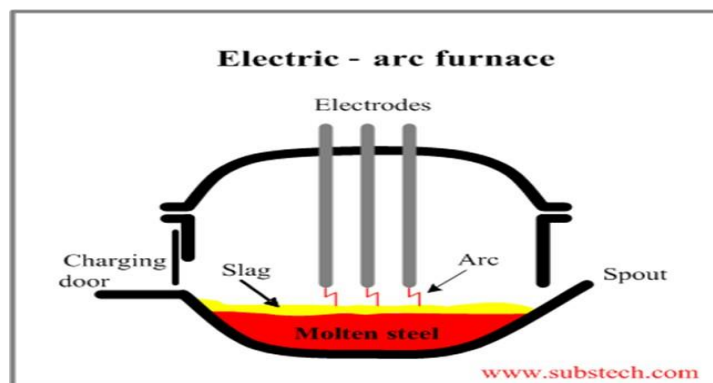
Dite SMP « Steel Making Plant » c'est l'unité la plus ancienne, se compose de deux Fours (EAF), four à deux poches (LF), deux machines de coulée continue (CCM) et installations de traitement des fumées nécessaires Elaborer des semis produits (billettes) destiné vers le laminoir pour obtenir des produits finis (rond à béton et fil machine). [2]



**Figure I.2:** Présentation de l'atelier de la fusion (SMS) [2]

#### I.4.1.1 Four à arc électrique :

Un four à arc électrique (EAF) est un type de four utilisé pour la fabrication de l'acier, où la ferraille est chauffée et fondue grâce à la chaleur produite par un arc électrique entre les électrodes du four et le bain de métal en fusion. L'un des principaux atouts des fours à arc électrique, par rapport aux fours à oxygène basique (BOF), est leur capacité à traiter des charges contenant jusqu'à 100 % de déchets. Aujourd'hui, environ un tiers de l'acier brut produit dans le monde sort de ce type de four, qui peut contenir jusqu'à 400 tonnes de métal en une seule fois [1]



**Figure I.3 :** Le schéma d'un four à arc électrique

Le four à arc électrique ne peut pas faire fondre directement du minerai de fer ou des matériaux comme la ferraille, le fer pré réduit ou la fonte sans préparation. Chacun de ces matériaux se comporte différemment dans le four et a ses propres particularités. En jouant sur les bonnes proportions, l'aciériste peut adapter la recette pour obtenir la qualité d'acier recherchée, en tenant compte surtout des éléments restants contenus dans ces matières. [2]

HOT DRI est introduit dans le four à arc électrique à une température de 600°C. Le HOT DRI est alimenté en continu pendant 30 minutes, pour atteindre le volume spécifique du four à chauffer. Lors de l'alimentation du HOT DRI, l'arc se fait dans le four à l'aide d'une électrode installée dans le bras du four. Une énergie électrique est nécessaire pour faire fondre le HOT DRI en acier liquide. Pendant la fusion, l'injection de carbone est également effectuée pour réduire le carbone de l'acier et absorber les gaz inertes. La fusion se fait jusqu'à une température

de 1650°C. Une fois le chauffage terminé, l'acier liquide est prêt à être versé dans la poche pour un traitement ultérieur. L'acier liquide traité dans l'EAF est également appelé acier primaire [2].



**Figure I.2 :** Chargement de la ferraille dans le four.

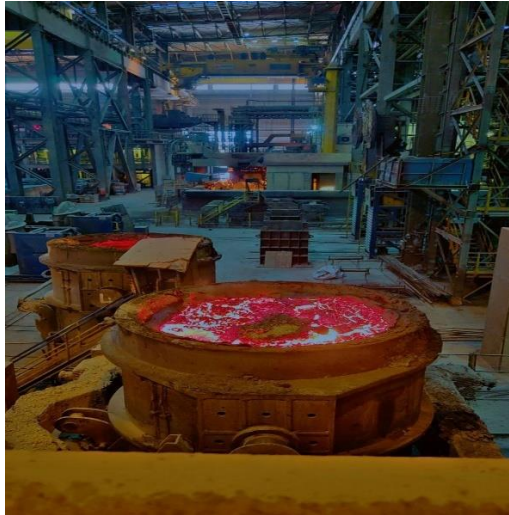
Le four à arc électrique est conçu pour fonctionner selon les mélanges de charges suivants :

**Tableau I.1 :** Les mélanges de charge pour le four a arc électrique [2]

	Density	Charge Mix		
		A	B	C
Hot DRI	1,6	100%	90%	--
Cold DRI	1,6	--	10%	100

#### **I.4.1.2 Four à poche :**

Le four-poche est un équipement clé dans les aciéries électriques, surtout pour produire des aciers de haute qualité. Il permet de poursuivre l'affinage de l'acier liquide après la fusion, en gagnant du temps sur le processus global. Dans ce four, on peut ajuster précisément la température, corriger la composition chimique, et ajouter des éléments comme des alliages ou des fondants grâce à un système de trémie pour obtenant les propriétés chimiques souhaitées pour la coulée. L'électrode est utilisée pour faire fondre l'alliage. Ce traitement de l'acier en LF est appelé processus de raffinage où toutes les impuretés et les gaz inertes sont éliminés et où l'acier atteint la propriété souhaitée. Le processus prend environ 30 à 40 minutes. [2]



**Figure I.3 :** Four à poche

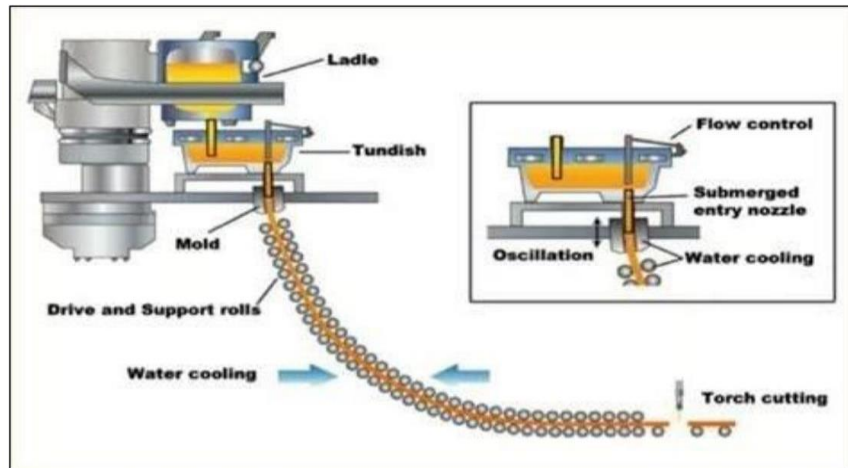
**Tableau I.2 :** Composition typique de l'addition principale [2]

Élément	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Ni %	Cr %	Mo %	Cu %	V %	Pb %	N (ppm)	Ceq
Min	0.19	0.15	0.60	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Max	0.22	0.30	0.80	0.03	0.03	0.15	0.25	0.08	0.2	0.20	0.05	120	0.44
Aim	0.2	0.2	0.66	<0.020	<0.020	0.05	0.10	0.005	0.1	0.0005	<0.005	<90	0.35

#### **I.4.1.3 Machine de coulée continue :**

Les machines de coulée continue transforment le métal fondu en solide sur une base continue et comprennent une variété de processus commerciaux importants. Ces processus constituent le moyen le plus efficace de solidifier de plus grands volumes de métal en formes simples pour un traitement ultérieur.

Dans le processus de coulée continue, l'acier liquide est versé depuis une poche dans un répartiteur à cinq sorties, qui alimente des matrices formant des billettes. Grâce à un système de rotation, les poches peuvent être changées sans arrêter la production. L'acier passe ensuite dans une lingotière, puis est guidé par des rouleaux et refroidi par aspersion d'eau. Il change progressivement d'orientation pour sortir horizontalement. Enfin, les billettes sont découpées à la bonne longueur à l'aide de brûleurs au gaz naturel et à l'oxygène. Chez AQS, chaque machine produit des billettes de 15 cm d'épaisseur et jusqu'à 12 mètres de long. [1]



**Figure I.4 :** Schématisation de la machine de la coulée continue. [2]

#### **I.4.1.4 Système de traitement des fumées (FTP) :**

Ce projet concerne une installation de dépoussiérage des fumées conçue pour les lignes d'aspiration des fumées primaires, secondaires et auxiliaires des deux fours à arc électrique. Chaque unité de l'aciérie disposera de son propre système de dépoussiérage dédié. L'installation est conçue pour traiter les fumées générées lors du fonctionnement du four à arc électrique.

Un conduit refroidi par eau achemine les fumées aspirées depuis le quatrième trou du four jusqu'à la chambre de post-combustion (chambre de décantation), suivie d'un refroidisseur en épingle.

Après le passage dans ce refroidisseur, les fumées prétraitées sont dirigées vers le conduit principal reliant la hotte de toiture à l'installation de filtration. La filtration est assurée par un système de type à aspiration, utilisant des manches filtrantes en polyester. Le nettoyage des manches est effectué par injection d'air comprimé (système Pulse-Jet). Débit maximal à la cheminée 2 250.000 m<sup>3</sup>/h à 76 °C. [2]

### **I.5 Conclusion**

Le complexe sidérurgique de Bellara constitue aujourd'hui un acteur majeur dans l'industrie sidérurgique algérienne. Grâce à son implantation stratégique, ses équipements modernes et son engagement en matière de qualité et d'environnement, AQS s'impose comme un pôle de production sidérurgique compétitif à l'échelle nationale et internationale.

**Chapitre II :**  
**Analyse exergetique de l'unité SMS**

## II.1. Introduction ch.2 :

Dans chaque unité ou dans chaque procédé, l'énergie est encore présente : elle n'est ni créée, ni détruite, d'après le premier principe de la thermodynamique. Pourtant, il y a toujours dans la pratique des pertes propres aux irréversibilités des processus qui détériorent progressivement la qualité de l'énergie. Cette dégradation passe le plus souvent inaperçu si l'on ne tient compte que du premier principe. C'est ici que le deuxième principe de la thermodynamique est utile car il montre que la transformation se fait avec augmentation d'entropie du système. Autrement dit, l'énergie est de moins en moins « utile ». L'exergie a été introduite en combinant le premier et deuxième principe de la thermodynamique pour un système ouvert.

### 1<sup>er</sup> principe :

$$Q' - W'_{utile} = \sum \dot{m}_s (h_s + \frac{v^2}{2} + gz_s) - \sum \dot{m}_e (h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e) \quad (2.1)$$

Avec.

$Q'$  : chaleur reçue par le système [W].

$W'_{utile}$  : travail utile fourni par le système [W].

$\dot{m}$  : débit massique [kg/s].

$h$  : enthalpie spécifique [J/kg].

$v$  : vitesse d'entrée/sortie [m/s].

$z$  : hauteur (énergie potentielle gravitationnelle) [m].

$g$  : accélération de la pesanteur [9.81 m/s<sup>2</sup>].

### 2<sup>ème</sup> principe :

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} = \sum \dot{m}_s s_s - \sum \dot{m}_e s_e + \sum \frac{Q'}{T} + S_{irr} \quad (2.2)$$

Avec.

$s$  : entropie spécifique [J/kg.K].

$S'_{irr} \geq 0$  : production d'entropie due aux irréversibilités.

$\frac{Q'}{T}$  : échange de chaleur avec l'extérieur à la température T.

### Leur combinaison :

$$B_e - B_s = W'_{utile} - T_0 S_{irr} \quad (2.3)$$

Avec.

$B = \dot{m}((h-h_0) - T_0(s-s_0))$  : flux d'exergie.

$T_0$  : température de l'environnement.

$S_{irr}$ : production d'entropie : traduit les pertes exergetiques.

Dans son ouvrage, Szargut mentionne que Rant et Baehr ont introduit le concept d'anergie, défini comme la part de l'énergie totale qui ne peut être convertie en travail utile. Cette notion s'inscrit dans l'analyse de l'efficacité des systèmes énergétiques, en distinguant l'énergie potentiellement valorisable (exergie) de celle qui ne l'est pas (anergie). A titre d'exemple, pour qu'un dispositif comme une pompe à chaleur puisse fonctionner. Il est nécessaire que le système prélève une portion d'énergie dans son environnement immédiat, une énergie que l'on peut, dans ce contexte, assimiler à de l'anergie. Sur le plan formel, l'anergie (A) est souvent définie comme la différence entre l'énergie totale (E) et l'exergie (B) :

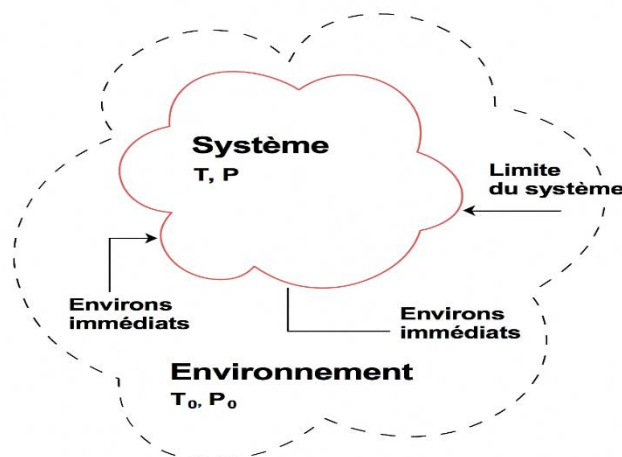
$$A=E-B \quad (2.4)$$

Néanmoins, cette définition peut être jugée approximative, car elle repose sur une compréhension incomplète de l'exergie. En effet, si l'on raisonne en termes exergetiques, la détérioration de la qualité de l'énergie au cours d'un processus thermodynamique ne correspond pas simplement à une transformation en anergie, mais bien à une destruction d'exergie, reflet des irréversibilités inhérentes au système. Dans la suite de ce chapitre, nous rappellerons les principes fondamentaux relatifs à l'exergie, avant d'aborder l'élaboration et l'interprétation d'un bilan exergetique appliqué à notre système industriel de référence.

## II.2 Concept d'exergie :

### II.2.1 Définition :

L'exergie est le travail maximum (travail utile) qui peut être obtenu d'une source de matière ou d'énergie par un système en équilibre avec l'environnement, où tous les flux entrants et sortants sont ramenés à l'état mort, via des processus réversibles. [3]



**Figure II.1 :** Interaction entre un système et son environnement en thermodynamique

### II.2.2 : la notion de l'état mort :

L'état mort, selon Zhang et Çengel (auteurs du manuel "Thermodynamics : An Engineering Approach"), correspond à un état de référence dans lequel un système est en équilibre thermique, mécanique et chimique avec son environnement. À cet état, aucune exergie n'est disponible, car aucune transformation utile n'est possible : le système ne peut plus produire de travail utile.

Un système est à l'état mort lorsqu'il a atteint :

a. L'équilibre thermique avec l'environnement :  $T = T_0$

Où  $T_0$  : est la température de l'environnement.

b. L'équilibre mécanique avec l'environnement :  $P = P_0$

Où  $P_0$  : est la pression de l'environnement.

c. L'équilibre chimique avec l'environnement :

Cela signifie que les potentiels chimiques de toutes les espèces dans le système sont égaux à ceux de l'environnement.

Il n'y a aucune réaction chimique spontanée qui peut encore avoir lieu,  $\mu_i = \mu_{i0}$

Où  $\mu_i$  est le potentiel chimique de l'espèce  $i$ .

Dans le cadre de notre analyse, il est essentiel de faire appel à des espèces de référence. Celles-ci correspondent à des substances chimiques stables, et naturellement présentes dans un milieu donné (air, eau ou sol), utilisées comme base de comparaison dans les bilans de matière, d'énergie, d'entropie ou d'exergie dans un système thermodynamique ou environnemental. On peut citer quelques espèces de référence dans le milieu aérien (l'atmosphère) :

**Table II.1** : quelques espèces de référence dans le milieu aérien (l'atmosphère).

Espèce	Formule chimique	Fraction molaire
Diazote	N <sub>2</sub>	0,78084
Dioxygène	O <sub>2</sub>	0,20946
Dioxyde de carbone	CO <sub>2</sub>	≈ 0,0003945 (≈ 412 ppm)
Gaz rares en traces	Ne	0,0000182
	He	0,00000524
	CH <sub>4</sub>	0,00000179
Argon	Ar	0,00934

Lorsqu'une substance comme le monoxyde de carbone (CO) est émise dans l'environnement, elle tend à atteindre l'état mort, c'est-à-dire un état d'équilibre avec le milieu ambiant, sans potentiel de travail utile. Ce processus se fait à travers des transformations naturelles (réactions chimiques, dilution, transfert thermique), souvent réversibles localement mais accompagnées

d'une production d'entropie globale, responsable de la destruction de l'exergie. Par exemple, le CO réagit spontanément avec l'oxygène de l'air pour former du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), une molécule thermodynamiquement stable. Cette réaction libère de la chaleur et augmente l'entropie du système, dissipant ainsi totalement l'exergie initialement contenue dans le CO. Une fois converti en CO<sub>2</sub> à température ambiante, ce gaz devient incapable de fournir du travail, car il a atteint un état thermodynamique d'équilibre avec l'environnement.

### II.2.3 Importance de l'état mort :

- C'est une référence thermodynamique pour calculer l'exergie.
- À partir de l'état mort, on peut évaluer l'efficacité des processus réels.
- Si un système est à l'état mort, sa capacité à faire du travail est nulle  $E=0$ . [3]

## II.3 Les différentes formes d'exergie

L'exergie c'est la partie de l'énergie utilisable, et transformable pour accomplir un travail. Selon le type de transfert d'énergie, on distingue trois formes principales :

- Exergie de matière.
- Exergie de chaleur.
- Exergie de travail. [4]

### II.3.1 Exergie de matière :

#### II.3.1.1. Exergie physique

Le travail utile maximal obtenu lorsqu'un système interagit avec un environnement de références à un état d'équilibre uniquement par interaction thermique en tenant compte de la différence de température et de pression. [4]

Formule :

$$B_{phy} = \dot{m}[(h - h_0) - (T_0(S - S_0))] \quad (2.5)$$

$$B_{phy} = \dot{m}[c_p(T - T_0) - c_p T_0 \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + v_m \ln\left(\frac{P}{P_0}\right)] \quad (2.6)$$

Où :

$\dot{m}$  : est le débit massique.

$h$  et  $h_0$  : l'enthalpie.

$P$  et  $P_0$  : la pression.

$S$  et  $S_0$  : l'entropie.

$T_0$  : est la température de référence.

$C_p$  : capacité calorifique.

$v_m$  : le volume spécifique déterminé à la température environnementale  $T_0$ .

### II.3.1 .2. Exergie chimique

L'énergie utile qui peut être obtenu lorsqu'un flux de matière amener à l'équilibre chimique avec son état mort par transfert thermique ou échange de matière. [4]

Formule :

$$B_{\text{chim}} = \dot{m}(\sum x_n(b_{\text{chn}}) + RT_0 \sum x_n \ln a_n x_n) \quad (2.7)$$

Avec

$x_n$  : la fraction molaire du composant n.

$a_n$  : l'activité du composant n.

$T_0$  : Température de référence.

$b_{\text{CH}}$  : l'exergie chimique standard.

$R$  : la constante universelle des gaz.

### II.3.1.3. Exergie cinétique :

Elle donner par :

$$B_{\text{cin}} = \dot{m} \frac{v^2}{2} \quad (2.8)$$

Avec :

$\dot{m}$  : c'est le débit massique du fluide.

$v$  : la Vitesse du flux de matière par rapport à la surface de la terre. [4]

### II.3.1.4. Exergie potentielle

Elle donné par :

$$B_{\text{pot}} = \dot{m} \cdot g \cdot Z_0 \quad (2.9)$$

Avec :  $g$  : l'accélération gravitationnelle et  $Z_0$  : la hauteur par rapport au niveau de la mer. [4]

### II.3.1.5 Exergie de chaleur

Le travail maximum extrait de la chaleur dissipée d'un système peut être défini comme :

$$B_Q = Q(1 - \frac{T_0}{T}) \quad (2.10)$$

$Q$  : est la quantité de chaleur,  $T_0$ , les températures de référence et  $T$  la température du système. [2]

### II.3.2 Exergie de travail

Les travaux mécaniques et électriques peuvent être complètement transformés en autre type d'énergie ce qui mettra elle une forme pure d'exergie.

$$\text{Donc : } B_w = W. \quad (2.11)$$

Où  $W$  est le travail produit par le système.

### II.4 L'intérêt de l'étude exergetique

L'analyse exergetique est une méthode d'évaluation de la performance énergétique d'un procédé, fondée sur l'étude des flux et des transformations d'exergie. Elle permet de mesurer l'écart entre le fonctionnement réel et le comportement idéal des équipements, d'identifier les principales sources de pertes irréversibles, et de calculer l'efficacité exergetique. En localisant et en quantifiant ces pertes, elle fournit un cadre rigoureux pour diagnostiquer les dysfonctionnements, analyser les causes des inefficiences, et proposer des pistes d'amélioration technique et énergétique. Cette approche permet ainsi d'objectiver l'impact des phénomènes irréversibles sur le rendement global du système et d'orienter les décisions d'optimisation.

### II.5 Bilan d'exergie

Le bilan d'exergie permet d'évaluer la dégradation énergétique dans un système. Il prend en considération les irréversibilités possibles Avec la définition des termes pour l'exergie de la matière à l'entrée et à la sortie, l'exergie de la chaleur, du travail et des pertes d'exergie. Il s'exprime sous la forme suivante pour chaque système thermodynamique quelconque :

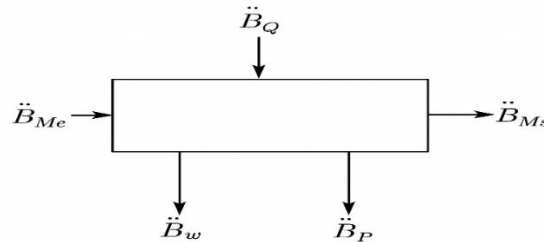


Figure II.2 Système thermodynamique quelconque

Ce bilan permet de quantifier les irréversibilités internes, à l'origine des pertes d'exergie

Le bilan d'exergie peut présenter comme suit :

$$\sum B_{Me} + \sum B_Q = \sum B_{Ms} + \sum B_w + B_P \quad (2.12)$$

$B_{Me}$ : Exergie associée à la matière à l'entrée du système.

$B_{Ms}$ : Exergie associée à la matière à la sortie du système.

$B_Q$  : Exergie associée à une quantité de chaleur.

$B_w$ : Exergie associée à un travail mécanique.

$B_P$ : pertes d'exergie.

## II.6. Rendement exergetique

Le rendement exergetique mesure l'efficacite avec laquelle l'exergie d'un systeme industriel est convertie en travail utile et precise la source des pertes dans l'installation industriel. Il est exprime par la formule [3]:

### II.6.1 Formule generale :

$$\eta_{ex} = \frac{\text{Exergie des produits utiles}}{\text{Exergie d'alimentation}} \quad (2.13)$$

### II.6.2. Selon Szargut (formulation pertes) :

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{B_p}{B_{entree}} \quad (2.14)$$

$B_P$  : exergie detruite ou perdue.

### II.6.3 rendement exergetique pour une source thermique a temperature T :

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{T_0}{T} \quad (2.15)$$

$T_0$  : temperature de l'environnement.

## II.7 Les bilans exergetique du systeme SMS :

### II.7.1 Le bilan exergetique du four a arc electrique

Le bilan exergetique (Figure II.3) du four a arc electrique s'exprime par :

$$B_{elect} + B_{HDRI} + B_{CDRI} + B_{Add} = B_{liq} + B_{slag} + B_{fumé} + B_{Qloss} \quad (2.16)$$

Ou  $B$  represente l'exergie et  $B_{add}$  : l'exergie des additives

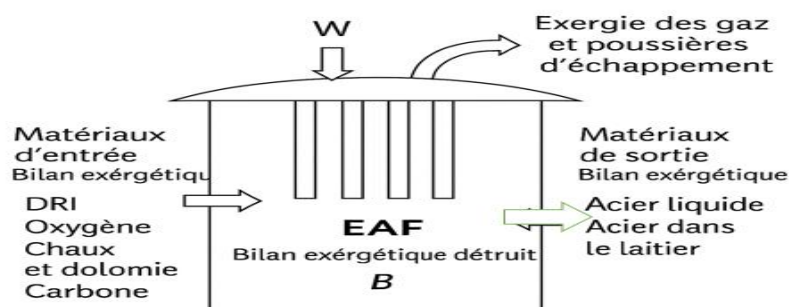


Figure II.3 : le bilan exergetique du four a arc electrique

Dans ce contexte U. Camdali, M. Tunc et G. Arasil ont mené une étude exergetique approfondie sur un four à arc électrique (FAE) d'une capacité de 30 tonnes, en s'appuyant sur les lois de la thermodynamique. L'analyse prend en compte l'ensemble des flux d'énergie et de matière entrant et sortant du four, notamment : les ferrailles, le coke, les fondants, les oxydes, les gaz de cheminée, les poussières et l'acier liquide. Deux sources principales d'énergie sont considérées : d'une part, l'énergie électrique fournie au système, et d'autre part, l'énergie dégagée par les réactions exothermiques internes. Les résultats de l'étude montrent qu'environ 42,6 % de l'énergie totale est perdue, principalement en raison des réactions chimiques irréversibles, des pertes thermiques et d'autres sources d'entropie. L'efficacité exergetique globale du système est évaluée à 46 %. Les auteurs soulignent le fort potentiel de valorisation des gaz de cheminée, identifiés comme l'un des principaux vecteurs de pertes énergetiques. Leur récupération, notamment pour le préchauffage des ferrailles, permettrait à la fois de réduire la consommation électrique et d'améliorer l'efficacité énergetique du procédé. Cette étude met en évidence la pertinence de l'analyse exergetique comme outil de diagnostic et d'optimisation pour améliorer les performances thermodynamiques des fours à arc électrique. [5].

### II.7.2 Le bilan énergetique du four à poche :

Le bilan énergetique (Figure II.4) du four à poche s'exprime par :

$$B_{elect} + B_{liq} + B_{add} = B_{liq-lf} + B_{fumé} + B_{slag} + B_{QLoss} \quad (2.17)$$

Où B est représenter l'exergie

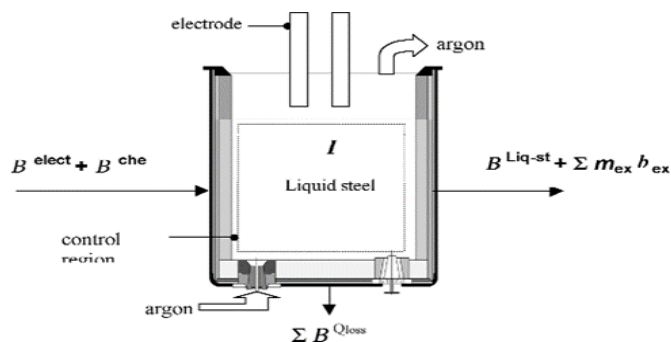


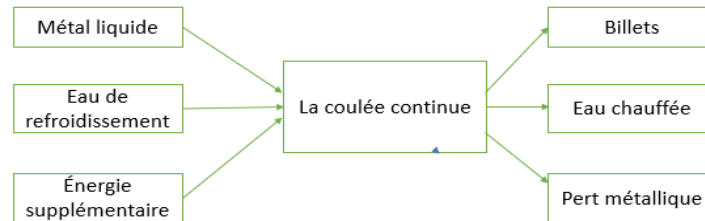
Figure II.4 : le bilan énergetique du four à poche [6]

A une étude similaire Ünal Çamdali traite de l'analyse exergetique et énergetique d'un four à poche (Ladle Furnace, LF) industriel, dont la capacité est de 55 – 57 tonnes d'acier liquide. À partir de la seconde loi de la thermodynamique, il propose un algorithme informatique permettant de modéliser le transfert des flux d'exergie (travail, chaleur, matière) au sein du four. Son étude permet, entre autres, de repérer les pertes d'exergie, d'évaluer les flux en entrée et en sortie et de calculer le rendement exergetique global de l'installation à 81 % (supérieur à celui de four à arc électrique ( $\approx 55\%$ ), qu'il compare). Les résultats obtenus montrent que l'optimisation des conditions de fonctionnement, l'usage de ferrailles propres et la maîtrise des traitements thermiques prévus font diminuer les pertes en exergie. Ce travail représente dès lors une première analyse et ouvre la voie à l'optimisation des performances thermodynamiques des activités de la métallurgie secondaire, que l'on peut espérer obtenir. [6]

### II.7.3 le bilan éxergétique de la coulée continue :

Le bilan éxergétique (Figure II.5) de la coulée continue s'exprime par :

$$B_{liq} + B_{eau} + B_{E-sup} = B_{billets} + B_{eau-réchauffé} + B_{perts} + B_{détruit} \quad (2.18)$$



**Figure II.5** : le bilan éxergétique de la coulée continue

Dans leur étude intitulée "Exergy Flows in Industrial Processes", Göran Wall (1986) propose une analyse détaillée des flux d'exergie dans une aciérie intégrée, incluant notamment les étapes de fusion (four électrique) et de coulée continue. L'auteur applique les principes de la thermodynamique pour quantifier les exergies entrantes, sortantes et détruites tout au long du procédé sidérurgique. L'étude met en évidence que les phases de fusion et de coulée continue représentent à elles seules environ 50 % des pertes exergétiques totales du système, en grande partie à cause des rejets thermiques (gaz de cheminée, chaleur résiduelle) et des irréversibilités chimiques. Ces résultats soulignent que la coulée continue, souvent négligée dans les analyses énergétiques classiques, constitue un levier prioritaire pour l'amélioration de la performance énergétique d'une aciérie. Wall recommande ainsi une valorisation énergétique des rejets thermiques, par exemple via le préchauffage des matières premières, afin de réduire les pertes exergétiques et la consommation électrique globale. Cette étude constitue une référence méthodologique pertinente pour toute analyse exergétique appliquée aux procédés de transformation de l'acier. [8]

### II.8 Conclusion

Ce chapitre a introduit la notion d'exergie et les principes du bilan exergétique, qui permettent d'évaluer l'efficacité réelle des procédés industriels. Il a aussi présenté des études bibliographiques sur le four à arc électrique, le four à poche et la coulée continue. Ces éléments théoriques serviront de base pour le chapitre suivant, où nous présenterons et analyserons les résultats de notre propre étude exergétique

**Chapitre III :**  
**Calculs exergetiques de l'unité SMS**

### III.1. Introduction :

L'analyse exergétique représente un outil essentiel pour l'évaluation rigoureuse de la performance énergétique des procédés thermo thermiques utilisés en sidérurgie. Elle permet non seulement de quantifier les irréversibilités, mais aussi de localiser les étapes critiques du procédé nécessitant une optimisation. Ce chapitre présente de manière détaillée les méthodologies de calcul mises en œuvre pour chaque phase du processus de production sidérurgique, en s'appuyant sur des données expérimentales extraites au cours de notre stage effectué à l'AQS de Jijel.

Dans le cadre de cette étude menée par charge, les flux de l'inventaire sont normalisés par rapport à la quantité du produit fini par rapport à la charge totale. Il s'agit d'une billette en acier B500W. Sa composition chimique est donnée ci-après, constituant une base essentielle pour l'analyse des flux exergétiques.

**Tableau III.1** : la composition chimique de l'acier B500W [2]

Élément	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Ni %	Cr %	Mo %	Cu %	V %	Pb %	N (ppm)
Min	0.19	0.15	0.60	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Max	0.22	0.30	0.80	0.030	0.030	0.15	0.25	0.08	0.20	0.20	0.05	120
Aim	0.20	0.20	0.66	<0.020	<0.020	0.05	0.10	0.005	0.10	0.0005	<0.005	<90

### III.2. Modélisation et équations utilisées dans les calculs et les hypothèses.

Voici les lois de calcul utilisées ainsi que les hypothèses retenues pour l'analyse :

#### III.2.1 L'exergie physique :

$$B_{phy} = m[c_p(T - T_0) - c_p T_0 \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + v_m \ln\left(\frac{P}{P_0}\right)]$$

(3.1)

Dans cette équation l'effet de pression a été négligé, ce qui revient à ne pas prendre en compte le terme  $v_m \cdot \ln(P/P_0)$  dans les calculs, puisque :

- Le système évolue à une pression proche de la pression de référence (souvent 1 atm ou 1 bar).
- La température a un impact dominant sur l'énergie disponible.

#### III.2.2 L'exergie chimique :

$$B_{chim} = m(\sum x_n(b_{ch n}) + RT_0 \sum x_n \ln a_n x_n) \quad (3.2)$$

Dans cette équation on a supposé que  $a_n = 1$  dans les calculs, puisque :

- Notre mélange est idéal (pas d'interactions chimiques significatives entre les espèces (d'état solide pur)).
- On cherche une approximation simplifiée (cas courant dans les calculs d'exergie chimique industrielle).

Pour l'exergie cinétique et potentiel ont été négligées, car leurs contributions sont insignifiantes par rapport à l'exergie thermique et chimique. En effet, les vitesses des flux sont modérées et les dénivelés topographiques faibles dans les installations sidérurgiques, ce qui justifie cette simplification couramment adoptée dans la littérature.

### III.2.3 La capacité calorifique Cp :

Le calcul de la capacité calorifique en fonction de la température est réalisé à l'aide d'une équation polynomiale, permettant de prendre en compte la variation de cp avec la température et la composition chimique sur une large plage de fonctionnement. On peut représenter cette équation comme suit :

$$C_p = a + bT + \frac{c}{T^2} \quad (3.3)$$

On peut représenter quelques valeurs de Cp de quelques composants à T= 1823,15 k et à pression constante selon le tableau III.2 :

**Tableau III.2** : valeurs de Cp de quelques composants à T= 1823,15 k et à pression constante. [10]

Composant	A	b	C	Cp
Fe	23,974	5,02E-03	-2,11E+05	0,0332229
C	16,456	7,13E-03	-1,90E+05	2,96E-02
Si	19,79	2,06E-03	-1,20E+05	2,36E-02
Mn	25,159	3,40E-03	1,92E+05	3,15E-02
P	23,82	7,48E-03	-3,11E+05	3,76E-02

### La capacité calorifique d'un mélange :

Dans la plupart des cas pratiques (comme en sidérurgie), on utilise l'hypothèse du mélange idéal. Où :

$$Cp_{mélange} = \sum Cp_n x_n \quad (3.4)$$

Où :

$x_n$  = fraction molaire de l'espèce n.

$Cp_n$  = capacité calorifique molaire de l'espèce n.

Donc : l'exergie total d'un composant sera comme suit :

$$B_{totale} = B_{physique} + B_{chimique}$$

$$B_{totale} = m \sum Cp_n x_n [(T - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0}\right) + \sum x_n (b_{ch n}) + RT_0 \sum x_n \ln x_n] \quad (3.5)$$

### III.2.4 L'exergie de chaleur :

Elle est calculée par l'équation (2.10) mentionnée dans le chapitre précédent. Pour les quantités de chaleur on distingue trois types donnés comme suit :

- **La Chaleur sensible** échangée par une masse de matière quand sa température varie sans changement d'état :  $Q = mc_p \Delta T$  (3.6)

Où :

Q : chaleur échangée (en kJ).

m : masse de la substance (en kg).

C<sub>p</sub> : capacité calorifique molaire à pression constante (en kJ/mol·K)

$\Delta T = T_{\text{final}} - T_{\text{initial}}$  : variation de température (en K ou °C).

**NB** : la loi est utilisée pour calculer la quantité de chaleur du métal (Q<sub>métal</sub>) et la quantité de chaleur de réchauffage du métal (Lf et ccm).

- **La quantité de chaleur transférée par convection dans la zone de refroidissement**

$$Q_{\text{zone de refroidissement}} = h_{\text{refroidissement}} (T_{\text{solidification}} - T_{\text{eau de refroidissement}}). \quad (3.7)$$

Avec :

$T_{\text{solidification}}$  : température de la surface solide (en K) Calculé conformément à la méthode présentée dans l'annexe C [9].

$T_{\text{eau de refroidissement}}$  : température de l'eau environnant (en K).

h : coefficient de convection thermique (en W/m<sup>2</sup>·K).

- **La quantité de Chaleur échangée par rayonnement**

Elle est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$Q = \sigma \varepsilon (T_{\text{solidification}}^4 - T_{\text{ambiante}}^4) \Delta T \quad (3.8)$$

ε : émissivité de la surface (sans unité, entre 0 et 1)

σ = 5,67 × 10<sup>8</sup> : constante de Stefan-Boltzmann (W/K<sup>4</sup>).

ΔT : durée d'émission (en s).

### III.2.5 L'exergie de travail :

Elle est calculée par l'équation (2.11) mentionnée dans le chapitre précédent ou dans notre étude on a B<sub>w</sub> = quantité d'électricité utilisée dans la fusion du métal (EAF et LF) et pour le coupage des billets (CCM).

### III.2.6 Le rendement

#### a. Le rendement partiel :

Il est calculé par l'équation (2.15) mentionnée dans le chapitre précédent.

#### b. Le rendement global :

Avec le cadre de notre étude, nous présentons les équations générales utilisées pour le calcul des rendements exergetiques partiels et globaux dans les différentes unités du procédé avec la méthode matricielle.

### III.2.6.1 Définitions générales

Soit un procédé composé de 3 unités  $U_1, U_2, \dots, U_n$ , reliées par des flux d'exergie.

L'exergie totale entrante dans une unité  $U_i$  est notée  $E_i$ .

L'exergie transférée de  $U_i$  vers  $U_j$  est notée  $F_{ij}$ .

L'exergie utile ou produit final de l'unité  $U_i$  est notée  $P_i$ .

### III.2.6.2 Le rendement exergetique local :

Le rendement exergetique de chaque unité est défini selon la structure de flux :

Pour une unité  $U_1$  (EAF) :

$$\eta_1 = \frac{F_{12}}{E_1} \quad (3.9)$$

Pour une unité  $U_2$  (LF) :

$$\eta_2 = \frac{F_{23}}{F_{12} + E_2} \quad (3.10)$$

Pour une unité  $U_3$  (ccm) :

$$\eta_3 = \frac{P_3}{F_{23} + E_3} \quad (3.11)$$

### III.2.6.3 Le rendement global exergetique du système :

**La modélisation matricielle :** L'équation matricielle suivante permet de relier les exergies entrantes, transférées et produites :[11] (**Méthode matricielle (Chapitre 10)**)

$$A \cdot E = P \quad (3.12)$$

Où :

$$A : \text{est la matrice d'incidence exergetique. } A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\eta_1 & 1 & 0 \\ 0 & -\eta_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$E : \text{est le vecteur des exergies entrantes : } E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$P \text{ est le vecteur des produits exergetiques : } P = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ P_3 \end{bmatrix}. \quad (3.15)$$

### III.3 Les résultats de calculs :

Le résumé des bilans exergetiques de chaque système est présenté dans le tableau figurant en **annexe A**.

### **III.4 Conclusion :**

L'analyse exergétique menée sur les différentes unités du procédé sidérurgique a permis de mettre en évidence les principales sources de pertes irréversibles et d'identifier les leviers potentiels d'amélioration. Elle constitue ainsi un outil essentiel pour évaluer la performance énergétique globale du système. Le chapitre suivant sera consacré à la discussion et à l'interprétation des résultats obtenus, en vue de tirer des enseignements concrets et proposer des pistes d'optimisation adaptées au contexte industriel étudié.

**Chapitre VI :**  
**L'évaluation des performances  
exergétiques et solutions d'optimisation.**

## IV.1 Introduction :

Ce chapitre vise à mieux comprendre le fonctionnement réel du four à arc électrique à travers l'analyse des résultats obtenus. Il s'agit d'identifier où se produisent les principales pertes d'exergie et d'évaluer l'efficacité globale du procédé. Sur cette base, des pistes d'amélioration sont proposées pour réduire les gaspillages d'énergie et optimiser le rendement du système. Enfin, une analyse exergoéconomique permettra de relier ces pertes à leur impact économique, afin de mieux orienter les choix techniques vers des solutions à la fois plus performantes et plus rentables.

## IV.2 L'interprétation des résultats final :

L'analyse exergétique des trois unités principales du procédé (Four à Arc Électrique (EAF), Four Poche (LF), et Coulée Continue (CCM)) permet de quantifier précisément l'efficacité thermodynamique de chaque étape et d'identifier les principales sources de pertes. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau IV.1 ci-dessous :

**Tableau IV.1:** les résultats finals

Système	Exergie entré(kJ)	Exergie sortie(kJ)	Exergie détruite (kJ)	Rendement Partiel	Rendement globale
EAF	2243994426	924781592,5	1319212833	40,52%	80.4%
LF	9915783385	9095522904	820260480,6	91,72%	
CCM	9499810413	9071718267	428092146,4	95,29%	

### IV.2 .1 Le four à arc Électrique (EAF)

Le four à arc électrique présente un rendement exergétique relativement faible, de l'ordre de 40,52 %. Ce résultat est cohérent avec la nature du procédé, qui repose sur une fusion intensive d'un mélange de fer spongieux (HDRI, CDRI), de chaux, de carbone et de gaz injectés, sous l'effet de l'électricité. Une grande partie de l'exergie est dissipée sous forme de :

- Rayonnement thermique ( $\approx 1\,266,7$  kJ) émis par l'arc électrique,
- Convection et conduction à travers les parois du four ( $\approx 1\,856$  kJ),
- Pertes par les fumées chaudes évacuées ( $\approx 174$  kJ),
- Exergie détruite par les transformations irréversibles (fusion, réactions d'oxydation).

Ce faible rendement met en évidence que le EAF est le maillon le plus dissipatif du procédé. Il constitue une cible prioritaire pour toute action d'amélioration énergétique, notamment à travers des techniques de récupération de chaleur, de préchauffage de la charge, ou de réduction des pertes radiatives.

### IV.2.2 Le four Poche (LF)

Le four poche présente un rendement exergétique très élevé, atteignant **91,72 %**, ce qui confirme son rôle principalement thermique (maintien et ajustement de la température du métal). Les pertes sont relativement modérées et se répartissent entre :

- Pertes thermiques par rayonnement, convection et conduction ( $\approx 3\,247$  kJ),

- Pertes métalliques ( $\approx 1\,631$  kJ),
- Pertes par émissions gazeuses ( $\approx 170$  kJ).

L'apport énergétique principal provient de l'électricité, utilisée de manière ciblée et efficace. La majorité de l'exergie est conservée sous forme de métal liquide affiné, prêt pour la coulée.

#### IV.2.3 La coulée Continue (CCM)

L'unité de coulée continue affiche le rendement exergetique le plus élevé, avec **95,29 %**. Ce résultat souligne l'efficacité de cette étape de solidification contrôlée, où l'essentiel de l'exergie contenue dans le métal liquide est transférée aux billettes solides. Les pertes sont très faibles et proviennent essentiellement de :

- Pertes métalliques ( $\approx 18,6$  MJ), dues aux défauts ou aux rebuts métallurgiques,
- Pertes thermiques résiduelles durant la solidification et le refroidissement ( $\approx 17,8$  kJ +  $q_1 + q_2$ ),
- Énergie dissipée par les équipements auxiliaires (eau de refroidissement, électrodes de coupage).

La bonne maîtrise thermique et l'homogénéité du refroidissement expliquent cette performance, qui peut encore être optimisée en réduisant les pertes métalliques par un meilleur contrôle de la qualité du produit fini.

#### IV.2.4 Analyse Globale

L'analyse comparative met en évidence des disparités significatives entre les unités :

- Le EAF concentre l'essentiel des pertes exergetiques, en raison de la fusion à haute température, des pertes thermiques intenses et des irréversibilités associées.
- Le LF et la CCM sont très performants, assurant un bon transfert de l'exergie sous forme de métal liquide puis solide, avec peu de pertes.

Ces résultats montrent que toute stratégie d'optimisation énergétique du système de production doit prioritairement cibler le four EAF, en améliorant son efficacité thermique et en intégrant des dispositifs de récupération de chaleur ou d'optimisation de la charge.

#### IV.2.5 Classification des pertes et identification des sources des pertes :

Le tableau (**Annexe B**) résume la classification des pertes exergetiques observées dans les trois unités principales. Il en ressort que le four à arc électrique (EAF) est le principal contributeur aux pertes, tant par dissipation thermique que par destruction d'exergie liée aux réactions de fusion. Le four poche (LF), bien que plus efficace, présente encore des pertes liées aux réactions métallurgiques et aux échanges thermiques. La coulée continue (CCM) affiche des pertes thermiques très faibles, mais montre une part non négligeable de pertes métalliques, souvent liées à des défauts de solidification ou à des chutes. Ces données permettent d'identifier clairement les priorités en matière d'optimisation énergétique. L'annexe B présente une classification détaillée des pertes exergetiques pour chaque système.

### IV.3 Propositions d'amélioration et optimisation exergetique :

Parmi toutes les unités du procédé, le four à arc électrique est celui qui présente les plus grandes pertes d'exergie. Cela s'explique par sa nature même de son fonctionnement, à forte consommation énergétique, basé sur la fusion de la charge métallique par des arcs électriques puissants. Pour améliorer ses performances, plusieurs pistes concrètes peuvent être envisagées :

- Récupération de la chaleur des fumées : mise en place d'un échangeur thermique pour valoriser les gaz chauds sortants.
- Préchauffage de la charge (DRI) : utilisation de la chaleur récupérée pour préchauffer les matières entrantes.
- Réduction des pertes radiatives : amélioration de l'isolation thermique des parois et des couvercles du four.
- Optimisation des paramètres de fusion : ajustement de la puissance électrique et du débit d'oxygène pour réduire les réactions irréversibles.
- Maintenance préventive ciblée : pour limiter les fuites thermiques et mécaniques.

### IV.4 Analyse exergoéconomique

L'analyse exergoéconomique vise à relier les pertes d'exergie à leur coût économique, afin d'identifier les priorités en termes de rentabilité énergétique.

Le prix industriel actualisé de l'électricité en Algérie : **4,472 DA/kWh**.

$$1 \text{ kWh} = 3600 \text{ KJ} \quad \text{donc } 3600/4.472 \approx 0.0012422 \text{ DA/Kj}$$

**Tableau IV.2** : Coût de l'exergie détruite par unité

Unité	Exergie détruite (kJ)	Coût unitaire (DA/kJ)	Coût estimé (DA)
EAF	1 319 212 833	0,0012422	1 638 906 DA
LF	820 260 480	0,0012422	1 019 150 DA
CCM	428 092 146	0,0012422	531 811 DA

Sur cette base, le coût économique des pertes exergetiques a été évalué pour chaque unité. Le four à arc électrique (EAF) représente la source de perte la plus importante, avec un coût estimé à **1,64 million** de dinars par charge, et environ de **1,02 million** pour le four poche (LF) et **0,53 million** pour la coulée continue (CCM). Ces données renforcent la nécessité de prioriser les efforts d'optimisation sur l'EAF, non seulement d'un point de vue énergétique mais aussi économique.

### IV.5 Conclusion :

Ce chapitre a permis d'identifier les principales pertes d'exergie du procédé sidérurgique, avec le four à arc électrique (EAF) comme principal point faible. Des solutions techniques ont été proposées pour améliorer le rendement énergétique. L'analyse exergoéconomique a montré l'impact économique de ces pertes, confirmant l'intérêt d'optimiser le système à la fois sur le plan énergétique et financier.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale :**

Ce travail a permis de mener une analyse exergetique détaillée de l'unité de production d'acier (SMS) du complexe AQS Bellara, en s'appuyant à la fois sur des données industrielles réelles et sur les concepts fondamentaux de la thermodynamique.

Dans un premier temps, une description complète du complexe et de ses installations a été réalisée, mettant en lumière le rôle central des trois principales unités : le four à arc électrique (EAF), le four à poche (LF) et la coulée continue (CCM). Ces équipements forment la chaîne de transformation du minerai en produit semi-fini.

L'analyse exergetique a ensuite permis de quantifier les flux d'exergie à chaque étape du processus. Les résultats montrent clairement que le four à arc est le maillon le plus énergivore, avec un rendement exergetique relativement faible (environ 40 %), principalement à cause des pertes thermiques importantes et des irréversibilités internes au procédé. À l'inverse, le four à poche et la machine de coulée continue ont affiché de très bons rendements (supérieurs à 90 %), confirmant leur meilleure efficacité énergétique.

En comparant ces résultats aux tendances observées dans la littérature, on constate une bonne cohérence, ce qui renforce la fiabilité de l'approche adoptée dans ce travail. Ce mémoire apporte donc une valeur ajoutée en appliquant concrètement l'analyse exergetique à un cas industriel réel et représentatif de l'industrie sidérurgique algérienne.

Sur la base de ces constats, plusieurs pistes d'amélioration ont été proposées, notamment l'installation de systèmes de récupération de chaleur sur les fumées du four, le préchauffage des matières premières, ou encore une meilleure isolation thermique. Une estimation économique des pertes exergetiques a également été réalisée, mettant en évidence l'intérêt de ces actions non seulement d'un point de vue énergétique, mais aussi financier.

En conclusion, ce projet a montré que l'analyse exergetique est un outil puissant pour mieux comprendre le fonctionnement réel d'un système industriel, identifier les points faibles et proposer des solutions concrètes d'optimisation. Il ouvre la voie à de futures études intégrant des aspects environnementaux et économiques dans une démarche globale d'amélioration des performances industrielles.

# Références

## Références :

- [1] BOUKELLOUL Lina-BELAOUIRA Lina mémoire d'ingénieur -SGM-2023
- [2] Documentation interne de l'entreprise
- [3]: Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes, Jan Szargut Sifraton Porntical stiversity, Ger, Plast, David R. Morris Dativersity of New Brunswick, Canada, Frank R. Steward University of New Brunswick Canada, HEMISPHERE PUBLISHING CORPORATION: New York Washington Philadelphia London, DISTRIBUTION OUTSIDE NORTH AMERICA: SPRINGER-VERLAG Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo
- [4] : projet fin d'étude sur Etude énergétique et exergetique du central thermique à trois corps d'Achouat Wilaya de Jijel. KRITER Yahia HEMARA Toufik.
- [5]: ANALYSIS OF AN ELECTRIC ARC FURNACE USED FOR CASTING OF STEEL: AN EXERGY APPROACH U. Camdali, M. Tunc, and G. Arasil.
- [6]: Energy and Exergy Analysis of a Ladle Furnace. U. Camdali
- [7]: A thermomechanical modelling of continuous casting to master steel slabs internal soundness and surface quality Nicolas Triolet, Manuel Bobadilla, Michel Bellet, Laure Avedian, Pierre Mabelly.
- [8]: Exergy Analysis of Steel Production Processes Nobuyuki Shigaki<sup>1</sup>, Tomohiro Akiyama<sup>2</sup> and Fumitaka Tsukihashi<sup>1</sup> Exergy Analysis of Steel Production Processes Nobuyuki Shigaki<sup>1</sup>, Tomohiro Akiyama<sup>2</sup> and Fumitaka Tsukihashi<sup>1</sup>.
- [9] : D.R. Poirier G.H. Geiger-Transport Processing Phénoménia in matériels (2016).
- [10] CHRISTOPHER W. BALE and GUNNAR ERIKSSON METALLURGICAL THERMOCHEMICAL DATABASES-A REVIEW
- [11] Kotas, T. J. (1985). "The Exergy Method of Thermal Plant Analysis" Butterworths.

# **Annexes**

## Annexe A : Résumé des bilans exergetiques pour chaque système.

<b>EAF</b>									
<b>Entré</b>					<b>Sortie</b>				
	T(C°)	m (kg)	Cp(kj/mol.k)	B <sub>tot</sub> (Kj)		T(C°)	m (Kg)	Cp(kj/mol.k)	B <sub>tot</sub> (Kj)
HDRI(s)	475	110000	1360	1982286699	Métal liquide (L)	1550	121500	0,266	909403743,5
CDRI(s)	25	27000	/	1153859,12	Laitier (L)	1550	25000		11383396,1
Burnt lime (Cao)(s)	25	5000	/	551000	Fumée (g)	1449,85	8970	0,031	173,665
Dolo lime (s)	25	5500	/	367400	Q <sub>cond</sub>	/			18,516
Chrged carbon (s)	25	900	/	4258800	Q <sub>conv</sub>	/			1873,811
Injected co(g)	25	2361	/	6383580	Q <sub>ray</sub>	/			1354,567
O2(g)	25	4776,2	/	593088	Q <sub>métal</sub>	/			1630,895
Electricité	69000 kwh			248400000					
<b>LF</b>									
<b>Entré</b>					<b>Sortie</b>				
	T(C°)	m (kg)	Cp	B <sub>tot</sub> (Kj)		T(C°)	m (kg)	Cp	B <sub>tot</sub> (Kj)
Métal liquide (l)	1550	121500	0.266	909403743,5	Liquide métal (L)	1580	121500	0.265	9095230448
Carbon(s)	25	247	/	6345745,58	Laitier (L)	1580	2000	15.2	287408,995
FeSi (s)	25	250	/	22645,956	Fumée (g)	1449,85	660	0,031	169,623
SiMn (s)	25	1250	/	5132,848	Q <sub>cond</sub>	/			18,516
Cao (s)	25	675	/	5588,97	Q <sub>conv</sub>	/			1873,811
Mgo (s)	25	150	/	528,187	Q <sub>ray</sub>	/			1354,567
Électricité	2500 kwh			9000000000	Q <sub>métal</sub>	/			1630,895
<b>CCM</b>									
<b>Entré</b>					<b>Sortie</b>				
	T(C°)	m (kg)	Cp	B <sub>tot</sub> (Kj)		T(C°)	m (kg)	Cp	B <sub>tot</sub> (Kj)
Métal liquide (l)	1580	121500	0.265	9095230448	Billets	25	119,05 Billet	/	9053083137
eau de refroidissement	25	/	/	7064,743	Pertes métalliques (s)	25	2450	/	18627830,7
energie supplémentaire	/			2142900	L'eau chauffé				7299,112
					Qémis	/			17831,489

**Annexe B :la classification des pertes exergetiques.**

<b>Unité</b>	<b>Types de pertes</b>	<b>Valeur (kJ)</b>	<b>Source principale</b>
<b>EAF</b>	Émissions de gaz	173,67	Fumées issues de la fusion
	Dissipation thermique (conduction)	18,14	Parois du four
	Dissipation thermique (convection)	1838,04	Échange avec l'air ambiant
	Dissipation thermique (rayonnement)	1266,72	Surface du bain de fusion
	Pertes métallurgiques	7,03	Projection ou oxydation de métal
	<b>Exergie détruite</b>	<b>1 319 212 833</b>	Réactions irréversibles, fusion
<b>LF</b>	Émissions de gaz	169,62	Fumées durant l'affinage
	Dissipation thermique (conduction)	18,52	Parois du four
	Dissipation thermique (convection)	1873,81	Atmosphère environnante
	Dissipation thermique (rayonnement)	1354,57	Surface du métal liquide
	Pertes métallurgiques	1630,90	Incluses dans le laitier ou pertes partielles
	<b>Exergie détruite</b>	<b>820 260 480,6</b>	Réactions de correction, pertes internes

Unité	Types de pertes	Valeur (kJ)	Source principale
<b>CCM</b>	Chaleur de solidification	23 705,99	Refroidissement contrôlé du métal
	Dissipation thermique (convection)	69,26	Zones de refroidissement
	Dissipation thermique (rayonnement)	0,08	Faible, surface métallique refroidie
	Pertes métalliques	11 026 434,73	Défauts de billettes, chutes métalliques
	<b>Exergie détruite</b>	<b>428 092 146,4</b>	Passage liquide-solide, irréversibilités thermiques

## Annexe C : Calcul détaillé de la température et du temps de solidification. [9]

### 1. détermination de la température de la solidification :

#### Modélisation thermique du système

- On modélise la solidification comme un **problème de conduction unidimensionnelle**.
- Le front de solidification progresse selon une relation du type  $x=M(t)$
- Le moule est traité comme un solide de conductivité connue.
- On suppose que :
  - ✓ Le front de solidification est plan.
  - ✓ Le métal à l'interface est à la température de solidification  $T_M$ .
  - ✓ Le moule initialement à température  $T_0$  échange de la chaleur avec l'extérieur par convection avec coefficient  $h$ .

### 2. Hypothèses simplificatrices

- La vitesse de solidification est assez lente pour que l'état thermique soit quasi stationnaire dans le moule.
- Le moule a des propriétés thermo physiques constantes.

#### Etapes de calculs

##### 1. Les données :

$$h=2000 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$$

$H_f$ : chaleur latente de fusion de l'acier.

$T_p$  : Température de coulée (depuis la poche) : 1853.15k

$c_{ps}$ : Capacité calorifique du métal solide :  $670 \text{ J/kg}^{-1} \cdot \text{K}$ .

$c_{pl}$  : Capacité calorifique du métal liquide :  $596 \text{ J/kg}^{-1} \cdot \text{K}$ .

$\lambda$  : Conductivité thermique à l'état solide :  $60 \text{ W/m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$V$  : Vitesse d'écoulement du métal liquide dans la coulée continue :  $V=3.5 \text{ m/s}$ .

Longueur de la coulée continue : 8m.

$L$  : La longueur du billet : 2m

$y$  : longueur de parcourus par le métal liquide dans la coulée continue,  $y=2 \text{ m}$ .

$\rho$ : la masse volumique du métal solide ( $\text{kg/m}^3$ ).

$K$  = Coefficient de solidification (pour les aciers  $= 9\sqrt{s/m}$ ).

$T_0$  : température ambiante (298.15 K).

### 1.1. L'épaisseur de la couche solidifiée : $M$

$$M = K \cdot \sqrt{\frac{y}{v}} = 6.78 \text{ mm}$$

Afin d'estimer l'épaisseur de la couche solidifiée, on commence par calculer le terme sans dimension  $\frac{hM}{\lambda}$  où :

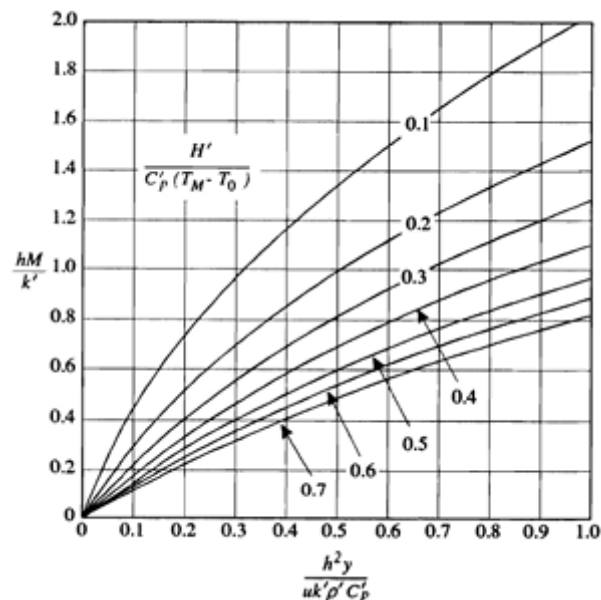
$M$  : représente l'épaisseur de la couche solidifiée.

$\lambda$  est la conductivité thermique du matériau.

Une application numérique donne :  $\frac{hM}{\lambda} = 0.221$

Ensuite, on évalue le second paramètre sans dimension :  $\frac{h^2 y}{v \lambda \rho c_p} = 0.05$

La projection de ces deux valeurs sur la figure suivante permet de repérer la courbe correspondant à la valeur de  $\frac{H'}{c_p(T_M - T_0)}$  qui égal à 0.2 qui reste constante



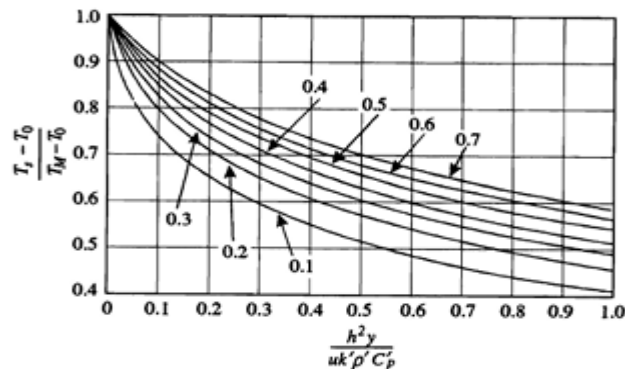
**Figure III.1** : Épaisseur solidifiée  $M$  en fonction de la distance dans le moule [9]

On peut ensuite estimer la température de solidification  $T_m$  à partir de l'égalité entre les deux équations suivantes :

$$H' = H_f + c_{pl}(T_P - T_M) \quad \text{Et} \quad H' = 0.2c_{ps}(T_M - T_0)$$

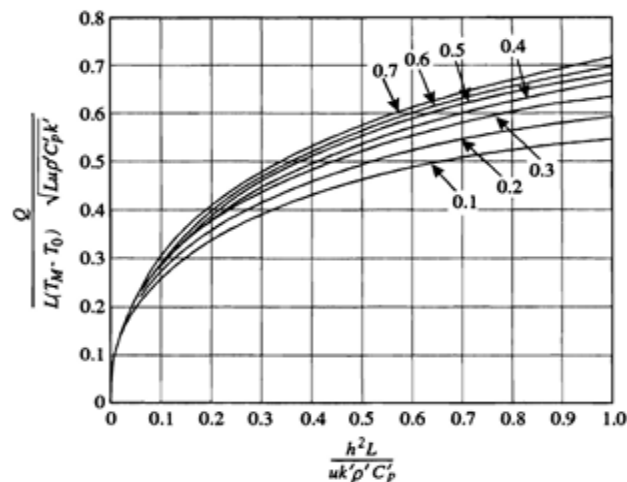
$$T_M = \frac{H_f + c_{pl}T_P + 0.2c_{ps}T_0}{0.1(c_{pl} + c_{ps})} = 1475.83K$$

La projection des valeurs de  $\frac{h^2y}{\sqrt{\lambda\rho c_p}}$  et  $\frac{H'}{c_p(T_M - T_0)}$  sur la figure III.2 permet de déterminer que  $\frac{T_s - T_0}{T_M - T_0} = 0.8$ . Et donc  $T_s = 1240,33k$ .



**Figure III.2 : L'évolution de  $T_s$  en fonction de la distance verticale dans le moule**

La projection des valeurs de  $\frac{h^2y}{\sqrt{\lambda\rho c_p}}$  et  $\frac{H'}{c_p(T_M - T_0)}$  sur la figure III.3 permet de déterminer que  $\frac{Q}{y(T_M - T_0)\sqrt{\lambda\rho c_p}} = 0.2$ . Et donc  $Q = 7.44MW$ .



**Figure III.3 : Taux de transfert thermique sans dimension en fonction des paramètres**

Thermo physiques et géométriques.

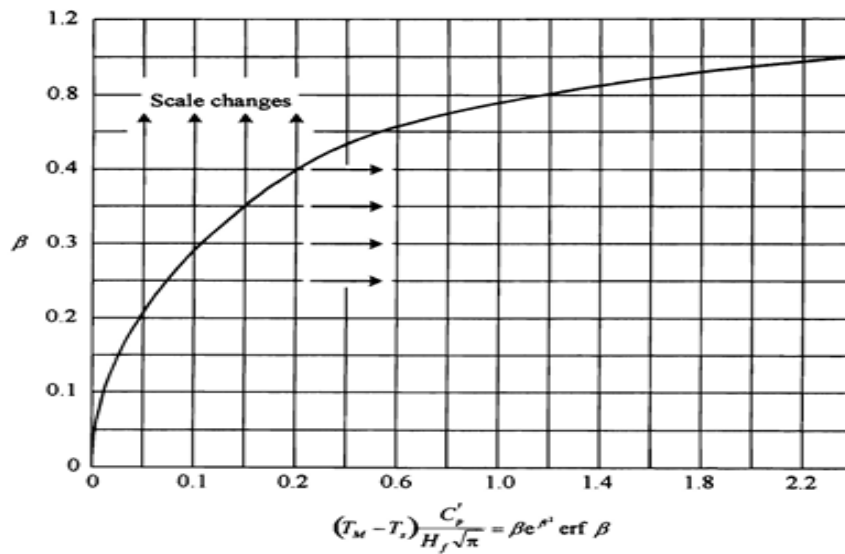
Détermination du temp de solidification :

$$t = \frac{M^2}{4\beta^2\alpha}$$

Où :

$\beta$  : Coefficient sans dimension obtenu à partir de la fonction d'erreur.

$\alpha$  : la diffusivité thermique donner par :  $\frac{\lambda_{acier}}{\rho_{acier}c_{p\ acier}}$  et égal à  $1,06 \cdot 10^{-5}$



**Figure III.4 : évolution de  $\beta$**

La projection de la valeur  $(T_M - T_s) \frac{c_{ps}}{H_f \sqrt{\pi}} = 0.32$  sur la figure III.4 permet de déterminer que  $\beta$  égal à 0.48.

Alors  $t_{solidification} = \frac{M^2}{4\beta^2\alpha} = 4.70s$