



وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة باجي مختار عنابة

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULE

***EVALUATION DES PERTES ENERGETIQUES D'UN FOUR DE
TRAITEMENT THERMIQUE ET LEURS INFLUENCES SUR
L'ENVIRONNEMENT***

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUES

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : ENERGETIQUE ET ENVIRONNEMENT

DIRECTEUR DU MEMOIRE : PROF. MZAD

PRESENTE PAR : OTMANI ABDESSALAM

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : PROF. MZAD

EXAMINATEURS :

Noms et pr énom s	Grade
F.MECHIGHEL	MCA
R.ADJABI	MCA
A.HAOUAM	MCA

*« On fait la science avec des faits, comme on fait une maison avec
des pierres »*

Henri Poincaré

*« Je ne connais pas de livre achevé je ne connais que les livres
interrompus »*

Paul-Ambroise Valéry

Remerciements

Pour tous ses biens faits je dis merci à dieu, qui par sa gr âce infinie et ses merveilles m'a permis d'arriver à terme de mes études.

J'adresse mes sincères remerciements à mon directeur de m émoire, le professeur Mzad, pour sa qualité d'encadrement et d'enseignement, pour sa patience et surtout pour ses judicieux conseils, qui ont contribu é à am éliorer ma r éflexion.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Mounir Sahour, Sofiane Bordjiba et Mr Chaiberasou. Je les remercie de m'avoir orienté, aidé, conseillé et encadré au niveau d'ArcelorMittal pipe et tube Alg érie, je tiens aussi à remercier le directeur des op érations, Mr. Djimili, au nom de l'université pour son aimable collaboration. Je le remercie également pour son accueil chaleureux et pour les prolongations qui m'a été accord é pour achever ce projet.

Je remercie mes tr ès chers parents, Hocine et Nadia, qui ont toujours é té là pour moi, je les remercie pour leur soutien moral et financier. « Vous avez tout sacrifié pour vos enfants, n'épargnant ni santé ni efforts. Vous m'avez donné un magnifique mod èle de labeur et de persévérance. Je suis redevable d'une éducation dont je suis fier ». Je remercie aussi mon frère Salah, et mes sœurs Hana et Insaf pour leur encouragement.

Je tiens, aussi à exprimer ma gratitude à toute l'équipe administrative du département de génie m écanique, en particulier, Djalel et Mr Kallouche.

Enfin, je remercie tous mes Amis que j'aime, pour leur sinc ère amiti é et confiance, et à qui je dois ma reconnaissance et mon attachement.

ملخص:

نسعى من خلال هذه الدراسة الى تحديد كمية الدخان التي تعادل الطاقة المفقودة من قبل فرن المعالجة الحرارية، الذي قمنا بدراسته خلال فترة التربص العملي التي دامت ثلاثة أشهر في المؤسسة الوطنية للحديد و الصلب. و لتحقيق الهدف الذي نسعى اليه يتوجب علينا أولا تحديد كمية الطاقة المفقودة عبر فتحات الفرن و جدرانه. بعد تحديد الكمية الاجمالية للطاقة المفقودة يمكننا ايجاد حجم الدخان و كتلة ثنائي الكربون الموافقة لها، و في الأخير سنقوم باقتراح بعض الحلول للمؤسسة الوطنية للحديد و الصلب كي تتمكن من تقليل كمية الطاقة الضائعة و الاستفادة منها.

Abstract

This study sought to determine the amount of smoke equivalent to the energy lost by a heat treatment furnace, which we analyzed and studied during a three-month practical training at ArcelorMittal Pipe and Tube Algeria. To achieve our goal we will have to evaluate the energy loss through the openings and the oven walls, after determining the total amount of energy lost one can calculate the gas volume and the mass of carbon equivalent to that energy, and finally we will propose the company a few possible solutions to minimize, used and recovered the lost energy.

R ésum é

Dans cette étude on cherche à déterminer la quantité des fumées équivalente à l'énergie perdue par un four de traitement thermique, qu'on a analysé et étudié durant un stage pratique de trois mois au sein d'ArcelorMittal Pipe et Tube Algérie. Pour atteindre notre objectif on va devoir évaluer les pertes énergétiques à travers les ouvertures et les parois du four, après détermination de la quantité d'énergie totale perdue, on peut calculer le volume des fumées et la masse du carbone équivalente à cette énergie, et enfin on va proposer à l'entreprise quelques solutions possibles pour minimiser, utiliser et récupérer l'énergie perdue.

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : Généralités sur les traitements thermiques et simulation du coup de Bélier

II.1. Historique et Introduction	1
II.2. Le traitement thermique d'un matériau	2
II.2.1. Traitements superficiels (amélioration des propriétés superficielles)	2
II.2.2. Traitements dans la masse (amélioration des propriétés de masse)	3
II.3. Le traitement thermique d'un métal	3
II.3.1. Généralités	4
II.4. Le traitement thermique des aciers par trempe et détente (revenu).....	5
II.4.1. Qu'est-ce que la trempe et la détente ?	5
II.4.1.1. La trempe	5
II.4.1.2. Le revenu (détente)	6
II.4.2. Comment la trempe se produit-elle ?	6
II.4.3. La théorie derrière la trempe	7
II.4.4. Les aciers appropriés à la trempe	11
II.4.5. Les différents procédés de trempe	11
II.4.6. Les différents procédés de revenu	11
II.5. Simulation du coup de bélier dans un tube sans soudure	12
II.5.1. Résolution du problème de l'écoulement d'un fluide (eau) dans une conduite	12
II.5.2. Schématisation des résultats lorsque la vitesse du fluide est : 0.1m/s	14
II.5.3. Schématisation des résultats lorsque la vitesse du fluide est : 0.9m/s.....	17
II.6. Conclusions	20

Sommaire

Chapitre II : Généralités sur le four de trempe et simulation de la température d'un tube

III.1. Introduction	21
III.2. Données de base du four de trempe	22
III.2.1. Dimensions des produits à traiter	22
III.2.2. Qualité des aciers	23
III.2.3. Températures	24
III.2.3. Combustible utilisé	25
III.2.4. Capacités de production	26
III.2.5. Consommation	27
III.2.6. Dimensions du four	27
III.3. Fonctionnement du four de trempe	27
III.4. Construction du four de trempe	27
III.4.1. Construction métallique	29
III.4.2. Réfractaires et isolants	29
III.4.3. Installation générale	30
III.4.4. Equipement de chauffage	30
III.4.4.1. Les brûleurs	31
III.4.4.2. L'alimentation en gaz	31
III.4.4.3. L'alimentation en air	31
III.4.4.4. Circuit des fumées	31
III.5. La régulation automatique du four de trempe	32
III.5.1. Régulation de la pression	32
III.5.2. Régulation de la température	32
III.6. Simulation de la température d'un tube dans le four de trempe	33
III.6.1. Présentation générale de SAFIR	33
III.6.2. Les différents modèles de l'action thermique utilisé par SAFIR	33
III.6.2.1. Les courbes nominales	34

Sommaire

<i>III.6.2.2. Courbes paramétriques</i>	34
<i>III.6.2.2. Modèles CFD</i>	35
<i>III.6.3. Exécution du programme</i>	35
III.7. Conclusions	39

Chapitre III : Thermique des fours industriels

IV.1. Introduction	40
IV.2. Classification des fours industriels	40
<i>IV.2.3. Fours à haute et fours à basse température.</i>	40
IV.3. Isolation des fours industriels	41
<i>IV.3.1. Conception générale</i>	41
<i>IV.3.2. Matériaux réfractaires</i>	42
<i>IV.3.3. Physique des matériaux réfractaires</i>	42
<i>IV.3.4. Chimie des matériaux réfractaires.</i>	43
<i>IV.3.5. Interactions entre les réfractaires et le four.</i>	43
<i>IV.3.6. Dimensionnement des parois réfractaires.</i>	43
<i>IV.3.7. Effet d'une source de chaleur sur la matière</i>	45
IV.4. Transfert de chaleur dans les fours industriels	45
<i>IV.4.1. Fours à haute température</i>	46
<i>IV.4.2. Fours à basse température</i>	47
IV.5. Calcul thermique des fours	48
<i>IV.5.1. Bilans énergétiques</i>	48
<i>IV.5.2. Rendement énergétique</i>	49
<i>IV.5.3. Détermination des pertes par les parois</i>	49
IV.6. Pollutions et environnement	51
<i>IV.6.1. Polluants</i>	51
<i>IV.6.2. Réglementation</i>	52
IV.7. Conclusion	53

Sommaire

Chapitre IV : Evaluation des pertes énergétiques du four et simulation de la conduction

V.1. Introduction	54
V.2. Rendement éner gétique du four de trempe	55
V.2.1. Calcul de l'énergie fournie par le combustible	55
V.2.2. Calcul de l'énergie utile	57
V.2.2. Calcul du rendement éner gétique	58
V.3. Les pertes par les ouvertures du four Q_{rh}	58
V.3.1. Les pertes par les ouvertures dans les deux fa çades frontales	60
V.3.2. Les perte par les ouvertures dans les deux fa çades lat érales Q_{HL}	66
V.4. Détermination des pertes par les parois Q_K	70
V.4.2. Simulation de la conduction dans une paroi du four	70
V.4.2. Détermination des pertes par les murs Q_{Km}	75
V.4.3. Détermination des pertes par la sole Q_{KS}	78
V.4.4. Détermination des pertes par la voute Q_{KV}	80
V.5. Calcul de la chaleur perdue par les fum ées Q_f	82
V.6. Analyse et discussion des r ésultats	85
V.7. Conclusions	87

Chapitre V : Influence des pertes énergétiques sur l'environnement

VI.1. Introduction	88
VI.2. Le gaspillage éner gétique	88
VI.3. Calcul du volume des fumées équivalent a l'énergie perdue	89
VI.3.1. La combustion et les combustibles	89
VI.3.1.1. Produits de la combustion	90
VI.3.1.2. Quantit éd'air nécessaire pour la combustion	91
VI.3.1.3. Le pouvoir calorifique d'un combustible.....	93
VI.3.2. Calcul du volume des fumées	95

Sommaire

VI.4. L'influence des polluants contenue dans les fumées	97
VI.4.1. L'influence des polluants sur la santé humaine	97
VI.4.2. L'influence des polluants sur l'environnement	100
VI.5. L'influence des pertes d'énergie sur l'économie	103
VI.6. Solutions proposées	103
VI.6.1. Solution pour minimiser les pertes	103
VI.6.2. Utilisation des pertes pour le chauffage des bureaux administratifs	105
VI.6.3. Utilisation de l'énergie des fumées pour le préchauffage de l'air de combustion ..	106
VI.6.3.1. Récupérateurs continus	106
VI.6.3.2. Récupérateurs régénératifs	107
VI.6.3.3. Brûleurs auto-récupérateurs	107
VI.6.3.4. Construction des récupérateurs	709
VI.7. Conclusions	110
 Chapitre VI : Conclusions générales.....	 111

Liste des figures

Figure 1: Epée de chevalier en acier traité thermiquement.....	1
Figure 2: Organisation des atomes sous forme de cristaux dans les métaux	4
Figure 3: Solution solide de substitution (haut) et d'insertion (bas) dans un cristal	4
Figure 4: Présentation d'une structure cubique à corps centré (CCC).....	7
Figure 5: Présentation d'une structure cubique à faces centrées (CFC)	7
Figure 6: Diagramme d'équilibre fer-carbone	9
Figure 7: Présentation récapitulatif du traitement thermique par trempe et détrempé	10
Figure 8: Représentation graphique de la problématique.....	12
Figure 9: Représentation graphique du changement brutale de la pression.....	14
Figure 10: Représentation graphique du changement brutale de la vitesse	15
Figure 11: Représentation graphique du changement brutale de la contrainte	16
Figure 12: Représentation graphique du changement brutale de la pression	17
Figure 13: Représentation graphique du changement brutale de la vitesse	18
Figure 14: Représentation graphique du changement brutale de la contrainte	19
Figure 15 : Le four de trempe de la Tuberie Sans Soudure	21
Figure 16 : Températures de traitement thermique pour différents aciers au carbone.....	27
Figure 17 : La table de classement des tubes	27
Figure 18 : Ligne de rouleaux inclinés.....	27
Figure 19 : Coté enfournement du four.....	28
Figure 20: Table à longerons, fixes et mobiles en acier réfractaire moulé	28
Figure 21: Coté défournement du four de trempe	28
Figure 22: Influence du chauffage sur la taille des grains d'un acier	30
Figure 23: Bruleurs répartis le long de la façade latérale intérieure du four	31
Figure 24: Capteur de température (intérieur du four).....	32
Figure 25: Courbes d'action thermique nominales (hydrocarbures et ISO)	33

Liste des figures

Figure 26: Exemple de feux paramétriques	34
Figure 27 : Discrétisation de la section du tube et numérotation des nœuds	36
Figure 28 : Discrétisation de la section en éléments finis et numérotation des éléments	36
Figure 29: Description du matériau utilisé (acier) et application de la charge thermique	37
Figure 30: Résultats des températures après 60 et 300 secondes.....	37
Figure 31: Températures après 420 et 3900 secondes.....	38
Figure 32: Courbe de température en fonction du temps, au nœud 1	38
Figure 33: Ventilateur de circulation de gaz dans un four	48
Figure 34: Évolution des températures dans une paroi composite à trois couches d'isolants	50
Figure 35: Coefficient d'échange d'une paroi de four avec le milieu extérieur	50
Figure 36 : Four de trempe à longerons mobiles -coupe en plan-.....	56
Figure 37 : Part relative du transfert par convection et rayonnement en fonction de la température.....	58
Figure 38 : Représentation deux façades frontales du four de trempe	60
Figure 39 : Représentation de la température de chaque zone du four de trempe	61
Figure 40 : La porte vue en plan L=520 mm	62
Figure 41 : Coupe transversale de La porte l = 300 mm.....	62
Figure 42: La porte d'enfournement du four de trempe de la tuberie sans soudure	62
Figure 43 : L'épaisseur des portes en millimètre	63
Figure 44 : Ouverture d'éjecteur et arbre de rouleau	66
Figure 45 : Regard butoir	66
Figure 46: façades latérales coté enfournement	66
Figure 47: façades latérales coté défournement	66
Figure 48 : Dimensionnement de la paroi considérée (mur du four)	71
Figure 49 : Paroi du four après dimensionnement	72
Figure 50 : Application du flux de chaleur sur la surface intérieure.....	72

Liste des figures

Figure 51 : Paroi soumise au flux de chaleur (flèches vertes)	73
Figure 52 : Discrétisation de la paroi en éléments finies	73
Figure 53 : Paroi avant l'application du flux de chaleur et après une durée d'exposition.....	74
Figure 54 : Propagation de la chaleur à travers l'épaisseur de la paroi.....	74
Figure 55 : Représentation de l'épaisseur et la composition des murs du four de trempe.....	75
Figure 56 : La façade frontale, coté enfournement du four de trempe.....	76
Figure 57 : Représentation de l'épaisseur et la composition de la sole du four de trempe	78
Figure 58 : Représentation de l'épaisseur et la composition de la voûte du four de trempe...	80
Figure 59 : Porte de visite mal conçue	84
Figure 60 : Représentation graphique des pertes énergétiques et leur source	85
Figure 61 : Evolution du contenu des fumées avec l'excès d'air	92
Figure 62 : Diagramme d'Ostwald-Biard méthane pur et gaz naturel (fumées sèches)	93
Figure 63 : Des inondations ont ravagé plusieurs régions en Inde	100
Figure 64 : Principe de fonctionnement de l'effet de serre	101
Figure 65 : Emissions, transformation et dépôts de polluants	102
Figure 66 : Porte coulissante / automatique	103
Figure 67 : Principe de fonctionnement de la porte automatique suggérée.....	104
Figure 68 : Principe de l'utilisation des pertes pour le chauffage.....	105
Figure 69 : Exemple de récupérateur continu dit à rayonnement	106
Figure 70 : Exemples de récupérateurs régénératifs (Cowper).....	107
Figure 71 : Brûleur à tube radiant avec récupérateur incorporé.....	108
Figure 72 : Brûleur avec récupérateur régénératif incorporé	108
Figure 73 : Tube avec ailettes	109
Figure 74 : Tubes avec picots.....	109

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les principaux traitements thermique dans la masse.....	3
Tableau 2 : Dimensions des produits à traiter.....	22
Tableau 3 : Aciers et variation de la teneur en carbone selon l'usage	23
Tableau 4 : Température de chauffage pour le durcissement de différents aciers.....	24
Tableau 5 : Les capacités de production du four de trempe.....	26
Tableau 6 : Résistance pyroscopique des matériaux.....	43
Tableau 7 : Calcul de l'énergie fournie par le combustible	57
Tableau 8 : Calcul de l'énergie perdu par convection à travers les ouvertures des deux façades frontales.....	64
Tableau 9 : Quantité d'énergie totale perdue par convection à travers les ouvertures des deux façades frontales.....	64
Tableau 10 : Récapitulation des résultats concernant les ouvertures des deux façades frontales et calcul de l'énergie perdu par convection à travers ces ouvertures.	65
Tableau 11 : Quantité d'énergie totale perdue par rayonnement à travers les ouvertures des deux façades frontales	65
Tableau 12 : Récapitulation des résultats concernant les ouvertures des deux façades latérale et calcul de l'énergie perdu par convection à travers ces ouvertures	68
Tableau 13 : Quantité d'énergie totale perdue par convection à travers les ouvertures des deux façades latérale	68

Liste des tableaux

Tableau 14 : R écapitulation des r ésultats concernant les ouvertures des deux fa çades lat érale et calcule de l'énergie perdu par rayonnement à travers ces ouvertures	69
Tableau 15 : Quantité d'énergie totale perdue par rayonnement à travers les ouvertures des deux fa çades lat érales	69
Tableau 16 : R écapitulation des r ésultats concernant les murs du four	77
Tableau 17 : Quantités d'énergie totale perdue par les murs du four	78
Tableau 18 : R écapitulation des r ésultats concernant la sole du four de trempe	79
Tableau 19 : Quantité d'énergie perdue par la sole du four.....	80
Tableau 20 : R écapitulation des r ésultats concernant la voute du four de trempe.....	81
Tableau 21 : Quantité d'énergie perdue par la voute du four	82
Tableau 22 : Quantité d'énergie perdue par les fumées	83
Tableau 23 : Récapitulation des résultats et détermination de l'énergie totale perdue par le four de trempe	84
Tableau 24 : Composition g énérique de quelques combustibles	89
Tableau 25 : Production de CO ₂ lors de la combustion	90
Tableau 26 : Production de H ₂ O lors de la combustion.....	91
Tableau 27 : Pouvoirs calorifique de quelques combustibles	94
Tableau 28 : Volume total des fum ées	96
Tableau 29 : Effets à court terme de quelques polluants sur la sant éhumaine	98
Tableau 30 : Effets à long terme de quelques polluants sur la sant éhumaine	99

Nomenclature

<i>Symbole</i>	<i>Description</i>	<i>unit é</i>
<i>Q</i>	Chaleur évacu ée	<i>J</i>
<i>m</i>	Masse du corps	<i>kg</i>
<i>c_p</i>	Chaleur sp écifique à pression constante	<i>J/kg K</i>
<i>DT</i>	Diff érence de temp ération	<i>K</i>
<i>Q_s</i>	puissance émise sur l'ensemble des longueurs d'onde par unit é de surface	<i>W</i>
<i>T</i>	temp ération	<i>K</i>
<i>σ</i>	constante de Stefan-Boltzmann	<i>W/m²K⁴</i>
<i>S</i>	surface de la charge offerte au rayonnement du four	<i>m²</i>
<i>a</i>	coefficient d'absorption	-
<i>Pr</i>	nombre de Prant	-
<i>Re</i>	nombre de Reynolds	-
<i>Q_u</i>	énergie utile	<i>Cal</i>
<i>Q_p</i>	énergie fournir	<i>Cal</i>
<i>η</i>	Rendement énerg étique	<i>%</i>
<i>Q_p</i>	énergie perdue	<i>Cal</i>
<i>K</i>	Coefficient d'échange globale	<i>W/m² K</i>
<i>K_e</i>	Coefficient d'échange de la paroi externe avec l'ambiance	<i>W/m² K</i>
<i>D</i>	d ébit horaire	<i>Nm³/h</i>
<i>φ</i>	flux thermique	<i>W</i>
<i>l</i>	Longueur	<i>m</i>
<i>L</i>	largeur	<i>m</i>
<i>h</i>	Coefficient de convection	<i>W/m²K</i>
<i>λ</i>	Conductivité thermique	<i>W/m K</i>
<i>e</i>	épaisseur	<i>m</i>
<i>V_{mf}</i>	Volume moyen des fum ées	<i>m³</i>
<i>C_f</i>	Chaleur sp écifique des fum ées	<i>kcal/m³ K</i>
<i>PCI</i>	pouvoir calorifique inf érieur	<i>kcal/Nm³</i>

Nm³ : m ère cube normalis é

1.1. Historique et Introduction :

Les techniques de fabrication se sont perfectionnées au Ve siècle, à partir de l'époque mérovingienne où se sont développées les épées damassées par soudure (fig.1). Les traitements thermiques deviennent plus reproductibles et l'on voit apparaître la cémentation, la carbonituration et même la nitruration des tranchants rapportés par soudure, cémentés, trempés et nitrurés. Avec une structure martensitique, la dureté peut atteindre 610 Vickers.



Figure 1: Epée de chevalier en acier traité thermiquement, dans le courant du XIV^{ème} siècle

Les techniques métallurgiques n'évoluent alors plus guère jusqu'au XVIII^e siècle et restent surtout fondées sur l'expérience et le sens de l'observation : elles restent toujours très mystérieuses. Les forgerons ne réussissent alors leurs fabrications que grâce à des tours de main acquis par la pratique et qui les font comparer alors tantôt à des dieux, tantôt à des démons, et à cette époque les épées des héros portent toutes un nom. C'est au début du XVIII^e siècle que Réaumur entreprit d'importantes recherches sur les traitements thermiques des aciers et des fontes [1] : trempe, revenu, cémentation, nitruration des aciers et recuit des fontes blanches permettant l'obtention de fonte malléable à cœur blanc. C'est lui qui inaugura l'utilisation du microscope pour l'étude de la constitution des métaux, et fonda ainsi la métallographie. Cependant, il y a une centaine d'années, on ne maîtrisait pas encore convenablement les traitements thermiques des aciers, et l'on peut lire, dans un ouvrage de 1874 [2] : « Chaque fois que cela sera possible, on fera bien de donner aux pièces en acier la dureté désirée, par la teneur en carbone plutôt que par la trempe qui est un moyen irrégulier, brutal, dont il est difficile de prévoir l'énergie ». Ce n'est qu'à la fin du XIX^e siècle que commença à se développer, de façon approfondie et rationnelle, la connaissance des phénomènes métallurgiques à l'état solide, particulièrement en France avec les travaux

d'Osmond, Le Chatelier, Charpy, Guillet, Portevin, Chevenard et Guinier. Mais, si les traitements thermiques ont été appliqués aux aciers depuis longtemps, ils ne se sont développés, pour les fontes, que plus tard (obtention de la fonte malléable à cœur noir au début du XXe siècle), et ce n'est que plus récemment encore que l'on a développé les traitements thermiques des autres alliages. Des progrès considérables sur les propriétés des alliages modernes ont été obtenus par la mise au point des traitements thermiques de durcissement par précipitation, de conception beaucoup plus originale, qui se sont développés à partir de l'étude des duralumins, alliages d'aluminium conçus en Allemagne, à Düren (d'où leur nom), et étudiés depuis 1910 seulement. Néanmoins, ces traitements thermiques de durcissement par précipitation n'ont été compris et maîtrisés que beaucoup plus récemment, à partir de 1935, grâce en particulier aux études entreprises par Guinier au moyen d'appareils scientifiques sophistiqués. Les traitements thermiques se sont ensuite développés pour les aciers inoxydables et les alliages réfractaires, les alliages de magnésium, les alliages de cuivre et, depuis une vingtaine d'années seulement, pour les aciers à haute résistance du type maraging et les superalliages à base nickel ou cobalt.

1.2. Le traitement thermique d'un matériau :

Le traitement thermique d'un matériau est un groupe de procédés industriels utilisés pour modifier les propriétés physiques et parfois chimiques de ce dernier. Ce traitement est utilisé lors de la fabrication des matériaux comme le verre, le bois, les aliments et surtout les métaux.

Le traitement thermique implique l'utilisation du chauffage et / ou du refroidissement, normalement à des températures extrêmes, pour obtenir le résultat souhaité, tel que la modification de la friabilité, de la dureté, de la ductilité, de la fragilité, de la plasticité, de l'élasticité ou de la résistance mécanique des matériaux.

Les traitements thermiques peuvent être classés comme suit [3] :

1.2.1. Traitements superficiels (amélioration des propriétés superficielles) :

Les traitements superficiels sont classés en deux grandes familles :

- Le durcissement par trempe après chauffage superficiel ;
- Les traitements thermochimiques.

1.2.2. Traitements dans la masse (amélioration des propriétés de masse) :

Le traitement thermique dans la masse d'un matériau est un traitement thermique qui affecte tout ce matériau et non uniquement sa zone superficielle comme c'est le cas d'un traitement thermique superficiel. Les principaux traitements dans la masse sont (Tab.1) :

Traitement	Évolution de l'état d'équilibre thermodynamique	Procédé
Recuit	Évolution vers l'état d'équilibre le plus stable	Chauffage suivi d'un refroidissement lent
Trempe	Évolution vers un état hors d'équilibre, instable ou métastable	Refroidissement rapide
Revenu	Évolution à partir d'un état hors d'équilibre comportant des phases métastables, vers un état d'équilibre plus ou moins complet	Chauffage lent suivi d'un refroidissement lent

Tableau 1: Les principaux traitements thermique dans la masse

Le revenu succède généralement à une trempe et le stade ultime du revenu est l'état recuit [4]. Les traitements thermiques dans la masse peuvent être réalisés soit sous atmosphère, soit sous pression partielle [5].

1.3. Le traitement thermique d'un métal :

Le traitement thermique d'une pièce de métal consiste à lui faire subir des transformations de structure grâce à des cycles prédéterminés de chauffage et de refroidissement afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques : dureté, ductilité, limite d'élasticité, ...

Ce procédé est souvent couplé avec l'emploi d'une atmosphère contrôlée lors de la mise en température de la pièce, soit pour éviter son oxydation, soit pour effectuer un apport ou changement moléculaire de surface (traitement de surface).

1.3.1. Généralités :

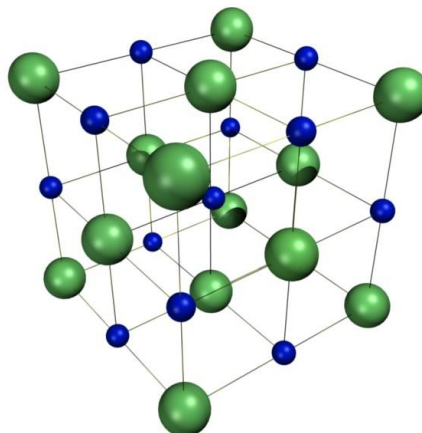
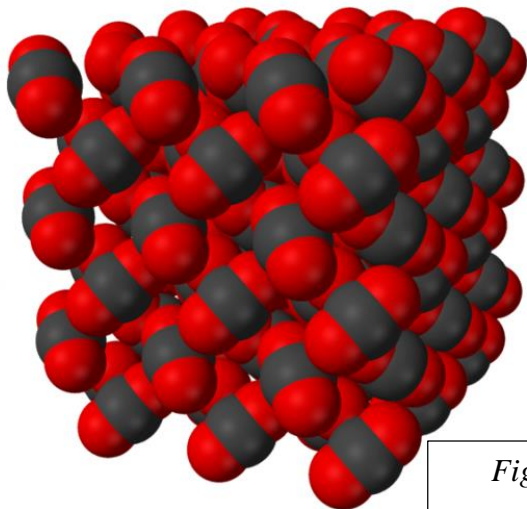


Figure 2: Organisation des atomes sous forme de cristaux dans les métaux

Dans les métaux, les atomes sont organisés sous la forme de cristaux (fig.2) : ils forment une structure ordonnée. Des atomes étrangers (impuretés, éléments d'alliage...) peuvent s'introduire dans ce réseau, soit en substitution des atomes de base, soit en insertion, c'est la notion de solution solide (fig.3).

Par ailleurs, il peut y avoir des cristaux de plusieurs types, comme des inclusions par exemple. Les cristaux minoritaires sont appelés «Précipités».

Avec l'élévation de la température, les atomes du cristal s'agitent autour de leur position et s'écartent les uns des autres, provoquant la dilatation. Cela a plusieurs conséquences :

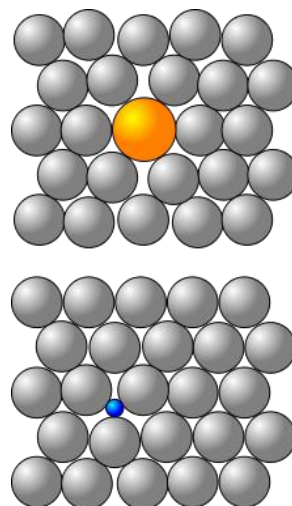


Figure 3: Solution solide de substitution (haut) et d'insertion (bas) dans un cristal.

L'espace entre les atomes augmente, ce qui permet d'accueillir plus d'atomes en solution d'insertion, et des atomes plus gros. Par conséquent, on peut avoir une dissolution des précipités : les atomes de ces cristaux passent en solution solide ; les atomes s'agitent, ils deviennent mobiles et peuvent se déplacer dans le cristal, phénomène appelé diffusion ; dans certains cas, les atomes du cristal se réorganisent en une autre phase cristallographique, on parle d'allotropie. Ce sont ces mécanismes qui entrent en jeu lors des traitements thermiques.

1.4. Le traitement thermique des aciers par trempe et détente (revenue): 1.4.1.

Qu'est-ce que la trempe et la détente ?

Lors de la nitruration, les alliages d'acier sont chauffés et ensuite refroidis à une telle vitesse que la dureté augmente considérablement. Dans la plupart des cas, la nitruration est suivie d'un nouvel échauffement, la détente (le revenu). Le processus porte le nom d'épuration lorsque l'on réalise une détente à température élevée après la trempe, afin d'obtenir par la suite une **dureté relativement basse** en combinaison avec **une solidité élevée**.

1.4.1.1. La trempe :

La trempe est une opération qui consiste à chauffer uniformément un acier à une température puis à le refroidir de façon rapide et continue. Le maintien en température doit être suffisamment prolongé pour que tous les carbures passent en solution, sans produire d'accroissement du grain de l'austénite. La vitesse de refroidissement doit être supérieure à un seuil appelé vitesse critique de trempe, marquant une discontinuité dans la loi d'abaissement du point de transformation au refroidissement, et au-delà de laquelle on obtient la suppression des structures d'équilibre de ferrite et de cémentite à basse température. Cette vitesse étant dépassée, on assiste à un rejet de ces deux constituants vers 350 °C et à l'apparition de la martensite, avec un accroissement très important de la dureté

Pour provoquer ce refroidissement rapide on utilise des fluides, dits fluides de trempe qui sont : les saumures, l'eau, les émulsions d'huiles solubles, les gaz, l'air, les sels fondus. En général, pendant le refroidissement, le fluide de trempe est agité pour obtenir un effet de refroidissement uniforme.

Mais, pour la plupart des utilisations, la martensite est trop dure, trop fragile, et soumise à des tensions internes. Par conséquent. Les aciers utilisés directement après trempe peuvent faire apparaître des déformations et comporter des tapures. Pour diminuer ces tensions, on procède à l'opération de revenu, qui permet de contrôler exactement les propriétés mécaniques de l'acier en réduisant dans une certaine mesure sa dureté et sa résistance à la traction, mais en augmentant sa ductilité c'est-à-dire son coefficient d'allongement et sa résilience.

1.4.1.2. Le revenu (d'âtremp)e :

Le revenu consiste à réchauffer une pièce trempée, à une température inférieure pendant un temps déterminé. La martensite se dissocie en un complexe de cémentite dispersée dans du fer alpha, pour former des globules microscopiques agglomérés. On obtient une structure sorbitique ou troostitique suivant les températures choisies. Si l'on prolonge le chauffage jusqu'à une température suffisante, on obtiendra finalement l'équilibre perlitique semblable à celui obtenu après le recuit d'adoucissement. Les facteurs influençant les résultats du revenu sont la température et le temps. Au-delà d'une heure, les transformations sont très lentes.

La vitesse de refroidissement n'a, en principe, pas d'importance, à l'exception d'un refroidissement trop brutal qui pourrait provoquer des tensions internes. Ce sont les fours à recyclage d'air qui permettent d'obtenir le chauffage le plus rationnel pour les opérations de revenu, mais on utilise également les bains d'huile et de sels.

1.4.2. Comment la trempe se produit-elle ?

Le processus de trempe de pièces peut être divisé en trois étapes techniques. Tout d'abord, la pièce est chauffée de sorte que la structure de départ se transforme en la structure austénite. Cette température d'austénisation dépend de la matière utilisée (750 °C - 1210 °C). Ensuite, la pièce est conservée à cette température de manière à ce que les éléments d'alliage puissent être absorbés de façon homogène dans cette structure austénite. La dernière étape consiste en le refroidissement de la pièce avec une telle vitesse de refroidissement qu'une structure que l'on appelle martensitique s'établit.

Le réchauffement et la conservation à température doivent être effectués dans une atmosphère protégée ; afin de protéger la matière contre l'oxydation et la décarburation. Le refroidissement peut être effectué dans différents milieux. Les milieux les plus courants sont : de l'eau, de l'eau avec une solution salée, des huiles de trempe, des polymères, un bain d'eau salée, de l'azote ou de l'argon.

L'acier se caractérise par une fragilité relativement élevée après la trempe, de sorte qu'il ne soit pas utilisable dans cet état. Il est donc nécessaire de procéder à la d'âtremp)e au moins une fois, voire plusieurs fois, après la trempe. La d'âtremp)e est un traitement de brûlage à des températures inférieures, ce qui soulage les tensions internes les plus importantes survenues

lors de la trempe. Ce processus entraîne une diminution de la dureté dans la plupart des cas, mais simultanément une augmentation de la solidité

1.4.3. La théorie derrière la trempe [17]:

L'acier se trouvant dans l'état non trempé a une structure cubique à corps centré (CCC), dans laquelle la dissolution de carbone est très limitée.

Fe(a) : Réseau cubique centré (CCC) (fig.4) . 1 atome de fer sur chaque sommet du cube (en vert) + 1 atome au centre du cube (en rouge). Cet atome central est primordial car il interdit toute inclusion d'éléments étrangers dans cette structure. (Les atomes de carbone ne peuvent pas entrer à l'intérieur de ce réseau cubique).

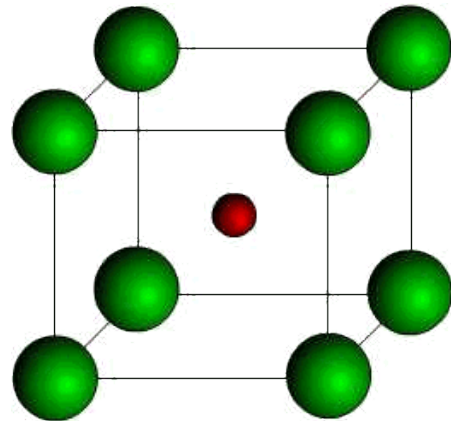


Figure 4: Présentation d'une structure cubique à corps centré (CCC)

Fe(g) : Cristaux cubiques à faces centrées (fig.5). 1 atome de fer sur chaque sommet du cube (en mauve) + 1 atome au centre de chaque face du cube (en vert), soit un total de 14 atomes par cube. Les cristaux de Fe(g) sont creux et peuvent donc absorber les atomes de carbone.

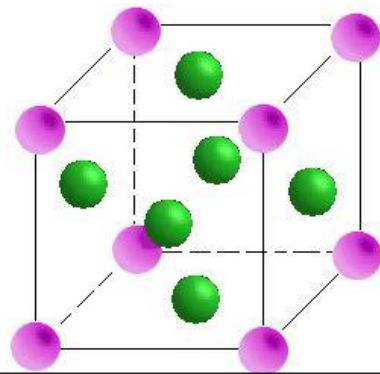


Figure 5: Présentation d'une structure cubique à faces centrées (CFC)

La trempe est le procédé de base du durcissement de l'acier par traitement thermique. L'acier est en effet, un alliage dont les divers structures cristallines sont particulièrement complexes. Néanmoins pour comprendre le phénomène de trempe nous devons visualiser les diverses structures cristallines que peut prendre l'acier. Prenons par exemple le carbone "C" : cet élément peut prendre 3 structures cristallines différentes : Le graphite (système cristallin hexagonal), le diamant (système cristallin cubique) et le lonsdaleite (allotrope hexagonal du

diamant). Pour l'acier il en va de même surtout par la multiplication des possibilités de cristallisation avec la gamme variée des aciers alliés. Pour simplification nous allons considérer le cas d'un acier non-allié c'est à dire un alliage fer-carbone . Il y a divers aciers :

- Aciers hypoeutectoides possédant de 0.008% à 0.8% de C, composé de Ferrite + Perlite , qui sont les plus mous .
- Aciers Eutectoides possédant 0.8% de C
- Aciers hypereutectoides possédant de 0.8% à 2.11% de C, composé de Perlite + Cémentite, et qui sont les plus durs.

Le fer, constituant majeur de l'acier, possède deux mailles cristallines différentes : la "Ferrite" $Fe(a)$ et l'"Austénite" $Fe(g)$. Ce qui les différencie est l'arrangement spatial des atomes de fer. La variété allotropique $Fe(a)$ est constitué selon un réseau cubique centré ; c'est à dire que les atomes de fer occupent les sommets d'un cube + 1 situé au centre du cube : soit au total 9 atomes par cristal. En chauffant l'acier, le réseau Ferrite [$Fe(a)$] se transforme en Austénite [$Fe(g)$] ; L'austénite possède une structure cristalline différente ; Le $Fe(g)$ produit des cristaux cubiques à faces centrées, c'est à dire qu'il y a un atome de fer pour chaque sommet du cube + 1 atome au centre de chaque face du cube c'est à dire un total de 14 atomes par cristal. (**Fig.5**). L'austénite (g) ne possède pas d'atome de fer au centre du cube contrairement à la ferrite (a). Ceci est très important car ce vide dans cette structure permet aux atomes de carbone de migrer à l'intérieur du réseau cubique de l'austénite ($Fe(g)$) alors que ceci est impossible dans le cas de la ferrite ($Fe(a)$). Une des propriétés physicochimiques d'intérêt de l'austénite est sa facilité de dissoudre et d'absorber des atomes de carbone. La transformation de la ferrite en austénite se réalisera à une température dite "d'Austénitisation" supérieure à la ligne AC3-AC1 du diagramme fer-carbone (fig.6). Il faut maintenir l'acier au moins 30 min à température d'Austénitisation pour obtenir une transformation austénite complète.

- Lorsque la ferrite se transforme en austénite, les atomes de carbone vont se placer en solution solide dans la structure cristalline austénitique.
- Lorsque l'acier se refroidit lentement, l'austénite se transforme de nouveau en ferrite; par contre si ce refroidissement est **rapide** les atomes de carbone dissous à l'intérieur du réseau cubique de l'austénite n'auront pas le temps de migrer à l'extérieur de cette structure cubique formant une structure appelé "Martensite".

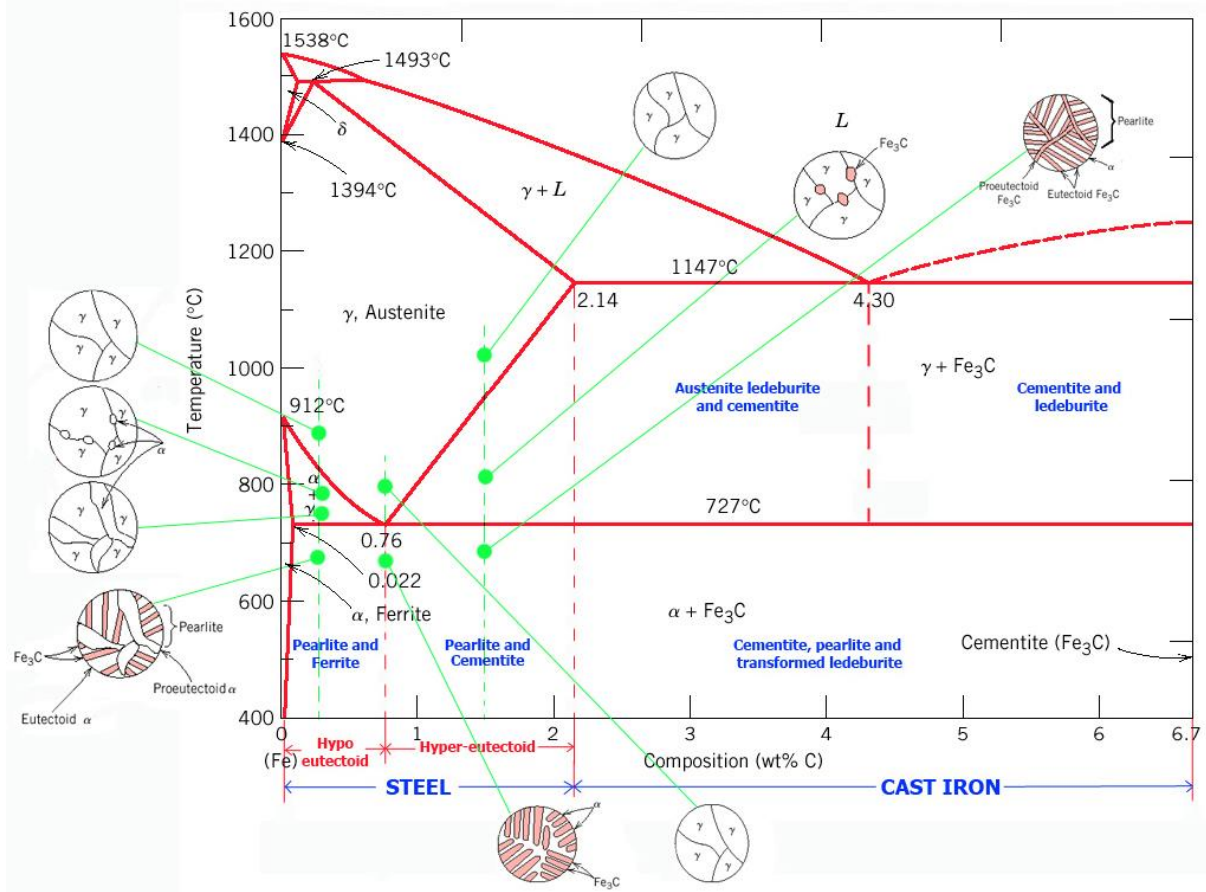


Figure 6: Diagramme d'équilibre fer-carbone

En conclusion la trempe est destinée à donner à l'acier une microstructure très dure appelée la "MARTENSITE". Au moment de la trempe, les atomes de carbone ne seront plus en mesure de rester dans la structure cubique centrée. Par conséquent, n'ayant pas le temps de diffuser dans la structure pour reformer de la ferrite, ils vont former de la "Martensite". La "Martensite" est en fait de la "Ferrite" dont la maille cristalline est déformée pour laisser de la place aux atomes de carbone qui sont en solution. (Dissous dans la structure cubique du fer).

En résumé : On se procure de l'acier dans une aciérie : Cet acier sera de structure "Ferrite". On chauffe cet acier à 950-1100 °C (selon l'acier) pendant 30 minutes minimum et en conséquence on transforme la structure "Ferrite" en structure "Austénite". On refroidit rapidement cette structure "Austénite" et on obtient de la "Martensite" une structure très dure. C'est la trempe martensitique.

FERRITE + Température élevée (950-1100 °C) =====> AUSTENITE

L'Austénite absorbe les atomes de carbone qui se nichent dans la structure cubique du fer (g).

AUSTENITE + Trempe adapté \Rightarrow MARTENSITE

AUTRES COMPOSANTS :

- La CEMENTITE : Molécule chimique stable (Fe_3C) composant principal des fontes. La cémentite est hyper dure mais très cassante.
- La PERLITE : Constituant biphasé de l'acier ; c'est un agrégat formé de 89% de ferrite et 11% de cémentite. Sa structure est généralement formée de lamelles alternées de cémentite et de ferrite.

Dans le processus de trempe on cherche, avant tout, obtenir de la martensite ; une trempe appropriée limite la formation de ferrite, perlite et cémentite. Il faut se rendre bien compte que

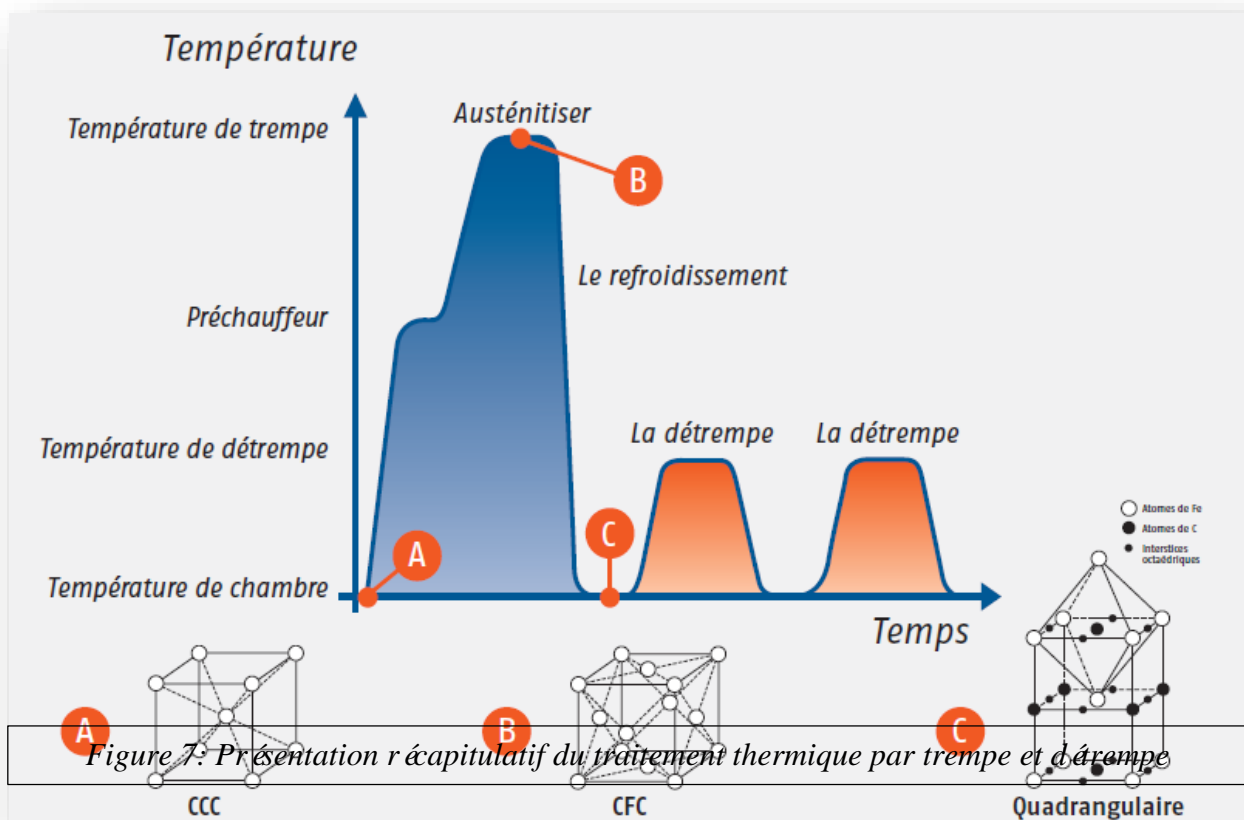


Figure 7: Présentation récapitulative du traitement thermique par trempe et détrempe

la dureté de la ferrite est de 10-15 HRC, celle de la perlite de 40-45 HRC alors que la dureté de la martensite est de 64-66 HRC (symbole normalisé pour la dureté Rockwell).

I.4.4. Les aciers appropriés à la trempe :

Les aciers appropriés à la trempe contiennent au minimum 0,3 % de carbone. Des exemples d'aciers qui sont appropriés à la trempe sont : l'acier à ressorts, l'acier pour travail à froid, l'acier de traitement, l'acier inoxydable, l'acier pour travail à chaud, l'acier d'outillage.

Bon nombre d'aciers fortement alliés et inoxydables et les alliages de fonte peuvent également être trempés.

1.4.5. Les différents procédés de trempe :

Les divers procédés de trempe permettent d'obtenir des résultats différents, en faisant varier la vitesse de refroidissement et la rapidité de la transition au point de transformation. C'est différents procédés de trempe sont valable pour :

- ✓ La trempe à l'eau
- ✓ La trempe à l'huile
- ✓ La trempe mixte
- ✓ La trempe à l'air

1.4.6. Les différents procédés de revenu :

Dans la plupart des procédés de revenu, on place la pièce froide dans un four, ou on l'immerge dans un bain qui est déjà porté à la température requise. Pour certains aciers, le changement brusque peut créer des contraintes internes, d'une part à cause du gradient de température de la surface au noyau, d'autre part par suite de la contraction de la martensite chauffée. Le changement peut être brutal, aussi les techniques de chauffage varient suivant les cas. Dans certains cas délicats, le bain et l'acier sont froids au départ et on les chauffe ensemble; on peut utiliser un four à air chaud à circulation forcée, dans lequel la chaleur émise par les résistances électriques est absorbée lentement et progressivement par l'acier, même si la température de revenu est très élevée. Si l'on choisit le procédé d'immersion dans un bain. Le choix du fluide est dicté par la température de revenu. Pour des températures inférieures à 280 °C environ, on utilise les huiles minérales. Pour des températures supérieures à 280 °C et s'échelonnant jusqu'à 650 C. on utilise les sels fondus, le plomb fondu, ou un four électrique à circulation d'air. Les bains de sels doivent toujours être employés à une température un peu supérieure à celle de leur point de fusion, car, lors de l'immersion de la pièce dans le liquide, il se produit un abaissement de température qui provoque un dépôt de sel cristallin sur la pièce, ce dépôt disparaissant dès que la pièce a pris la température du bain.

1.5. Simulation du coup de bêier dans un tube sans soudure :

Le coup de bélier est un phénomène de surpression qui apparaît au moment de la variation brusque de la vitesse d'un liquide, par suite d'une fermeture/ouverture rapide d'une vanne, d'un robinet ou du démarrage/arrêt d'une pompe, et en fait au niveau de la tuberie sans soudure le banc d'épreuve hydraulique fonctionne avec le même principe, son objectif est d'assurer que les tubes peuvent résister à des pressions très élevées (la pression de l'épreuve est exigée par le client).

Pour créer un programme en fortran qui peut simuler ce phénomène il faudra d'abord faire la résolution du problème de l'écoulement d'un fluide (eau) dans une conduite (en acier).

1.5.1. Résolution du problème de l'écoulement d'un fluide (eau) dans une conduite (en acier) :

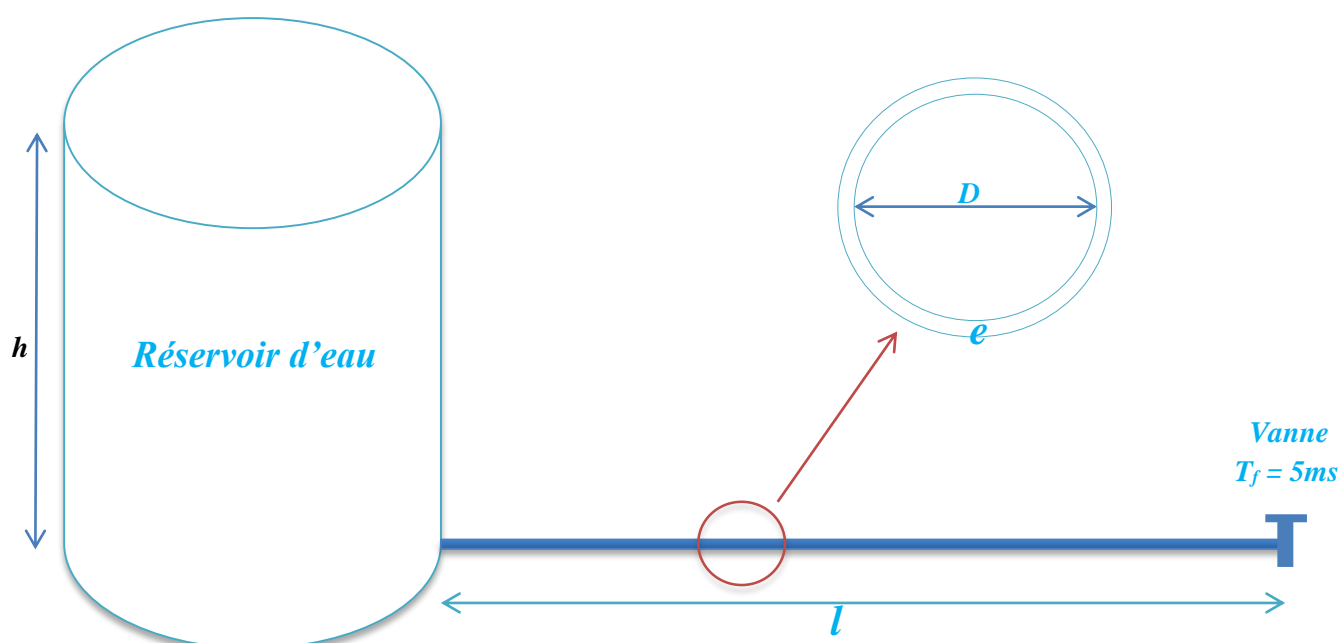


Figure 8: Représentation graphique de la problématique

Taux de fermeture de la vanne : 5 ms

Module d'élasticité de l'acier : 210000 N/mm², 2.1 E11 N/m².

L'étude passe par les étapes suivantes :

1. Mise en équation du problème physique

- L'équation de la conservation de la masse

- L'équation de la conservation de la quantité de mouvement
- L'équation du comportement mécanique
- L'équation du comportement thermodynamique

L'application de ces équations est basée sur les hypothèses suivantes :

- Écoulement unidimensionnel
- Le fluide est légèrement compressible
- La viscosité du fluide est constante
- L'évolution est supposée isotherme
- La conduite est cylindrique et droite (en matériau élastique)

2. Résolution du système final :

- Résolution analytique
- Résolution par méthode numérique (méthode des différences finies).

3. Obtention des résultats finaux.

On suivant les étapes précédentes on obtient les résultats suivants :

C^+

$$\rho a v_p - p_p = c p$$

$$c p = \rho a v_a - p_a + A a (t_p - t_a)$$

C^-

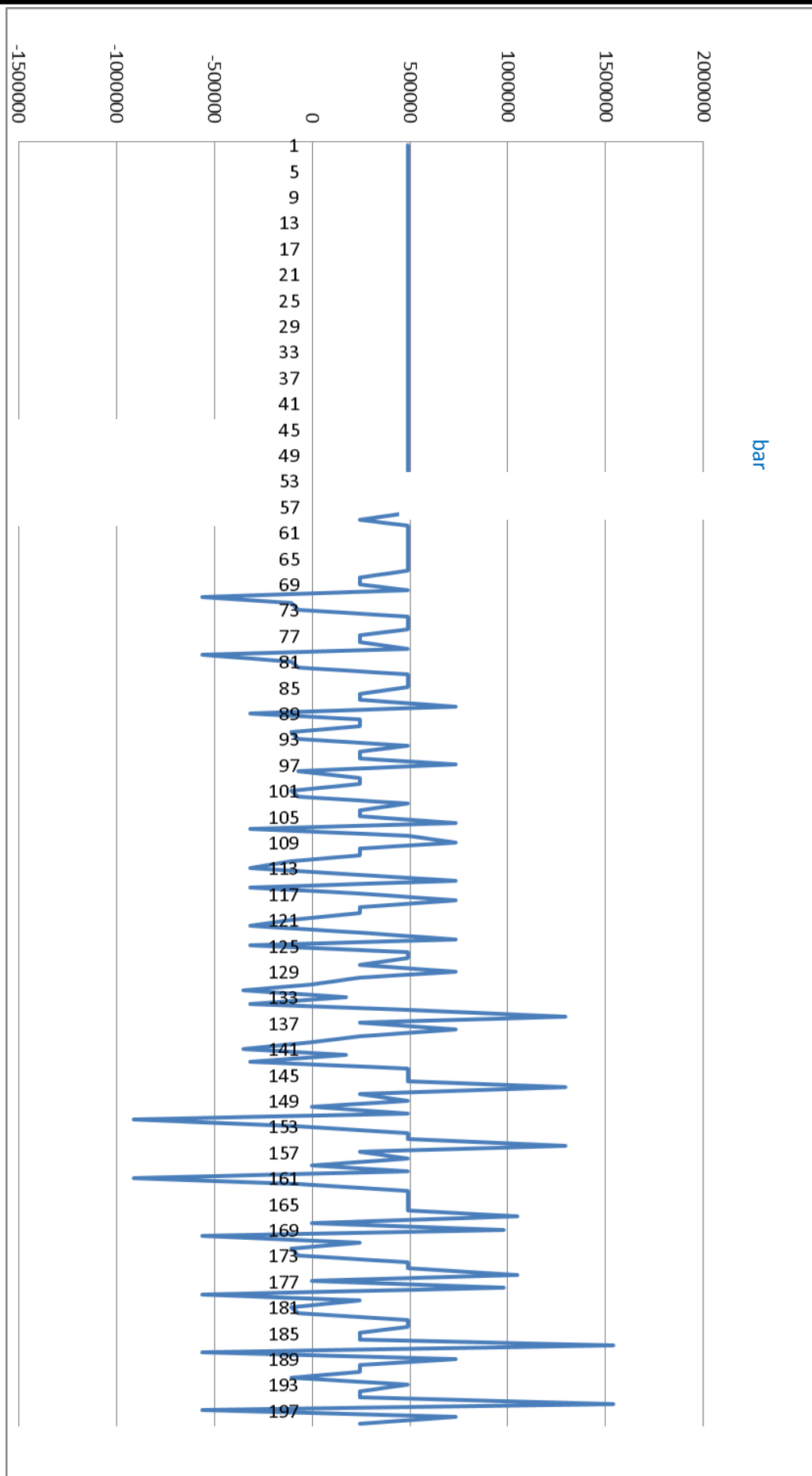
$$-\rho a v_p - p_p = C M$$

$$C M = -\rho a v_b - p_b + A a (t_p - t_b)$$

Grâce à ces équations on obtient les pressions, les vitesses et les contraintes aux différents points du système. Le programme qu'on a réalisé pour calculer ces paramètres est en annexe, il nous permet d'obtenir les résultats suivants :

1.5.2. Schématisation des résultats lorsque la vitesse du fluide est : 0.1m/s :

Figure 9: Représentation graphique du changement brutale de la pression dans la conduite



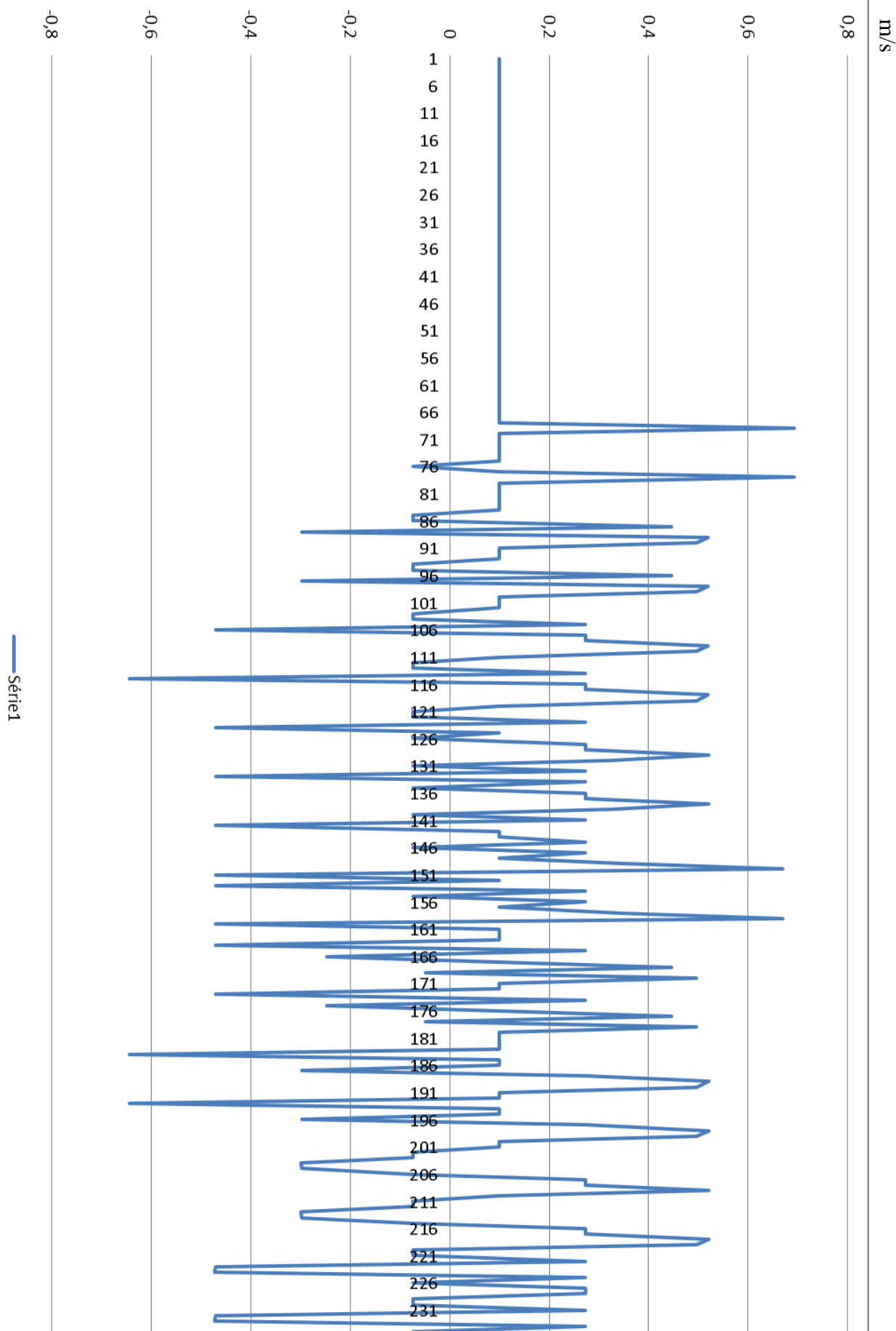


Figure 10: Représentation graphique du changement brutale de la vitesse

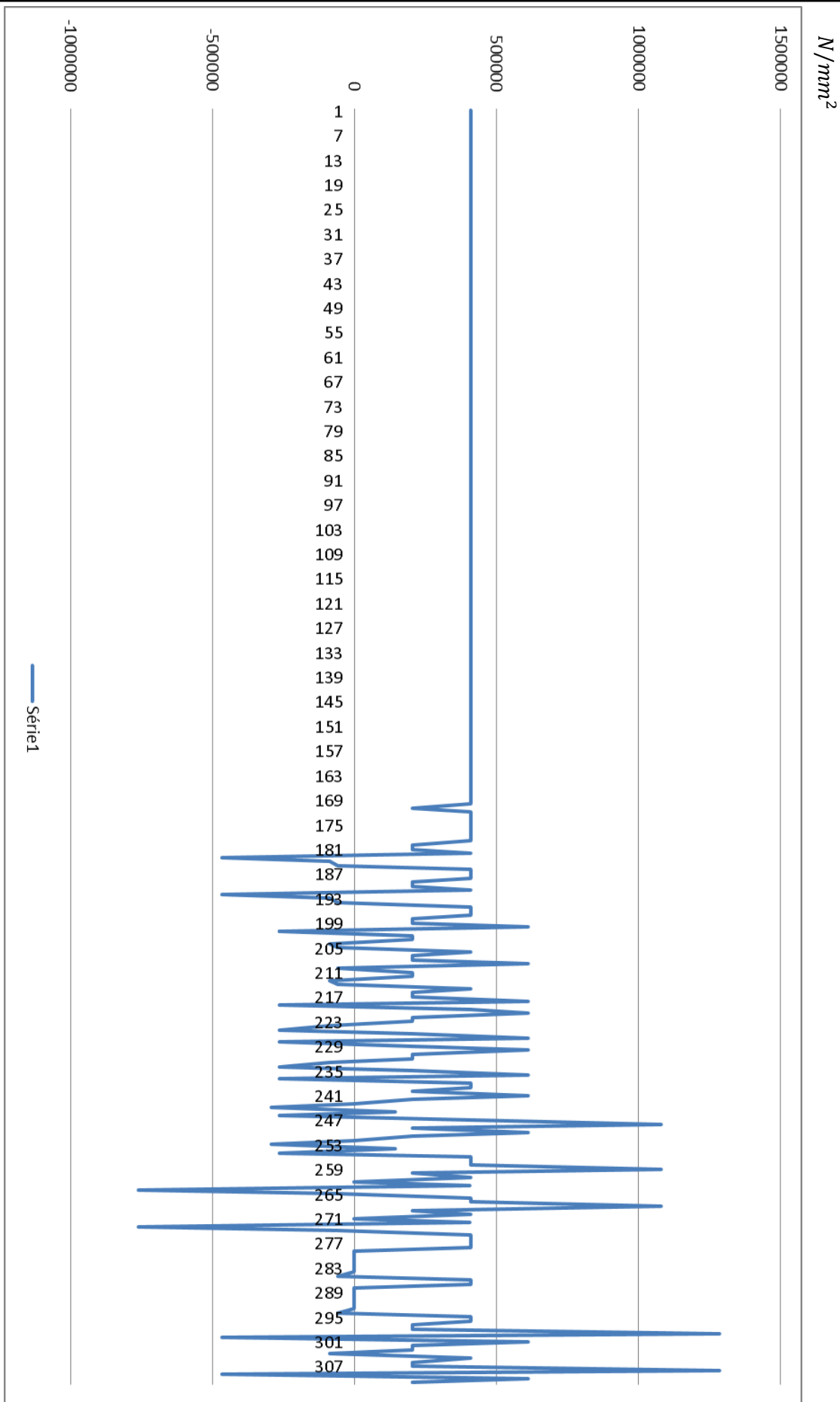


Figure I1 : Représentation graphique du changement brutale de la contrainte

I.5.3. Schématisation des résultats lorsque la vitesse du fluide est : 0.9m/s:

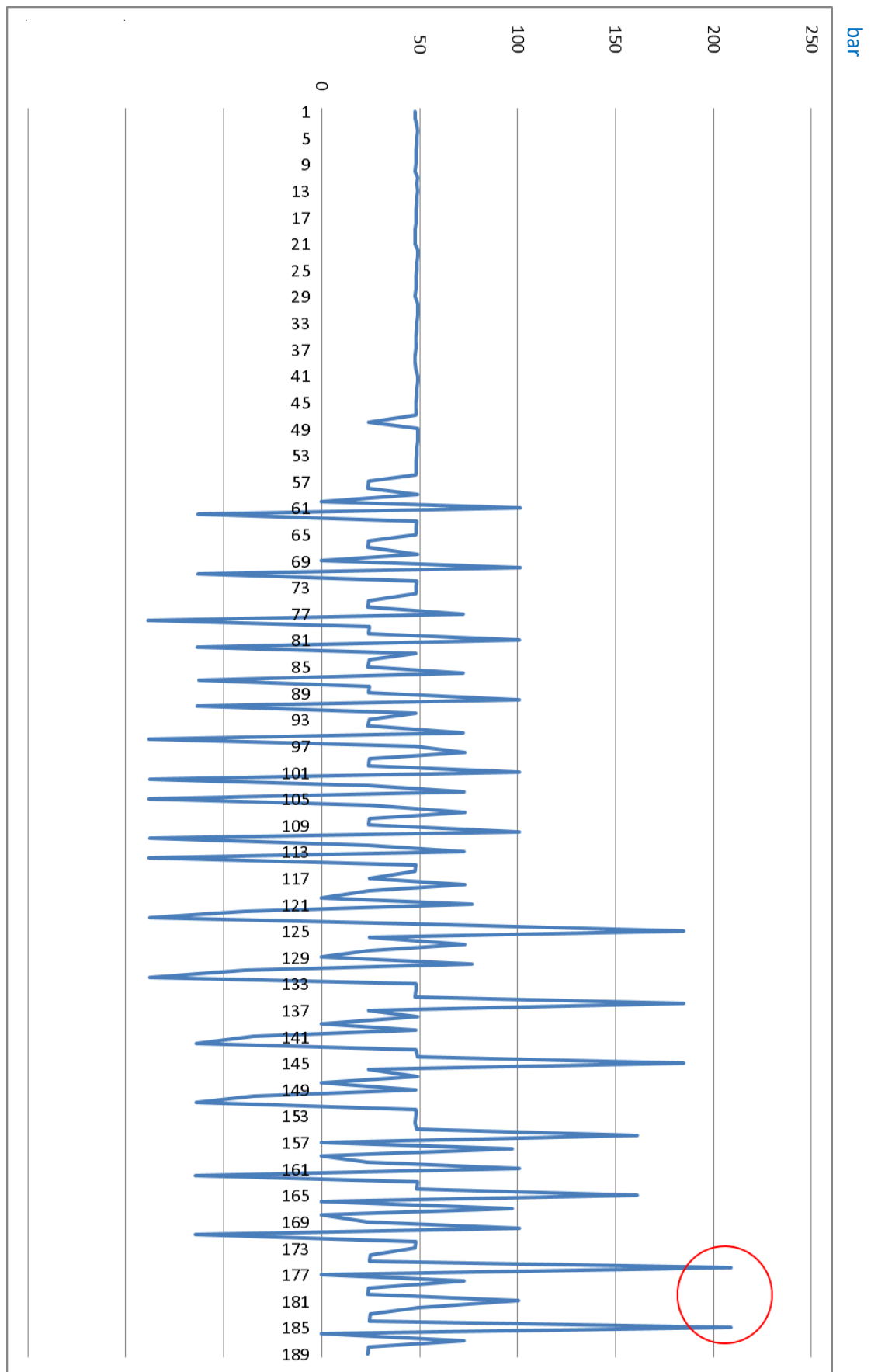
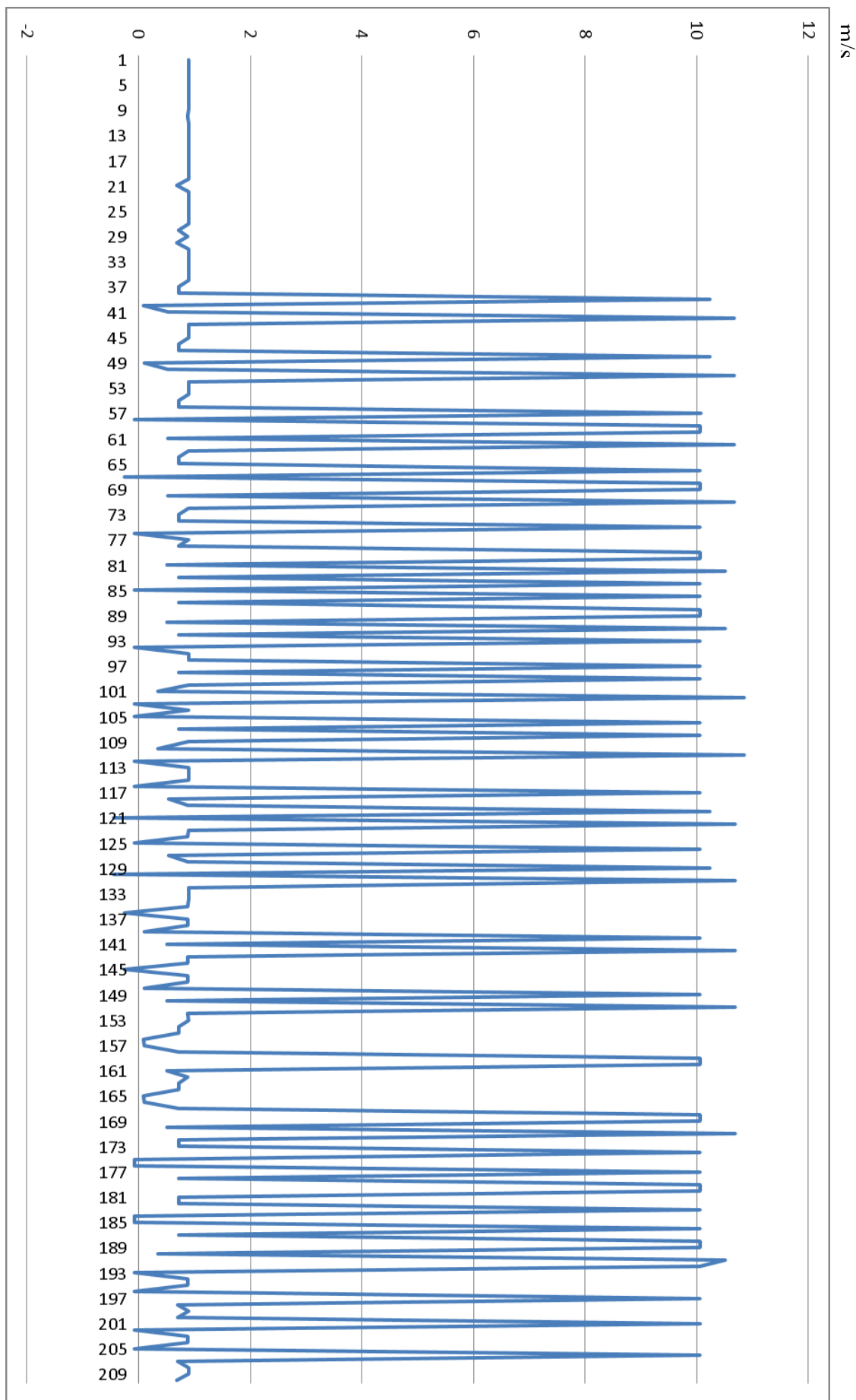


Figure 12: Représentation graphique du changement brutale de la pression

Figure 13: Représentation graphique du changement brutale de la vitesse



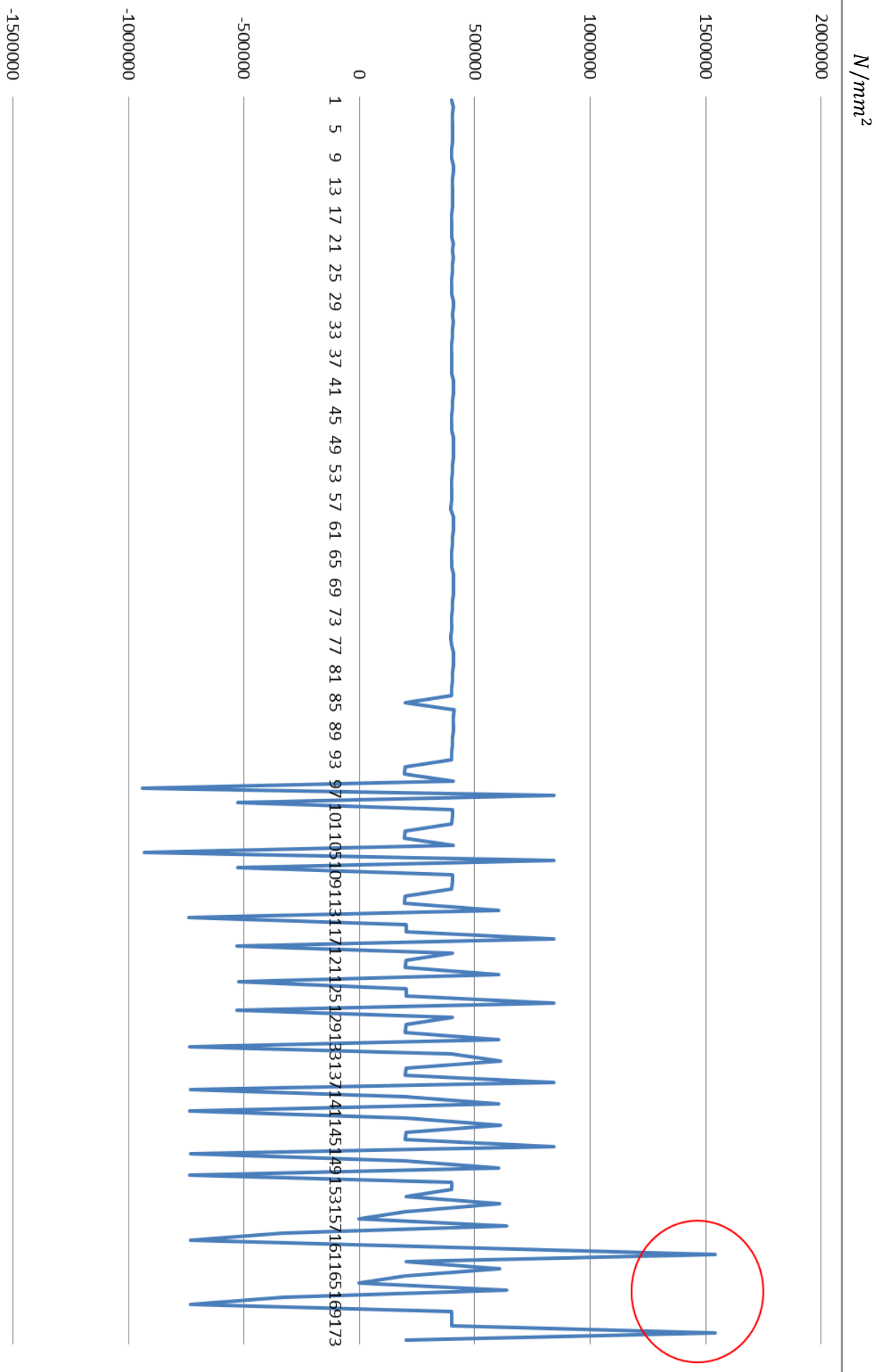


Figure 14: Représentation graphique du changement brutale de la contrainte

1.6. Conclusions :

- ✓ Au moment de la variation brusque de la vitesse d'un liquide dans un tube, par suite d'une fermeture/ouverture rapide d'une vanne, d'un robinet ou du démarrage/arrêt d'une pompe, on remarque une augmentation importante de la pression et la contrainte au niveau de cette fermeture. Un tube qui n'a pas une bonne résistance mécanique ne peut pas résister dans de telles conditions, pour cette raison on doit effectuer le traitement thermique des tubes pour améliorer leur caractéristiques mécaniques.
- ✓ Le traitement thermique d'un matériau est un groupe de procédés industriels utilisés pour modifier les propriétés physiques et parfois chimiques de ce dernier.
- ✓ Les traitements thermiques peuvent être classés comme suit :
 - Traitements superficiels (amélioration des propriétés superficielles) ;
 - Traitements dans la masse (amélioration des propriétés de masse).
- ✓ La trempe est l'une des fameuses techniques de traitement thermique dans la masse des métaux et surtout les aciers. Elle consiste à chauffer uniformément un acier à une température dite "d'Austénitisation" puis à le refroidir de façon rapide et continue, l'échauffement est obtenue généralement grâce à un four industrielle nommé ***four de trempe***. Ce dernier est un élément principal et irremplaçable dans ce genre de traitement thermique.

II.1. Introduction :

L'atelier du parachèvement de la tuberie sans soudure contient plusieurs installations importantes, et la zone du traitement thermique est l'une parmi elles. L'objectif de cette zone est de traiter thermiquement les tubes sans soudure dans le but d'augmenter leurs caractéristiques mécaniques. La méthode de traitement utilisée au niveau de cette zone, c'est le traitement par trempe et revenue (d'étrempage). Le programme annuel assuré par la zone du traitement thermique (TTH) est d'environ 56 500 tonnes de tubes traités pendant une utilisation effective de 3 520 heures.

L'installation du traitement thermique se compose de plusieurs éléments :

- Un équipement de trempe comprenant les jupes de trempe
- Une voie à rouleaux en aval du dispositif de trempe avec un dispositif d'éjection des tubes et un tunnel de protection.
- Un équipement de décalaminage avant calibreur.
- Un four à longerons mobiles de revenue
- Un four à longerons mobiles de réchauffage des tubes avant trempe (four de trempe).

Tous les métaux se dilatent lorsqu'ils sont chauffés et se rétractent au refroidissement, une modification importante de volume se produit lorsque le métal est chauffé au-delà de sa température critique (la température critique est un point où la structure cristalline se modifie), c'est pour cela que le chauffage des tubes est une opération complexe et importante pour le traitement thermique par trempe, dans la zone du traitement thermique cette opération est assurée par un four à longerons mobiles dite four de trempe (fig.15).



Figure 15 : Le four de trempe de la Tuberie Sans Soudure

II.2. Données de base du four de trempe :

II.2.1. Dimensions des produits à traiter :

- Tubes et tubes pour manchons de diamètre nominal 2 3/8" (60 mm) à 14" (355 mm)
- Longueur des tubes : 10 à 15 mètre.
- Epaisseurs : 4 à 20 mm.

Les épaisseurs moyennes des tubes à traiter par diamètre sont mentionnées sur le tableau ci-dessous :

Ø	Ø extérieur (mm)	épaisseurs
2"3/8	60	4.83
2"7/8	73	6.00
3"1/2	89	9.00
4"1/2	114	6.88
5"	127	7.52
5"1/2	139	6.98
6"5/8	168	6.00
7"	178	10.36
8"5/8	219	6.00
9"5/8	245	10.00
10"3/4	273	8.89
12"3/4	323	6.00
13"3/8	340	10.92
14"	355	8.00

Tableau 2 : Dimensions des produits à traiter

- La capacité de production de l'installation (équipement de chauffage et l'évacuation des fumées) a été déterminée de façon à assurer une production de 24 t/h correspondant au temps de chauffage et du maintien indiqués sur le tableau 5.
- Cette capacité de production pourrait être augmentée si les temps de séjour des tubes dans le four étaient réduits.

II.2.2. Qualité des aciers :

- Aciers à tube de toutes nuances, dont les plus utilisés sont : C 75-N 80-P 105 et P 110.
- Les nuances d'aciers correspondront à des aciers au carbone non allié ou faiblement allié. Voici quelques exemples de la variation de la teneur en carbone des aciers selon l'usage :

Pièces	Teneur en carbone
Axes	0,40
Tôles pour chaudière	0,12
Tubes chaudière	0,10
Produits moulés en acier faiblement allié	Moins de 0,2
Aciers à cémentation	0,12
Burins	0,75
Limes	1,25
Pièces forgées	0,30
Engrenages	0,35
Marteaux	0,65
Outil pour tours	1,10
Acier pour construction métallique	0,35
Acier à outils	0,95
Clou	0,10
Tube en acier	0,10
Corde de piano	0,90
Rails	0,60
Rivets	0,05
Vis de serrage	0,65
Scies à bois	0,80
Scies à métaux	1,55
Arbre	0,50
Ressort	1,00
Acier pour emboutissage	0,90
Tuyauterie	0,08
Fil souple	0,10
Outils à couper le bois	1,10
Vis à bois	0,10

Tableau 3 : Aciers et variation de la teneur en carbone selon l'usage

II.2.3. Températures :

- La température d'enfournement dans le four de trempe est la température de l'ambiance ~ 20°C (le produit est froid).

- La température de d'effournement (avant trempe) :

Température normale : 900 °C

Homogénéité de la température : ± 10 °

Température maximum : 950 °C

Pourcentage de carbone	Température critique pour le durcissement et le recuit total		Recuit intermédiaire	
	°F	°C	°F	°C
0,10	1675-1760	913-960		
0,20	1625-1700	885-927		
0,30	1560-1650	849-899		
0,40	1500-1600	816-871		
0,50	1450-1560	788-849	1020	549
0,60	1440-1520	782-827	à	à
0,70	1400-1490	760-810	1200	649
0,80	1370-1450	743-788		
0,90	1350-1440	732-782		
1,00	1350-1440	732-782		
1,10	1350-1440	732-782		
1,30	1350-1440	732-782		
1,50	1350-1440	732-782		
1,70	1350-1440	732-782		
1,90	1350-1440	732-782		
2,00	1350-1440	732-782		
3,00	1350-1440	732-782		
4,00	1350-1440	732-782		

Tableau 4 : Température de chauffage pour le durcissement et le recuit de différents aciers au carbone

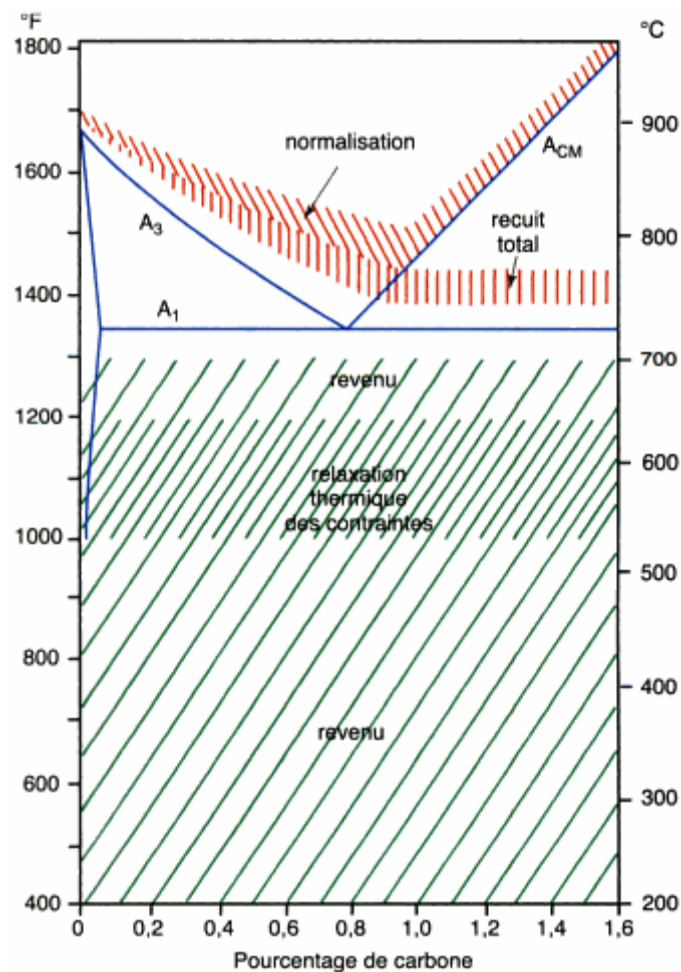


Figure 16 : Températures de traitement thermique pour différents aciers au carbone

Pour utiliser le graphe (fig.16), repérez la teneur en carbone de l'acier devant être traité thermiquement sur l'axe horizontal du bas, prolongé la ligne en montant jusqu'au traitement thermique désiré, la température recommandée pour ce traitement se trouve sur l'axe vertical

II.2.3. Combustible utilisé :

Le combustible utilisé par le four de trempe de la tuberie sans soudure est le gaz naturel, ce dernier est caractérisé par :

- Un pouvoir calorifique inférieur (PCI) : 8 500 Kcal/Nm³
- Une densité moyenne : 0.66
- Sa pression de distribution est de : 8.5 à 10 bars.

II.2.4. Capacités de production :

Les capacités de production horaire pour chacune des dimensions de tube sont mentionnées sur le tableau ci-dessous :

Ø (" ou mm)	Production horaire Kg/h	Chargement Tube/crans	Four de trempe		
			Temps de séjour en mn	Nombre de crans nécessaires	Production possible avec 31 crans (t/h)
2"3/8	488	1/1	18	2.16	7
2"7/8	501	1/1	24	2.01	7.7
3"1/2	13	1/1	32	0.04	10
4"1/2	954	1/1	24	2.04	14.4
5"	937	1/1	28	1.97	14.7
5"1/2	28	1/1	28	0.06	15.6
6"5/8	122	1/1	24	0.20	19
7"	5 305	1/1	36	7.38	22.2
8"5/8	19	1/2	28	0.05	12.3
9"5/8	5 700	1/2	36	11.72	15.06
10"3/4	2	1/2	36	0.01	7.8
12"3/4	37	1/2	28	0.07	16
13"3/8	728	1/2	36	0.95	23.6
14"	53	1/2	32	0.08	20.6
78 mm	38	1/1	36	0.12	9.9
93 mm	40	1/1	40	0.09	13
141 mm	70	1/1	44	0.10	21
141 mm	75	1/1	44	0.11	21
154 mm	1	1/1	44	0.002	19.5
195 mm	424	1/2	48	1.01	12.9
269 mm	456	1/2	60	0.71	19.7
365 mm	58	1/3	60	0.12	15.1
				31.00 soit 32 crans	

Tableau 5 : Les capacités de production du four de trempe

II.2.5. Consommation :

Lors du traitement des tubes de diamètre 183.2 mm - épaisseur 11.51 mm - longueur 10 mètres, d'un poids de 487 kg, la production horaire s'élèvera à 17.40 t/h soit 35.7 tubes/h. la consommation calorifique correspondante en marche industrielle continue s'élèvera lors du traitement de trempe à 370 000 kcal/t (une tonne ~ 2 tubes).

II.2.6. Dimensions du four :

Les dimensions du four de trempe seront les suivantes :

- Largeur : 16 mètres
- Entre axes rouleaux : 7.800 mètre environ enfournement et défournement.
- Hauteur des longerons au-dessus de la sole : 450 mm
- Hauteur intérieure du four 2 350 et 1 800 mm

II.3. Fonctionnement du four de trempe:

- Les tubes à traiter parviendront au four de trempe les uns après les autres depuis une table de classement (fig.17). Et ils seront enfournés latéralement sur une ligne de rouleaux inclinés (fig.18) afin d'assurer leur rotation (chaque rouleau est entraîné à partir d'un moteur électrique d'une puissance de 1.5 KW).



Figure 17 : La table de classement des tubes



Figure 19 : Coté enfournement du four



Figure 18 : Ligne de rouleaux inclinés

- Dans le four les tubes seront dégagés des rouleaux et déposés sur les longerons à l'aide d'un éjecteur (le mécanisme éjecteur prendra le tube sur les rouleaux et le soulevant, le laissera rouler sur le premier cran des longerons fixes).

- Ils traverseront le four de trempe en se déplaçant à l'aide des longerons mobiles et en effectuant des rotations successives. Donc les tubes progresseront de l'enfournement au défournement sur une table à longerons, comprenant 10 longerons fixes et 10 longerons mobiles en acier réfractaire moulé (fig.20).



Figure 20: Table à longerons, fixes et mobiles en acier réfractaire moulé (intérieur du four)

- Au défournement (fig.21), ils seront déposés à l'aide d'un descenseur sur la ligne de rouleaux automoteurs inclinés chargés de les entrainer à l'extérieur du four dans la jupe de trempe.

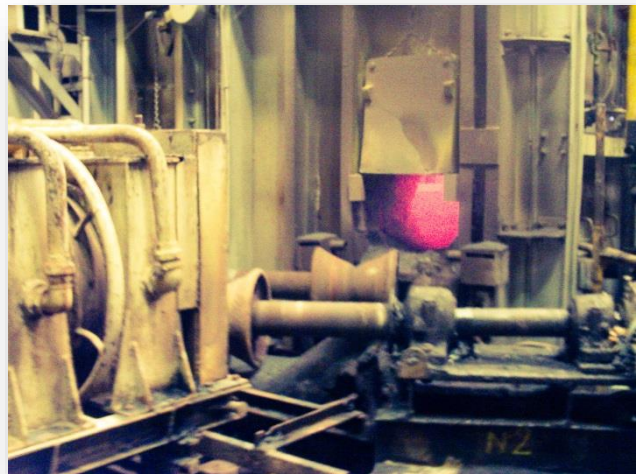


Figure 21: Coté défournement du four de trempe

II.4. Construction du four de trempe :

II.4.1. Construction m é t a l l i q u e :

L'ensemble du four constituera un caisson composé de platelage inférieur sous sole, du poutrage de voute reliés par les armatures verticales.

II.4.2. R é f r a c t a i r e s e t i s o l a n t s :

Les murs et la voute suspendue seront constitués de pièces en réfractaire léger dont une partie sera accrochée. Leur composition sera la suivante :

a. Murs :

230 mm : réfractaire léger (densité= 0.7)

115 mm : isolant (densité= 0.6)

b. Voute :

150 mm : réfractaire isolant (densité= 0.9)

65 mm : isolant (densité= 0.6)

c. Sole :

65 mm : réfractaire 30-35 % AL_2O_3

180 mm : réfractaire isolant (densité= 0.7)

60 mm : isolant (densité= 0.6)

15 mm : béton isolant (densité= 0.6)

d. Descente des fumées :

115 mm réfractaire 30 35 % AL_2O_3

115 mm : réfractaires isolant (densité= 0.7)

65 mm : isolant (densité= 0.6)

e. Carneaux (cheminés) :

200 mm : réfractaire isolant (densité= 0.7)

Les blocs brûleurs et les pièces spéciales sont réalisés soit en produit damés soit en béton. Le barrage disposé dans la voute entre les deux zones est réalisé en pièces suspendues à 35-40 % AL_2O_3

II.4.3. Installation générale :

Des passerelles permettront d'accéder aux divers organes généraux de surveillance de l'installation. Un circuit de distribution d'eau décarbonatée desservira les diverses pièces à refroidir.

L'évacuation s'effectue avec écoulements visibles. Les diverses tuyauteries seront regroupées dans un même collecteur au niveau du sol.

II.4.4. Equipement de chauffage :

Le chauffage est un processus très important lors du traitement thermique, car un acier chauffé à haute température a de gros grains (fig.22) alors qu'un acier ayant atteint une température juste au-dessus de la température critique A_3 puis ayant été refroidi a des grains fins.

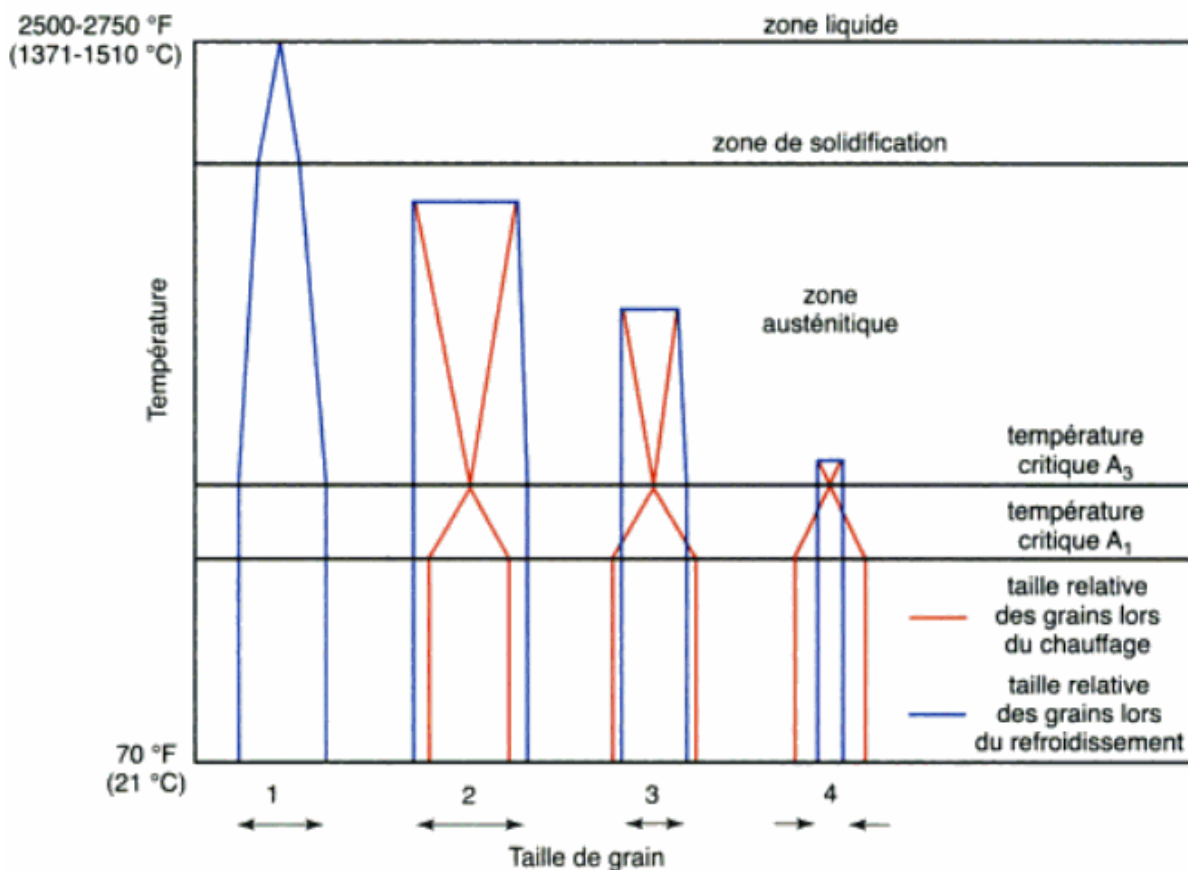


Figure 22: Influence du chauffage sur la taille des grains d'un acier.

II.4.4.1. Les brûleurs :

Le chauffage est assuré à l'aide de 48 brûleurs répartis le long de la façade latérale (fig.23). Ils sont groupés en six zones (trois zones de chauffage et trois zones de maintien en température avant d'enfournement). Le débit du gaz des brûleurs sera le suivant :

- En zone de chauffage : 38 Nm³/h
- En zones de maintien : 10 Nm³/h

La puissance calorifique installée est de :

- 7850 th/h en chauffage
- 1060 th/h en maintien

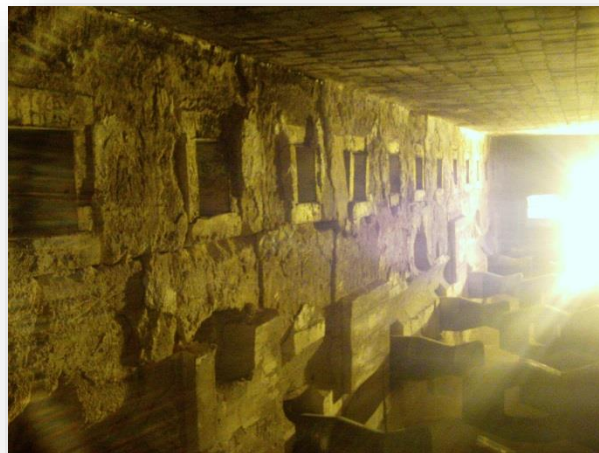


Figure 23: Brûleurs répartis le long de la façade latérale intérieure du four.

II.4.4.2. L'alimentation en gaz :

Le circuit de distribution du gaz naturel comprend l'ensemble des tuyauteries depuis le poste de détente du gaz (la pression = 10bars) jusqu'aux brûleurs. Ce réseau de tuyauteries comprend également les tuyauteries de purge.

II.4.4.3. L'alimentation en air :

Le circuit d'air de combustion comprend l'ensemble des tuyauteries depuis le ventilateur jusqu'aux brûleurs.

Un circuit d'air de refroidissement assurera une distribution d'air depuis deux ventilateurs jusqu'au linteau supportant le barrage entre les deux zones.

II.4.2.4. Circuit des fumées :

Les fumées sont prélevées par des départs répartis le long de la façade d'enfournement. Ou Elles seront conduites en carneau blindé jusqu'à la cheminée.

Les fumées seront évacuées par une cheminée à tirage naturel, d'une hauteur de 25 mètre environ, installée à proximité du four.

Les cheminées et les carneaux sont garnis entièrement de béton isolant et la cheminée autoportante est guidée dans la charpente du bâtiment.

II.5. La régulation automatique du four de trempe :

Le four de trempe est équipé d'un dispositif de régulation automatique comprenant des appareils du type électronique avec servomoteur pneumatique.

Elle comprend les équipements suivants :

- Une régulation de température de chaque zone avec régulation des débits et réglage de proportion air/combustible.
- Une régulation de la pression du four.
- Un équipement de contrôle et d'enregistrement des températures et des débits.
- Un équipement de détente de gaz naturel.

II.5.1. Régulation de la pression :

Elle est constituée de :

- 1 capteur de pression avec émetteur électrique et amplificateur
- 1 régulateur
- 1 servomoteur pneumatique de commande du registre général

II.5.2. Régulation de la température :

L'équipement comprend pour chaque zone :

- 2 cannes pyrométriques à couple
- 1 commutateur installé sur le tableau
- 1 régulateur
- 1 vanne papillon sur gaz avec servomoteur pneumatique et positionneur électropneumatique
- 1 diagramme de mesure de débit de gaz
- 1 capteur de pression différentielle avec transmetteur et amplificateur extracteur de racine carrée sur le gaz.
- 1 vanne papillon sur circuit d'air avec servomoteur pneumatique et positionneur électropneumatique
- 1 diagramme de mesure du débit d'air
- 1 capteur de pression différentielle avec transmetteur et amplificateur extracteur de racine carrée.
- 1 opérateur de rapport air/gaz



Figure 24: Capteur de température (intérieur du four)

II.6. Simulation de la température d'un tube dans le four de trempe :

Le logiciel qu'on a utilisé pour effectuer la simulation de la température et la propagation de la chaleur est nommé :

“ SAFIR ”

II.6.1. Présentation générale de SAFIR :

SAFIR est un logiciel informatique pour la simulation du comportement des matériaux soumis à un flux de chaleur, ce flux est introduit en tant que données (en terme d'une courbe donnant soit l'évolution de la température des gaz dans le compartiment d'incendie ou de l'évolution du flux net sur la surface de la structure). Le logiciel calcule l'évolution de la température dans l'élément structurel qui peut être discrétisé en 2D ou 3D.

II.6.2. Les différents modèles de l'action thermique utilisés par SAFIR :

Il y a plusieurs façons de modéliser le flux de chaleur. Dans un ordre croissant de complexité les modèles utilisés le plus couramment sont :

- Les courbes nominales (fig.25).
- Les courbes paramétriques.
- Les modèles de zones.
- Les modèles CFD.

Et enfin les modèles de feux localisés qui eux n'affectent pas uniformément la surface du compartiment. Ils sont développés dans la norme EC1.

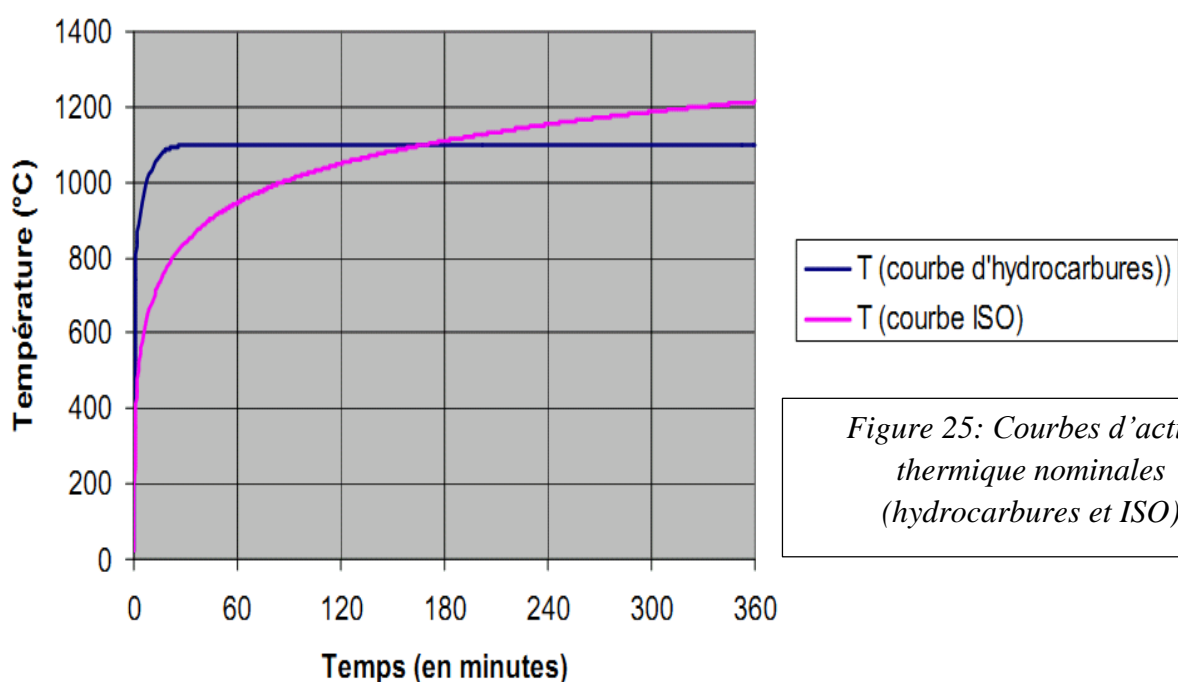


Figure 25: Courbes d'action thermique nominales (hydrocarbures et ISO)

II.6.2.1. Les courbes nominales :

Les courbes nominales sont dans la courbe ISO. Elles ont toutes les caractéristiques suivantes :

- La température est uniforme dans le compartiment ;
- Le seul paramètre dont elles dépendent est le temps ;
- Il n'y a pas de phase de refroidissement.

La courbe nominale ASTM, utilisée aux Etats-Unis, est très proche de la courbe ISO.

II.6.2.2. Courbes paramétriques :

Une courbe paramétrique (fig.26) montre également l'évolution de la température des gaz de combustion en fonction du temps. La température dans le compartiment est uniforme mais, contrairement aux courbes nominales, la relation est calculée sur la base des trois paramètres principaux : charge incendie, ventilation et propriétés des parois. Il faut noter que ces courbes ne peuvent être utilisées qu'au stade du pré dimensionnement, car elles sont parfois insécures.

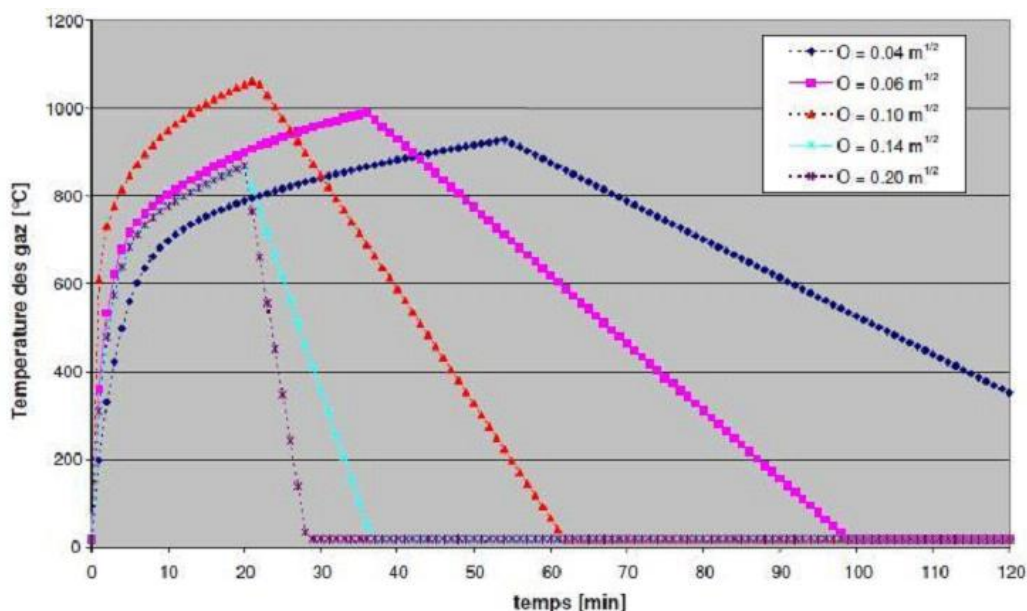


Figure 26 : Exemple de feux paramétriques

II.6.2.2. Modèles CFD :

Les méthodes avancées en Dynamique des fluides (CFD pour Computational Fluid Dynamics) analysent les systèmes incluant l'écoulement des fluides, les transferts de chaleur et les phénomènes associés, cela en résolvant les équations fondamentales de la Mécanique des Fluides. Ces équations constituent une représentation mathématique des lois physiques de conservation. Dans ces modèles, les équations différentielles de la thermodynamique et de l'aérodynamique sont résolues en un très grand nombre de points du compartiment pour déterminer, entre autre, les températures et les composantes de vitesse des fumées. Très complexes à manipuler et très sensibles aux hypothèses, ces modèles sont réservés à la recherche. Ils sont surtout utilisés pour étudier la dispersion de la fumée et de la chaleur, rarement pour évaluer en termes de flux de chaleur l'impact du feu vers les éléments de structure.

II.6.3. Exécution du programme :

Le programme est basé sur la méthode des éléments finis. Il permet de faire une analyse thermique qui se réalise en plusieurs étapes :

- La description de la section
- La discrétisation de la section (choix du nombre de nœuds et nombre d'éléments finis).
- Les caractéristiques thermiques du matériau (coefficient de convection à chaud et à froid, coefficient d'émissivité).
- Le choix de l'action thermique (type de flux thermique : FISO, hydrocarbure ...)
- Le pas du temps et le temps final d'exposition au flux de chaleur.
- Les caractéristiques du tube (\emptyset intérieur, \emptyset extérieur, épaisseur...)

Le tube qu'on a choisi, a les caractéristiques suivantes :

- Diamètre extérieure : 219 mm ;
- Épaisseur : 6 mm ;
- Longueur : 10 mètre ;
- Poids : 487 Kg.

Le programme concernant la section de ce tube sans soudure est en annexe, il nous a permis d'obtenir les résultats suivants :

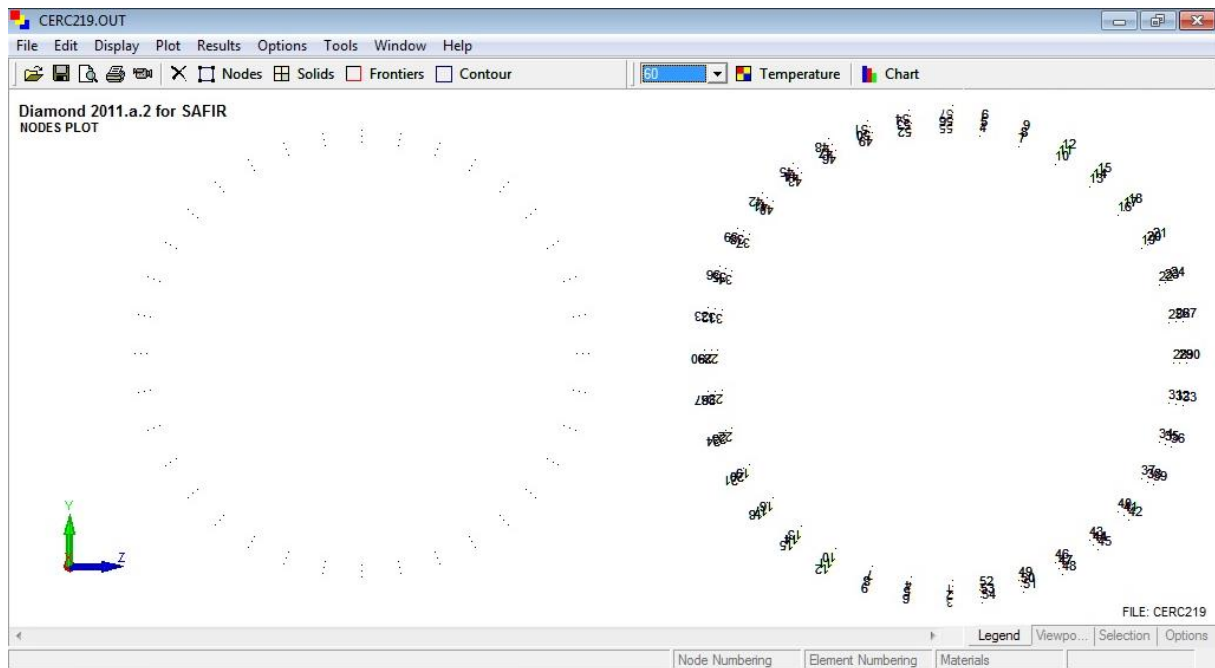


Figure 27 : Discrétisation de la section du tube et numérotation des nœuds

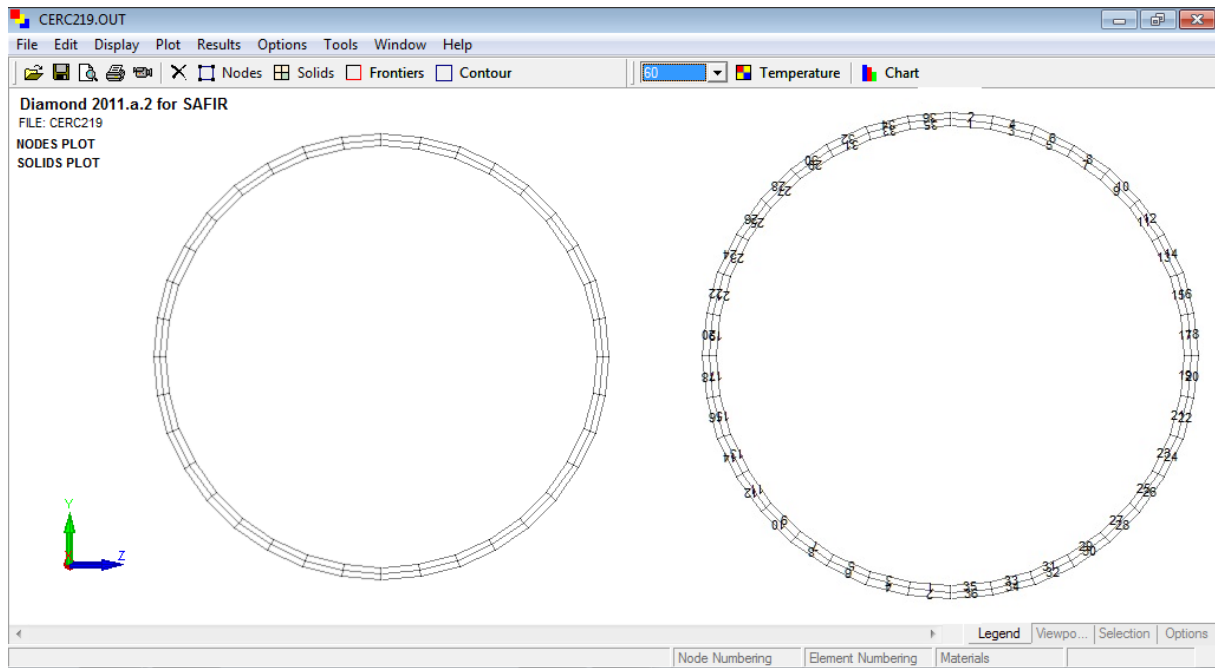


Figure 28 : Discrétisation de la section en éléments finis et numérotation de chaque élément

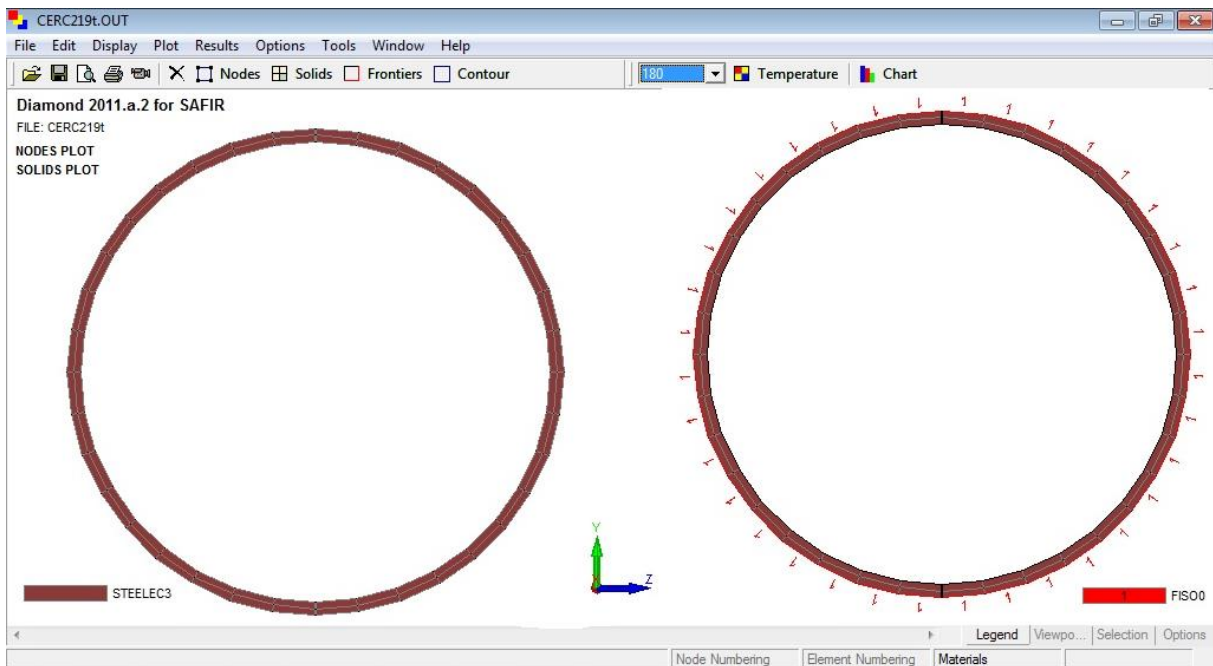


Figure 29: Description du matériau utilisé (acier) et application de la charge thermique (FISO)

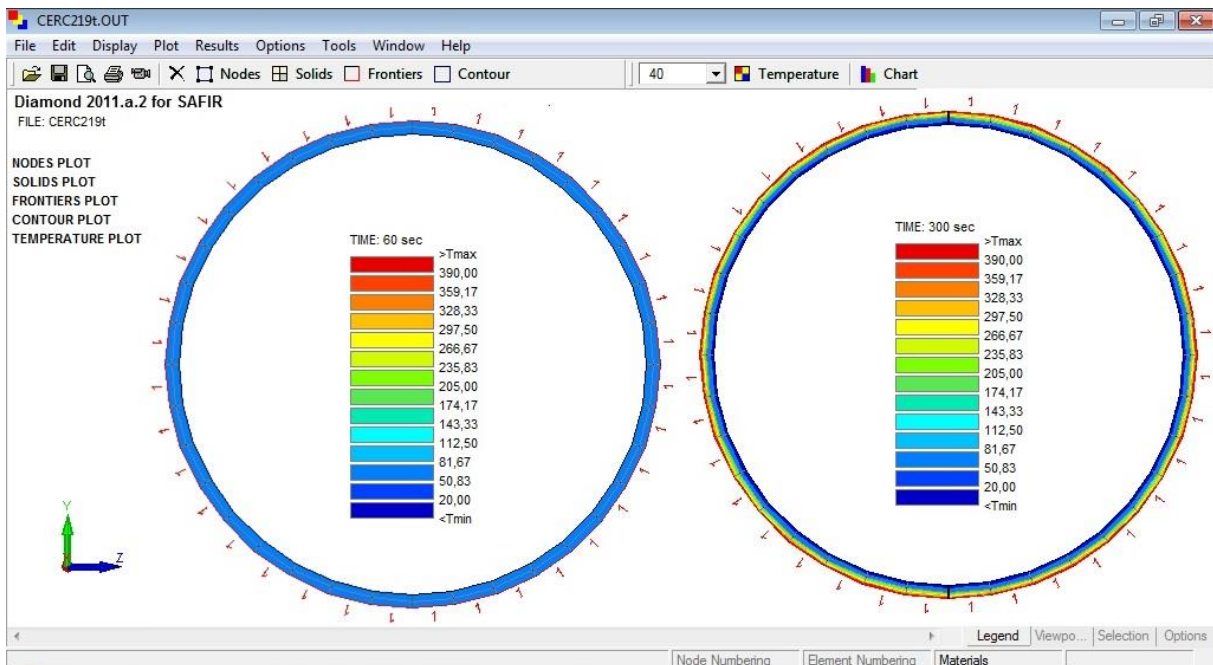


Figure 30: Résultats des températures après 60 et 300 secondes

Chapitre II : Généralités sur le four de trempe et simulation de la température d'un tube

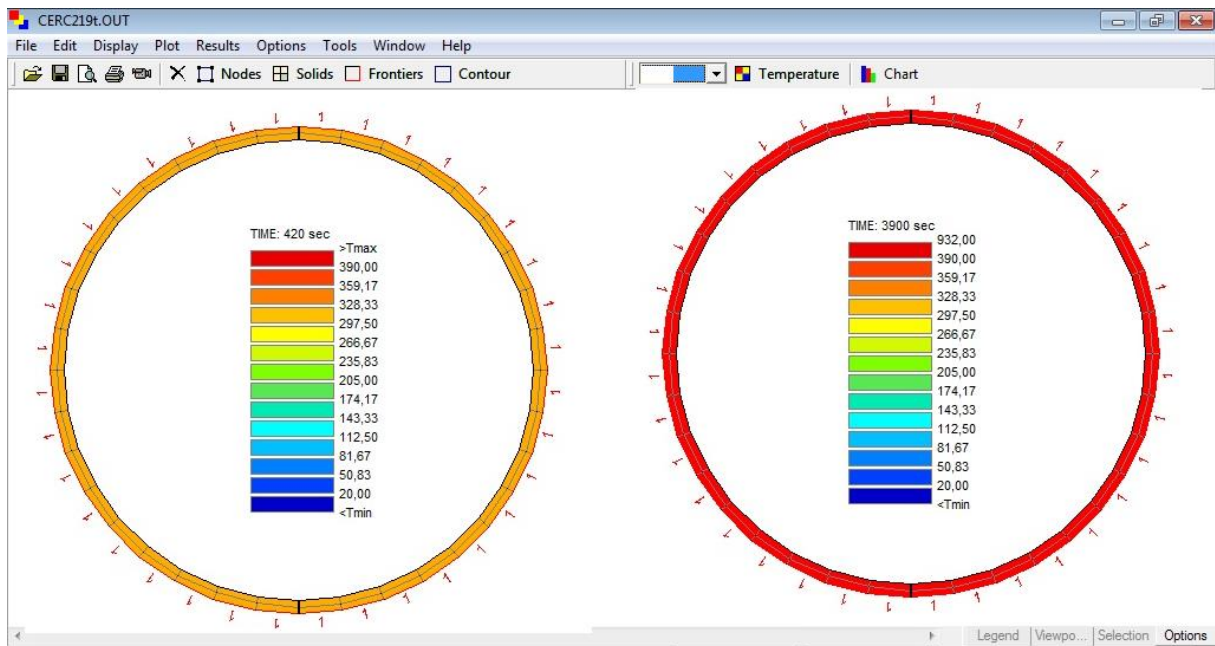


Figure 31: Températures après 420 et 3900 secondes

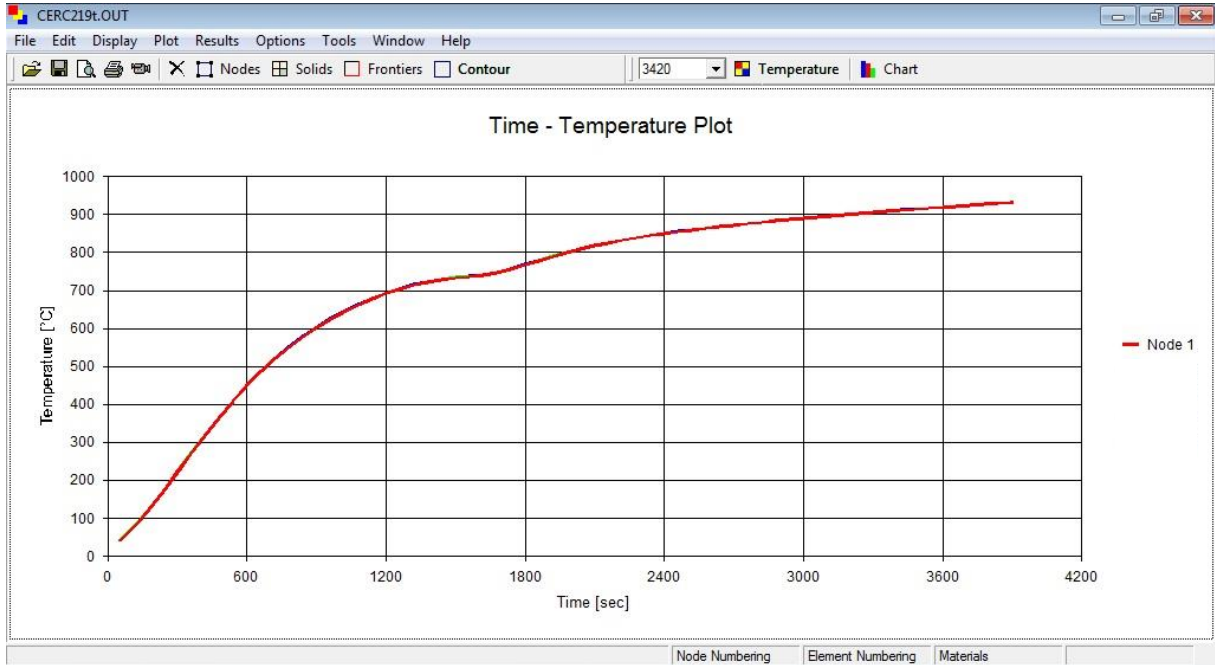


Figure 32 : Courbe de température en fonction du temps, au nœud 1

II.7. Conclusions :

- ✓ Le chauffage des tubes est une opération complexe et importante pour le traitement thermique par trempe et revenu, dans la zone du traitement thermique de la tuberie sans soudure cette opération est assurée par un four à longerons mobiles dite four de trempe.
- ✓ Le four de trempe est un élément essentiel et irremplaçable dans l'installation du traitement thermique.
- ✓ La capacité de production du four de trempe pourrait être augmentée si les temps de séjour des tubes dans le four étaient réduits.
- ✓ Pour réduire le temps de séjour des tubes dans le four il faudrait minimiser au maximum les pertes de chaleur, et cela a été éprouvé par la simulation, dans laquelle on a conclu que :

Pour chauffer un tube de 20 °C jusqu'à 930 °C (température d'austinitisation, voir I.4.3) dans un four de trempe réel (maximum de pertes de chaleur), il faudrait au moins 3900 sec : 1h 5min (fig.31). Alors que d'après les spécifications techniques, lorsque le four de trempe parfaitement isolé cette opération de chauffage doit durer seulement 28 min.

Avant de proposer des solutions à ce problème il faut d'abord évaluer les quantités d'énergie perdue et leurs cause, et pour cela un bilan thermique du four serait utile.

III.1. Introduction :

Un four industriel est un outil utilisé pour élever la température d'un produit, il peut être soit :

- Un équipement destiné uniquement au chauffage (exemple : réchauffage de l'acier avant déformation plastique, réchauffage de pétrole brute avant distillation).
- Un véritable réacteur dans lequel on fabrique les produits (exemple : four de fusion de verre).

Le four industriel s'intègre généralement dans une ligne de production complexe dont il est l'un des éléments. On trouve des fours dans un très grand nombre d'activités industrielles, ce qui rend une approche globale assez délicate.

III.2. Classification des fours industriels :

Toute classification est arbitraire, elle est toutefois utile dans la mesure où elle permet de retrouver des caractéristiques communes à des équipements, à première vue, très différents. Nous proposons ici une classification, en fonction du niveau de température.

III.2.3. Fours à haute et fours à basse température:

Cette classification est arbitraire car une même température peut être considérée comme haute dans un type d'activité et basse dans une autre activité

Exemple : une température de 700 °C sera considérée comme haute dans l'industrie chimique et basse en sidérurgie ou dans l'industrie du verre.

Même si cette limite est un tant soit peu arbitraire, elle n'en est pas moins réelle. D'un point de vue technologique, au-dessus de 700 °C à 800 °C, il devient délicat de construire des fours à chauffage indirect.

D'un point de vue thermique :

- au-dessus de 1 000 °C, le transfert de chaleur se fait essentiellement par rayonnement ;
- au-dessous de 700 °C, la part de la convection devient non négligeable et on cherchera à l'améliorer par mise en circulation des gaz autour du produit.

Exemple : les fours de dimensionnements de pièces chaudronnées qui fonctionnent autour de 650 °C.

Exemple : les pneus usagés qui sont incinérés dans les fours de cimenterie.

III.3. Isolation des fours industriels :

III.3.1. Conception générale :

Les fours modernes comportent généralement une enveloppe métallique (casing) fortement charpentée pour reprendre le poids de la voûte, les poussées des parois réfractaires et les efforts engendrés par les dilatations des éléments constitutifs.

A l'intérieur de cette enveloppe, on dispose plusieurs couches de matériaux isolants et réfractaires qui ont pour but :

- Limiter les déperditions thermiques.
- Protéger l'espace environnant et le personnel d'exploitation.

On distingue dans la construction réfractaire d'un four les éléments suivants :

a. La sole :

C'est un plan horizontal ou parfois incliné sur lequel reposent généralement les produits. La sole peut être fixe ou mobile (four à chariot, four à sole tournante, four à longerons mobile...) elle peut être directement au contact des produits solides ou de produits liquides.

b. La voûte :

Elle peut avoir des formes diverses : plate, cintrée, avec des rampants, suspendue. La voûte est en contact avec les gaz de combustion et, assez souvent, directement avec la flamme. Elle joue un rôle important dans le transfert de chaleur en renvoyant par rayonnement sur les produits, l'énergie qu'elle reçoit de la flamme.

c. Les murs verticaux ou piédroits :

Ils font la liaison entre la voûte et la sole. Ils doivent reprendre le poids de la première et contenir les poussées de la seconde. Dans les fours où la charge est liquide ils doivent également reprendre directement la poussée due à cette charge.

III.3.2. Matériaux réfractaires :

Matériau réfractaire est un terme technique signalant une résistance à une influence chimique, physique ou biologique qu'il faudrait préciser, mais qui semble évidente dans chaque domaine technologique. Il s'agit souvent d'une bonne résistance à la chaleur, c'est-à-dire aux effets induits par les hautes températures, par des corps ayant un point de fusion élevé

III.3.3. Physique des matériaux réfractaires :

Matériau réfractaire est un terme technique signalant une résistance à une influence chimique, physique ou biologique qu'il faudrait préciser, mais qui semble évidente dans chaque domaine technologique. Il s'agit souvent d'une bonne résistance à la chaleur, c'est-à-dire aux effets induits par les hautes températures, par des corps ayant un point de fusion élevé. Les matériaux réfractaires dont on dispose sont de trois types :

➤ Les matériaux pré-cuits :

Ils se présentent sous forme de pièces standards (briques, coins, couteaux) ou de pièces de forme spéciale (ouvreaux de brûleurs). Ils sont cuits à haute température et parfaitement stabilisés. Leur composition chimique dépend du niveau de réfractarité que l'on veut atteindre. Leurs dimensions augmentent légèrement au cours de la montée en température du four, d'où la nécessité de prévoir des joints de dilatation lors de la construction.

➤ Les matériaux non pré-formés :

Ils sont mis à la disposition de l'utilisateur en vrac. Mélangés sur le chantier avec un liant et parfois un agrégat complémentaire, leur mise en forme et leur cuisson se fait sur place. On distingue :

Les bétons à liant hydraulique

Les plastiques à liant chimique

Portés à leur température d'utilisation, ces produits subissent une céramisation qui vient relayer ou conforter les liaisons hydrauliques existantes lors de leur mise en place. Cette céramisation se fait souvent avec un retrait dimensionnel dont il faut tenir compte lors de la conception et de la construction.

➤ **Les matériaux fibreux :**

Ils sont composés de fibres de quelques centimètres de longueur et de quelques micromètres de diamètre mises sous forme de nappes, ou parfois sous forme de pièces de géométrie particulière. Les matériaux fibreux ont une densité apparente nettement plus faible que celle des produits précédents. Ils permettent donc de diminuer considérablement l'inertie thermique de la construction et ils sont particulièrement bien adaptés pour les fours à fonctionnement discontinu ou cyclique. Ils permettent également grâce à leur très faible densité de diminuer considérablement le poids des voutes et les efforts sur les piédroits.

III.3.4. Chimie des matériaux réfractaires:

Quelle que soit la forme physique sous laquelle se présente le matériau réfractaire, sa tenue à la température dépend principalement de sa composition chimique. Les matériaux réfractaires les plus usuels sont obtenus à partir d'argiles silico-alumineuses et leur résistance à la température est fonction de leur teneur en alumine (Al_2O_3), comme on peut le voir sur le tableau 6 qui donne la résistance pyroscopique (essai de laboratoire normalisé) en fonction de la teneur en ($Al_2O_3 + TiO_2$) du matériau.

En dehors des réfractaires silico-alumineux, on utilise pour certaines applications particulières des matériaux réfractaires à base de silice (SiO_2) presque pure, de magnésie (MgO) ou encore de zirconie (ZrO_2).

On retiendra que les performances d'un réfractaire donné sont fortement dépendantes de sa teneur en impuretés. Parmi celles-ci, les oxydes de sodium (Na_2O) et de potassium (K_2O) et, à un moindre degré, les oxydes de fer (FeO) jouent un rôle essentiel, car leur présence diminue considérablement la température maximale d'utilisation. On les désigne habituellement sous le terme de fondants.

$Al_2O_3 + TiO_2$ %	Résistance pyroscopique °C
< 20	1 520
20 / 25	1 580
25 / 30	1 650
30 / 35	1 670
35 / 40	1 690
40 / 42	1 710
42 / 45	1 730

(1) L'oxyde de titane, dont la teneur est généralement faible inférieure à 2 %, est comptabilisé avec l'alumine.

Tableau 6 : Résistance pyroscopique des matériaux

III.3.5. Interactions entre les réfractaires et le four:

Les réfractaires ne sont pas inertes par rapport à ce qui se passe dans le four et le choix des réfractaires qui se trouvent en contact avec les fumées, la flamme ou la charge est fortement conditionné par les caractéristiques de ces derniers.

Les matériaux fibreux, qui sont très poreux, sont exclus lorsqu'il y a contact avec une charge liquide ou lorsqu'il y a risque de projection de liquide. Ils sont également à éviter lorsque les gaz issus de la combustion comportent des éléments corrosifs (gaz sulfureux par exemple). Au contact d'une charge liquide (fours de fusion), on utilise des produits compacts et lourds à forte teneur en élément réfractaire de base (alumine, magnésite ou autres). Outre les corrosions d'origine chimique, les réfractaires peuvent être soumis à des érosions mécaniques. C'est le cas par exemple des fours poussants de métallurgie dans lequel l'avancement des produits par glissement impose, pour la sole, des matériaux réfractaires très durs (corindon, par exemple) ; des zones de convection des fours de raffinage du pétrole équipées de ramoneurs à vapeur, si les jets de vapeur peuvent venir au contact des parois ; des fours rotatifs dans lesquels la charge avance par glissement sur les parois.

III.3.6. Dimensionnement des parois réfractaires:

Une fois déterminée la qualité de la première couche de réfractaire, en fonction du niveau de température dans le four et des interactions chimiques en surface, le choix et le dimensionnement des couches réfractaires et isolantes arrière sont choisis en fonction des déperditions thermiques et/ou de la température de paroi extérieure maximale acceptables. Ce calcul se fait généralement, en supposant l'équilibre thermique atteint, avec comme objectifs :

- de trouver un optimum entre des épaisseurs et des déperditions énergétiques économiquement acceptables ;
- d'obtenir sur les parois extérieures une température compatible avec la circulation ou la présence de personnel.

Dans certains cas, les différentes contraintes sont incompatibles entre elles et sur certains fours (fours de fusion à haute température par exemple), on est conduit à refroidir les parois extérieures par de l'eau en ruissellement ou en circulation dans une double paroi métallique.

III.3.7. Effet d'une source de chaleur sur la matière :

Les matériaux réfractaires les plus communs, par exemple une brique réfractaire, possèdent une forte inertie thermique (L'inertie thermique d'un matériau représente la résistance au changement de sa température lorsque intervient une perturbation de son équilibre thermique). Exposés à une source de chaleur, ils chauffent relativement lentement, et une fois à température élevée, ils refroidissent avec lenteur ^[19]

Placée au contact d'une flamme ou d'un plasma, une plaque réfractaire permet aux parois des fours de contenir la source de chaleur, en particulier en restreignant l'expansion des zones à températures très élevées qui pourraient altérer tout ou partie des parois du four. Comme ces matériaux sont souvent de mauvais conducteurs de la chaleur, ils diminuent la déperdition calorifique d'un système de chauffage ou assurent une appréciable isolation thermique.

Cette inertie thermique est caractérisée par un coefficient appelé capacité thermique : c'est l'énergie qu'il faut apporter à un matériau pour augmenter sa température relative d'un kelvin (1 K).

$$Q = m c_p DT \quad (1)$$

Avec :

Q = chaleur évacuée en joules

m = masse du corps en kg

C_p = capacité thermique massique à pression constante du corps, en J/kg.K

DT = différence de température entre le corps et le fluide, en kelvin.

III.4. Transfert de chaleur dans les fours industriels :

La finalité d'un four est de transférer de l'énergie à une charge (produits) pour en élever la température. Ce transfert se fera par les trois modes de transfert de chaleur (rayonnement, convection, conduction), la plupart du temps simultanément, mais dans des proportions très variables.

III.4.1. Fours à haute température :

Ce sont les fours de sidérurgie, de verrerie, de cimenterie. La température que l'on veut obtenir sur le produit d'épasse, et parfois nettement, 1 200 °C.

C'est également le cas d'un certain nombre de fours de l'industrie du pétrole et de la chimie dans lesquels, bien que la température du produit soit inférieure à 500 °C, une partie importante de la chaleur est fournie directement par le rayonnement de la flamme dans une zone de radiation. Le transfert de chaleur s'y fait essentiellement par rayonnement de la flamme et des gaz issus de la combustion.

Les transferts de chaleur par rayonnement découlent fondamentalement de la loi de Stefan-Boltzmann :

$$Q = a \sigma S (T_f^4 - T_c^4) \quad (2)$$

Avec Q puissance thermique et de considérations géométriques liés aux dimensions et aux positions respectives des surfaces réceptrices de la chaleur (le produit à chauffer), des surfaces et volumes des émetteurs (flamme et gaz de combustion) et des surfaces réfléchissantes (parois du four).

Loi de Stefan-Boltzmann :

Cette loi indique que la valeur de la puissance thermique émise par le rayonnement d'un corps noir est fonction de la température absolue de ce corps, à la puissance quatrième :

$$Q_s = \sigma T^4 \quad (3)$$

Avec Q_s puissance émise sur l'ensemble des longueurs d'onde par unité de surface,

T : température du solide rayonnant (en kelvins),

σ : constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ ou $4,89 \times 10^{-8} \text{ kcal.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{K}^{-4}$)

Dans un four, en première approximation, on considère que le four se comporte pour la charge comme un corps noir et la charge comme un corps gris vis-à-vis du four. Un corps gris a les mêmes caractéristiques d'émission énergétique qu'un corps noir, mais minorées par rapport à celui-ci.

On en déduit l'expression générale du transfert de chaleur par rayonnement :

$$Q = a \sigma S (T_f^4 - T_c^4)$$

Avec Q puissance thermique transmise du four à la charge,

T_f : température du four,

T_c : température de la charge ou de la surface de la charge,

S : surface de la charge offerte au rayonnement du four,

a : coefficient d'absorption du rayonnement par la charge ; ce coefficient, qui est compris entre 0 et 1, est très proche de 1 lorsque : les dimensions du four sont grandes par rapport à celles de la charge ; la surface de la charge est peu réfléchissante.

La convection jouera dans ces fours un rôle secondaire pour ce qui concerne la quantité de chaleur transférée, mais aura, dans un certain nombre de cas, un impact non négligeable sur l'égalisation des températures.

III.4.2. Fours à basse température :

Ce sont, en particulier, les fours de traitement thermique de métallurgie, les fours de revêtement de surface et les fours pour les métaux non ferreux. La température que l'on veut obtenir sur le produit dépasse rarement 700 °C, et est parfois sensiblement inférieure. C'est également le cas des zones de convection des fours de l'industrie du pétrole et de la chimie. Le transfert de chaleur s'y fait essentiellement par convection de gaz transparents. La loi fondamentale du transfert de chaleur est la loi de Newton :

$$Q = K S (T_f + T_c) \quad (4)$$

Et on cherchera, pour un écart de température ($T_f - T_c$) donné à augmenter le transfert de chaleur en améliorant le coefficient de convection k qui s'écrit d'une façon générale :

$$K = A \frac{\lambda}{l} Re^{0.8} + Pr^{0.33} \quad (5)$$

Pr (nombre de Prant) dépend essentiellement du fluide : ici les gaz de combustion. On voit qu'il faudra pour obtenir un coefficient d'échange k élevé, essayer d'augmenter la valeur de Re (nombre de Reynolds). Cela se fera :

- soit par mise en vitesse du fluide : implantation de ventilateurs à l'intérieur de l'enceinte (figure 33), utilisation de brûleurs à grande vitesse d'éjection des gaz de combustion dans le foyer, recyclage externe des gaz ;
- soit par augmentation des effets de pointe, comme l'adjonction d'ailettes ou de picots (studs) dans les zones de convection des fours tubulaires, qui accroissent simultanément la surface d'échange.

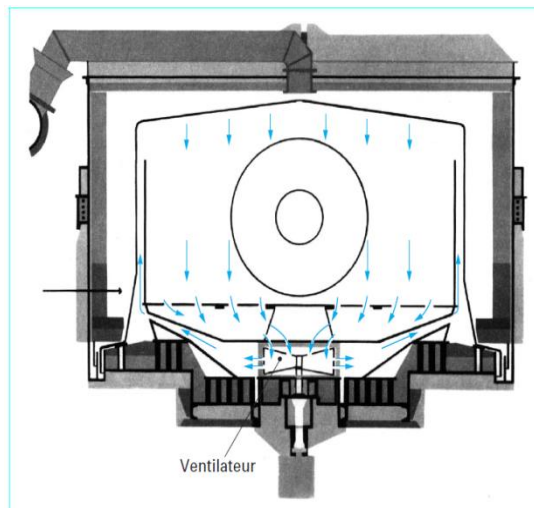


Figure 33: Ventilateur de circulation de gaz dans un four de réchauffage de pièces en métaux non ferreux

III.5. Calcul thermique des fours :

Chaque type de four a évidemment son processus de calcul propre, qui tient compte de sa technologie et de ses utilisations. On ne donnera donc ici que les principes de calcul communs à tous les fours.

III.5.1. Bilans énergétiques :

Quel que soit le four, l'objectif est de fournir aux produits une quantité de chaleur déterminée par :

- sa température initiale ou température d'enfournement
- la température finale désirée ou température de défournement
- la masse des produits à chauffer ;
- la chaleur massique des produits et, s'il a lieu, les chaleurs de transformation durant la montée en température.

Soit Q_u cette quantité de chaleur utile.

III.5.2. Rendement énergétique :

Le rendement d'un four est le rapport de l'énergie utile Q_u à l'énergie Q qu'il faut fournir au four sous forme de combustible ou d'électricité.

En appelant Q_p les diverses pertes thermiques, il vient :

$$Q = Q_u + Q_p \quad (6)$$

$$\eta = \frac{Q_u}{Q} = \frac{Q - Q_p}{Q} \quad (7)$$

Le terme Q_p comprend :

- les pertes par les fumées Q_f ;
- les pertes par les parois Q_v ;
- l'énergie nécessaire au réchauffage des parois Q_{mv} ;
- les pertes par les ouvertures du four Q_e .

Il y a lieu de déterminer ces pertes pour calculer le rendement du four.

III.5.3. Détermination des pertes par les parois :

Dans les fours continus, en régime thermique établi, on applique pour les parois planes (murs, voûte, sole) la relation :

$$Q_v = K (T_i - T_e) S \quad \text{avec} \quad K = \frac{1}{\left(\sum \frac{e_i}{\lambda_i}\right) + \left(\frac{1}{K_e}\right)} \quad (8)$$

e_i : Épaisseur des i couches successives de réfractaires ou d'isolants ;

λ_i : Conductivité thermique des i couches successives de réfractaires ou d'isolants ;

K_e : Coefficient d'échange de la paroi externe avec l'ambiance ;

T_i : Température de la paroi interne du four ;

T_e : Température externe ambiante ;

S : Surface externe du four.

Dans les fours convenablement isolés, T_i est très proche de la température de l'ambiance du four à l'endroit considéré. Le coefficient k_e regroupe :

- un facteur rayonnement qui croît avec la température de la paroi externe T_e ;
- un facteur convection qui croît avec la vitesse de circulation de l'air autour de la paroi externe.

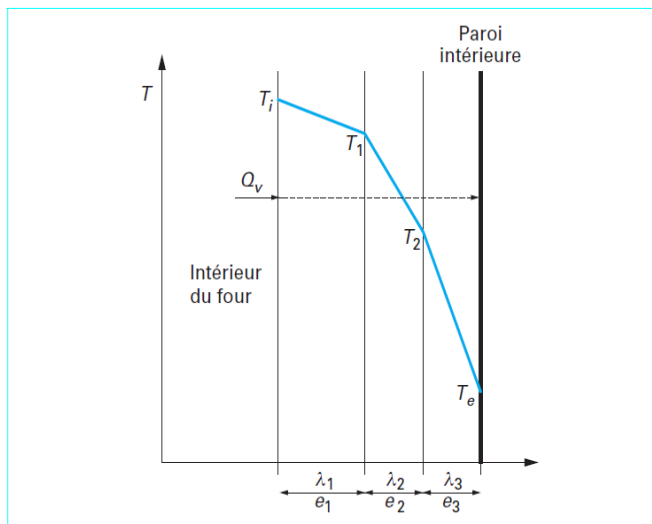


Figure 34: Évolution des températures dans une paroi composite à trois couches de matériaux réfractaires et isolants

Pratiquement, on utilise pour le coefficient k_e les valeurs du type de celles données par la courbe de la figure 35, en se souvenant toutefois que pour un four out-door, soumis au vent et à la pluie, les effets de la convection peuvent être sensiblement plus élevés.

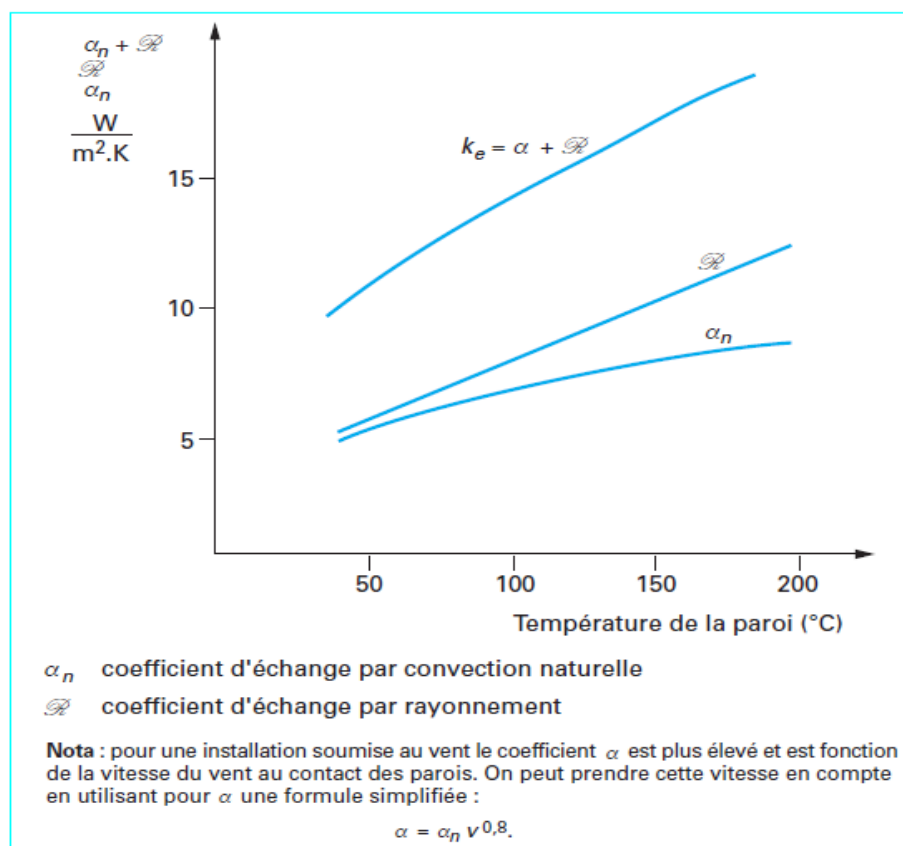


Figure 35 : Coefficient d'échange d'une paroi de four avec le milieu extérieur

Les pertes par les parois calculées de cette façon sont généralement légèrement majorées pour tenir compte des effets de bords et d'angles où les déperditions peuvent être sensiblement plus importantes que celles calculées pour un mur plan. Cette majoration ne dépasse pas 10 à 15 % de la valeur obtenue par le calcul. Pour les fours qui supportent d'être portés à leur température normale d'utilisation sans être chargés, une approche, a posteriori, des pertes par les parois peut être obtenue en mesurant la puissance thermique Q_{min} fournie durant cette période, le four étant stabilisé thermiquement, sous forme de combustible. On obtient alors :

$$Q_{VV} = Q_{min} \eta_c \quad (9)$$

On se souviendra toutefois que ces pertes à vide peuvent être légèrement supérieures aux pertes par les parois dans la mesure où, sans charge, la distribution des températures dans l'enceinte du four peut être différente de la distribution des températures avec charge.

Pour les fours discontinus, T_i varie avec le temps, il en est de même de l'évolution des températures dans les parois. Il faudra donc faire le calcul, pour un cycle, par tranche de temps. Ce calcul nécessite donc de résoudre préalablement un problème de conduction en régime variable dans un mur composite. Bien que les moyens modernes de calcul permettent de traiter convenablement ce type de problème, on se contentera, assez souvent, de calculer les pertes par les parois en régime établi en prenant pour la température T_i soit la température moyenne au cours du cycle, soit la température maximale atteinte au cours du cycle, ce qui donnera, pour ces pertes par les parois, une valeur par excès.

III.6. Pollutions et environnement :

Consommateurs d'énergie, les fours ont, particulièrement par leurs rejets dans l'atmosphère, un impact non négligeable sur l'environnement. Il faut noter que, par exemple, certains très gros fours de la chimie, de la sidérurgie ou de la cimenterie rejettent par leur cheminée des débits de fumées qui peuvent dépasser le million de tonnes par an.

III.6.1. Polluants :

Pour ce qui concerne les fours industriels les polluants les plus courants sont :

- les oxydes de soufre (SO_2 et SO_3) formés à partir du soufre contenu dans certains combustibles (fioul, gaz de cokerie, etc.) ;

- les oxydes d'azote (NO, NO₂, N₂O) formés au cours de la combustion soit à partir des composés azotés contenus dans le combustible, soit par combinaison à haute température de l'azote et de l'oxygène de l'air ;
- les poussières en provenance du combustible, ou de particules solides en provenance des produits chauffés, entraînés par les fumées ;
- l'oxyde de carbone (CO) dans les fours où la combustion s'effectue avec un défaut d'air.

On peut trouver également, dans des installations plus spécifiques des composés de fluor, de chlore, des COV (composés organiques volatils), des HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), etc., et, sauf si le combustible est de l'hydrogène pur, on trouve dans les fumées du dioxyde de carbone (CO₂) qui bien que n'étant pas un polluant au sens strict du terme, a un impact sur le climat par l'effet de serre qu'il entraîne.

III.6.2 Réglementation :

Les fours sont donc, à ce titre, soumis à un certain nombre de réglementations. C'est un domaine qui est en pleine évolution, au niveau européen et mondial. Nous nous contenterons de signaler l'existence de quelques textes généraux, sachant que, pour certains secteurs industriels (verrerie, raffinerie, fonderie, cimenterie, etc.), il existe, en France, des réglementations spécifiques et particulières.

La nomenclature des installations classées, qui découle de la loi du 19 juillet 1976, impose par sa rubrique 2910, une déclaration ou une demande éventuelle d'autorisation, pour toutes installations dont la puissance installée dépasse 2 MW.

L'arrêté et le décret sur la taxe parafiscale sur les émissions de polluants dans les fumées, promulgué pour la première fois le 7 juin 1985, a déjà été prorogé plusieurs fois. Il désigne les polluants soumis à la taxation (SO_x, NO_x, HCl, HC, COV, poussières) et l'assiette de leur taxation. Les sommes collectées, dans le cadre de cette taxe, sont affectées à des recherches et des investissements destinés à la protection de l'air.

La circulaire du 28 mars 1988 sur l'auto-surveillance des émissions polluantes définit les seuils d'émissions à partir desquels il y a lieu de procéder à une auto-surveillance des émissions, et les moyens à utiliser pour ce faire. L'arrêté du 5 juillet 1977 impose un contrôle, tous les trois ans, des installations consommant de l'énergie thermique, en vue d'économiser cette énergie.

III.7. Conclusion :

- ✓ Un four industriel est un outil utilisé pour élever la température d'un produit, il peut être soit un équipement destiné uniquement au chauffage ou un véritable réacteur dans lequel on fabrique les produits. Quel que soit le four, l'objectif est de fournir aux produits une quantité de chaleur déterminée.
- ✓ La finalité d'un four est de transférer de l'énergie à une charge (produits) pour en élever la température. Ce transfert se fera par les trois modes de transfert de chaleur (rayonnement, convection, conduction), la plupart du temps simultanément, mais dans des proportions très variables.
- ✓ Le rayonnement et la convection sont les vecteurs principaux du transfert de chaleur du four vers la charge, avec, selon les cas, la prédominance de l'un ou de l'autre ; et la conduction assure le transfert de chaleur à l'intérieur des produits.
- ✓ Le rendement d'un four est le rapport de l'énergie utile Q_u à l'énergie Q qu'il faut fournir au four sous forme de combustible ou d'électricité.
- ✓ Dans les fours industrielles les diverses pertes thermiques sont représentées par le terme Q_p , qui comprend :
 - les pertes par les fumées Q_f ;
 - les pertes par les parois Q_v ;
 - l'énergie nécessaire au réchauffage des parois Q_{mv} ;
 - les pertes par les ouvertures du four Q_e .

IV.1. Introduction :

L'énergie peut se présenter sous plusieurs formes qui peuvent se transformer ; par exemple, production d'électricité à partir du gaz, de pétrole ou de charbon dans une centrale thermique, ou le chauffage d'une maison à partir d'électricité ou de fioul domestique. Dans le Système international d'unités, l'énergie s'exprime en joules. La tonne d'équivalent pétrole (tep) est utilisée par les spécialistes et les économistes pour comparer les énergies entre elles.

Selon le principe de conservation de l'énergie, lors de toute transformation, l'énergie est conservée. Il s'énonce de la manière suivante : « Lors d'une transformation dans un système fermé la variation de son énergie interne est égale à la quantité d'énergie échangée avec le milieu extérieur, sous forme de chaleur ou de travail. » Autrement dit, l'énergie acquise par le système est égale à celle que lui a transmis l'opérateur, même si celle-ci a changé de forme : l'un l'a acquise, l'autre l'a perdue, mais la quantité échangée est constante → l'énergie se conserve.

L'énergie est en quantité invariable dans la nature. On ne peut la produire à partir de rien : on ne peut que l'échanger, ou la transformer d'une forme à une autre. Ce que résume fort bien la célèbre maxime de Lavoisier « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ». Cependant, des frottements peuvent intervenir au cours de l'échange, comme dans un moteur, créant des déperditions. Dans ce cas, la quantité d'énergie restituée par le moteur est inférieure à celle qui lui a été fournie : on dit qu'il y a des pertes. Mais cela ne contredit pas le principe de conservation : toute l'énergie reçue a été transformée, une partie ayant été transformée en chaleur dans les frottements. L'énergie "perdue" n'a pas disparu : elle s'est dissipée dans le milieu extérieur. Cette quantité d'énergie non utilisée par le système peut être mesurée, c'est ce qui permet de définir le rendement.

IV.2. Rendement énergétique du four de trempe :

Le rendement du four de trempe est le rapport de l'énergie utile Q_u à l'énergie Q qu'il faut fournir au four sous forme de combustible.

$$\eta = \frac{Q_u}{Q} \quad \text{et} \quad Q = Q_u + Q_p$$

IV.2.1. Calcul de l'énergie fournie par le combustible :

La quantité d'énergie totale fournie par les brûleurs ou la chaleur apportée par la combustion du gaz naturel est donnée par le produit du débit horaire (D) du gaz naturel au pouvoir calorifique inférieur (PCI) de ce dernier :

$$Q_T = D * PCI$$

- Le PCI du gaz naturel étant 8 500 kcal/Nm³.
- Les débits du gaz des brûleurs (*voir II.4.4.1.*), sont les suivants :

En zone de chauffage le débit de chaque brûleur est :

$$38 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

En zone de maintien le débit de chaque brûleur est :

$$10 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

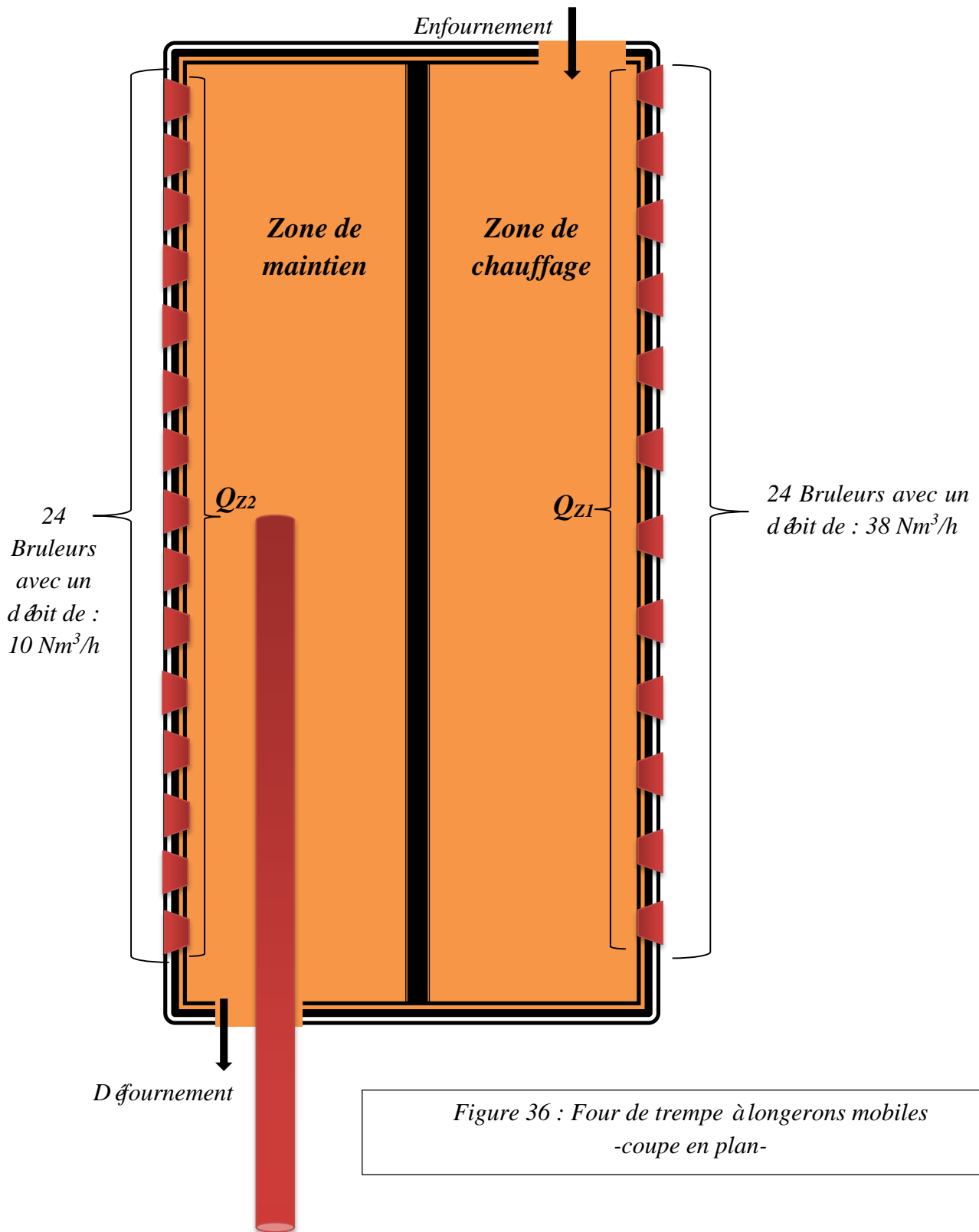


Figure 36 : Four de trempé à longerons mobiles
-coupe en plan-

	Zone de chauffage	Zone de maintien
Le débit du gaz naturel pour un brûleur (D)	38 Nm ³ /h	10 Nm ³ /h
Le pouvoir calorifique inférieur du gaz naturel (PCI)	8 500 kcal/Nm ³	
La quantité de chaleur fournie par un brûleur	323 000 Kcal/h	85 000 Kcal/h
La quantité de chaleur fournie par tous les brûleurs (Q _{Z1} et Q _{Z2})	7 752 000 Kcal/h	2 040 000 Kcal/h
La quantité de chaleur totale fournie par le combustible (Q _T)	9 792 000 Kcal/h	

Tableau 7 : Calcul de l'énergie fournie par le combustible

IV.2.2. Calcul de l'énergie utile :

- L'énergie utile pour une tonne est :

$$Q = m C_p DT$$

$$m = 487 \text{ kg}$$

$$C_p = 0.11 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{K}$$

$$DT = T_{\text{d'fournement}} - T_{\text{enfournement}} = 902 - 20 = 882 \text{ } ^\circ\text{C} = 1155 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$Q_{u1} = 61\,873.38 \text{ Kcal} \quad (\text{pour 1 tube})$$

$$Q_{ut} = 127\,050 \text{ Kcal} \quad (\text{pour une tonne } \sim 2 \text{ tubes})$$

$$Q_{ut} = 127\,050 \text{ Kcal/t}$$

- La production horaire est de 17.40 t/h, donc :

$$127\,050 \text{ Kcal} \rightarrow 1 \text{ t}$$

$$? \text{ Kcal} \leftarrow 17.40 \text{ t}$$

On obtient alors :

$$Q_u = 2\,210\,670 \text{ Kcal/h}$$

IV.2.2. Calcul du rendement énergétique :

$$\eta = \frac{Q_u}{Q} = \frac{2\,210\,670}{9\,792\,000} = 0,225762867$$

$$\eta = 22.57 \%$$

IV.3. Les pertes par les ouvertures du four Q_{rh} :

Le four de trempe contient plusieurs ouvertures, chacune d'elle à un rôle précis (entrée et sortie du produit, porte de visite...). Ces ouvertures favorisent le transfert de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur du four, par le processus de convection, et surtout par rayonnement.

Dans le domaine des basses températures, la convection et la conduction jouent un rôle important. Le flux transmis par rayonnement devient prépondérant aux températures supérieures à 400 °C. La figure 37 montre la part relative du transfert de chaleur par rayonnement et par convection naturelle en fonction de la température.

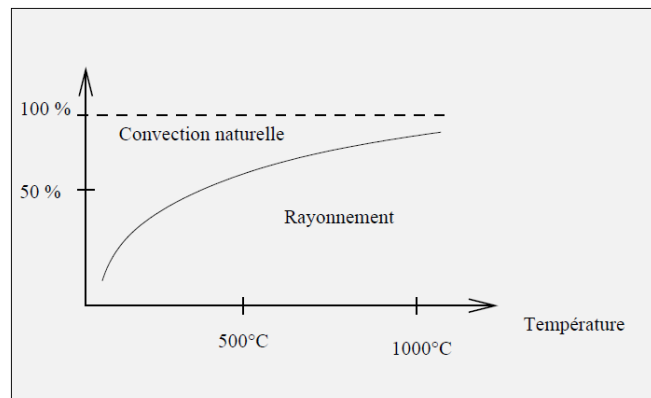


Figure 37 : Part relative du transfert par convection et rayonnement en fonction de la température.

On ce qui concerne la convection le transfert de chaleur est dû au déplacement de molécules de différentes températures, il se déroule dans un fluide (un liquide ou un gaz). Ces molécules se déplaçant, elles transfèrent leur chaleur à un autre endroit du système. On peut distinguer deux types de convection :

- Convection naturelle (ou libre) : l'échange de chaleur est dû à la différence de masse volumique entre les particules composant le fluide ; la masse volumique variant avec la température.
- Convection forcée : le déplacement du fluide est forcé : ventilateur devant un radiateur. Le mouvement accélère le transfert thermique.

L'atelier du parachèvement dans le quelle se trouve le four de trempe, est parfaitement close (pas de courant d'air), donc le transfert de chaleur pour notre cas s'effectue par convection naturel.

Quelle que soit le type de convection (libre ou forcé) et quelle que soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), le flux thermique transféré du fluide chaud au fluide froid est donné par la relation :

$$\varphi_h = K S DT$$

φ : (Lettre grecque phi) est en watt (W) ;

K : Le coefficient d'échange global, en watt par mètre carré et par kelvin ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) ;

S : Surface d'échange ;

DT : Différence entre la température intérieure du four et la température extérieure ambiante.

On ce qui concerne le rayonnement, le transfert de chaleur est provoqué par émission de lumière infrarouge (invisible à l'œil humain), lumière composée de photons qui transmettent leur énergie à tous les objets environnants. Ce transfert de chaleur est le seul à se réaliser dans le vide, cas du rayonnement solaire arrivant sur Terre. Néanmoins, celui-ci se réalise aussi dans les fluides (l'air par exemple) et dans certains solides (verre). La loi de Stefan-Boltzmann (ou loi de Stefan) permet de quantifier ces échanges. Le flux émis (rayonné) par un corps est donné par la relation :

$$\varphi_r = \epsilon S \sigma T^4$$

ϵ : Émissivité indice valant 1 pour un corps noir et qui est compris entre 0 et 1 selon l'état de surface du matériau (pour notre cas on va supposer que le four de trempe est un corps noir);

S : Superficie du corps ;

σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($5,6703\cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$) ;

T : Température du corps (en kelvin).

IV.3.1. Les pertes par les ouvertures dans les deux façades frontales :

Chacune des façades frontale contient trois ouvertures (fig.38) : deux portes visite (généralement fermés), une porte d'enfournement pour le coté amont du four et une porte de défournement pour le coté aval.

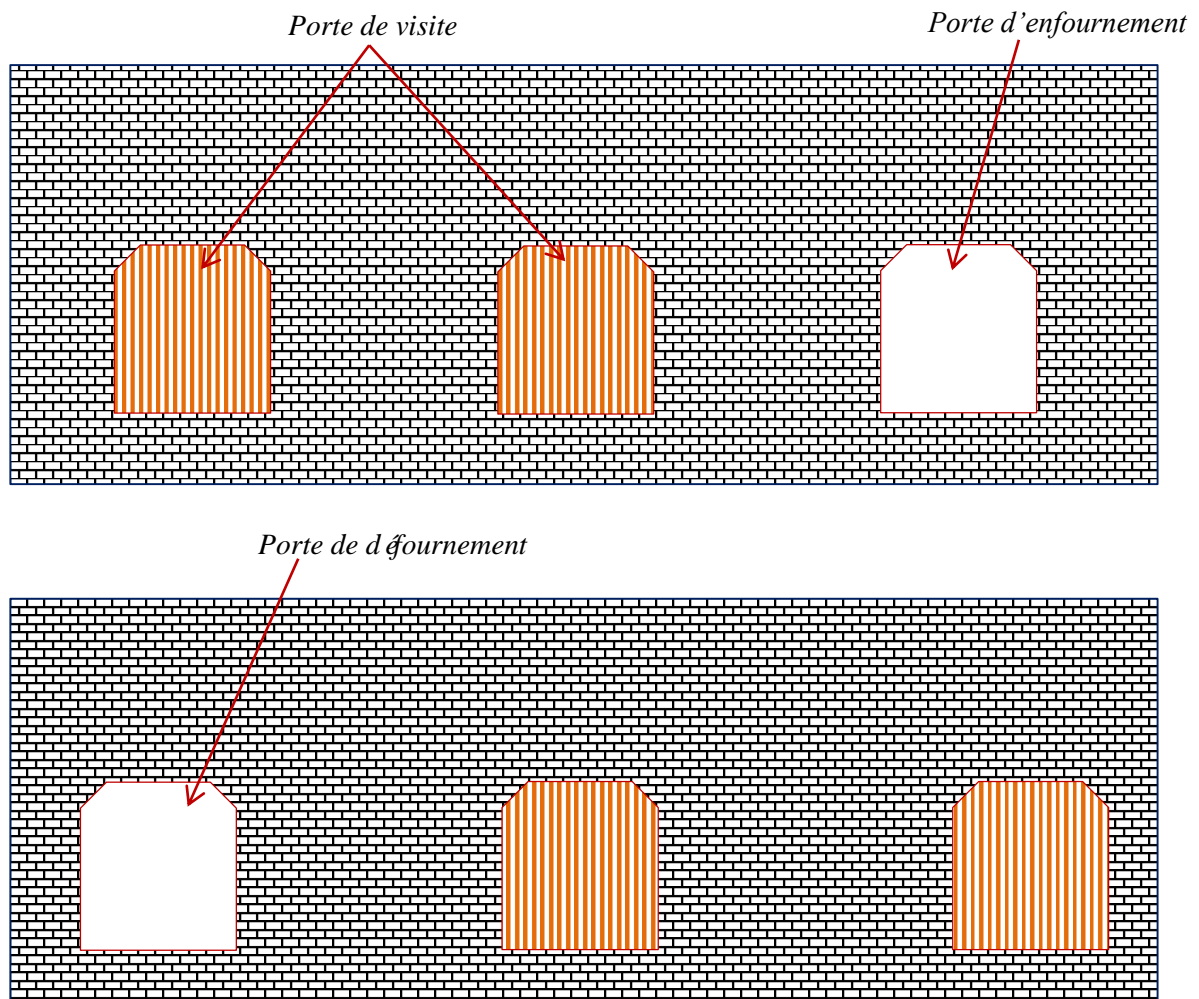
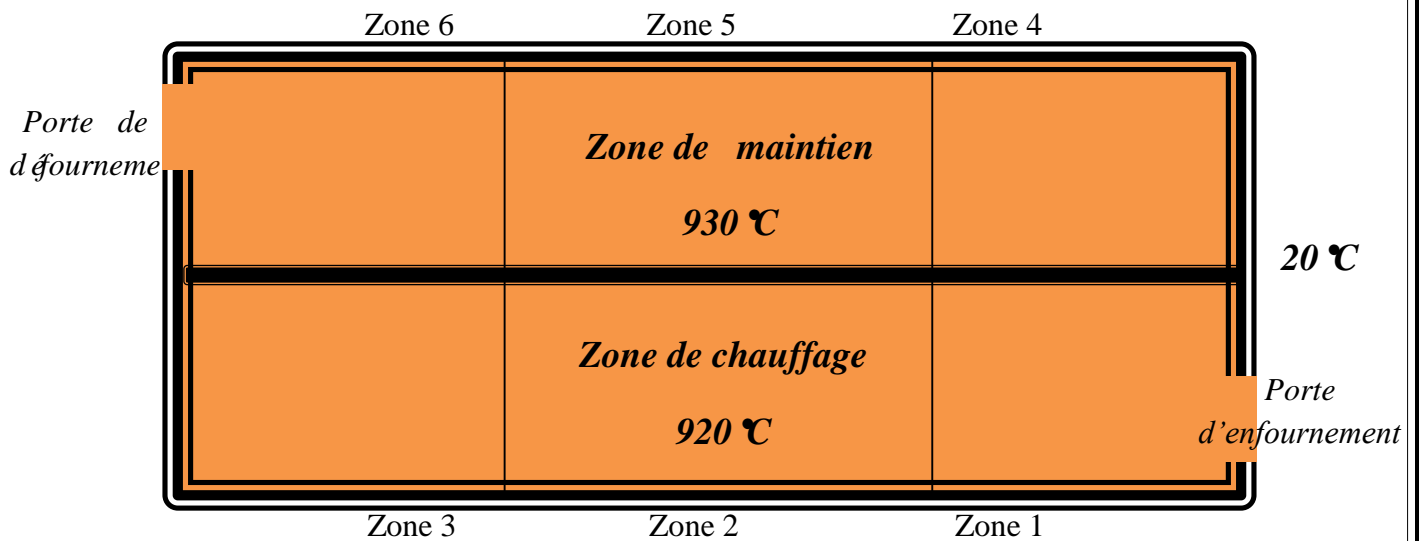


Figure 38 : Représentation deux façades frontales du four de trempe

Les deux portes d'enfournement et de défournement sont caractérisées par l'ouverture et la fermeture manuelles et elles sont ouvertes au cours de l'année pour faciliter le processus d'enfournement et de défournement, ce qui engendre des pertes énergétiques énormes.

A. Répartition de la température dans le four de trempe :



AUDIT TECHNOLOGIQUE TTH

Commande : S.67041,01
Format : 273.1 x 8,7

Nuance X52 Q (Tube ostrava)

AcelorMittal
Acelor Mittal Pipes & Tubes Algeria
Sce MTD / Dept Technique

TEMPÉRATURE	ZONE DE CHAUFFAGE			ZONE DE MAINTIEN			Pression Four Pa	Température Tube °C	Cadence Excentrique
	ZONE 1	ZONE 2	ZONE 3	ZONE 4	ZONE 5	ZONE 6			
PRÉVUE	920	920	920	930	930	930	5	900/910	31,9
RÉELLE	915	908	916	929	924	930	4,81	902	64

Figure 39 : Représentation de la température de chaque zone du four de trempe selon ArcelorMittal Pipes et Tubes Algérie

D'après la fig.39, la différence de température pour les deux portes est :

Porte d'enfournement : $DT_1 = T_{int} + T_{ext} = 915 - 20 = 895^{\circ}C$

$DT_1=1168 \text{ K}$

Porte de d'effournement : $DT_2 = T_{int} + T_{ext} = 930 - 20 = 910^{\circ}C$

$DT_2=1183 \text{ K}$

On ce qui concerne le rayonnement, les températures sont les suivantes :

Porte d'enfournement : $T_{z1} = 920^{\circ}C = 1193^{\circ}K$

Porte de d'effournement : $T_{z2} = 930^{\circ}C = 1203^{\circ}K$

B. La surface d'échange :

- La surface d'échange théorique (sur les plans) : (fig.40 et fig.44)

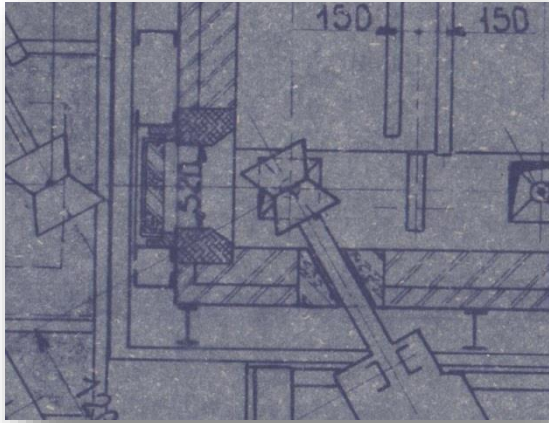


Figure 40 : La porte vue en plan
 $L=520\text{ mm}$

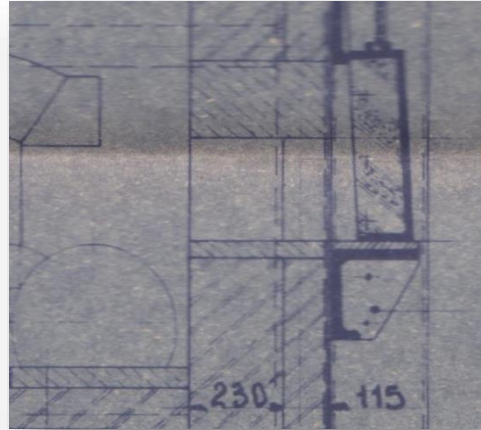


Figure 41 : Coupe transversale
de La porte $l = 300\text{ mm}$

$$S_{th} = l * L = 0.52\text{m} * 0.3\text{m} = 0.156\text{ m}^2$$

$$S_{th} = 0.156\text{ m}^2$$

- La surface d'échange réelle (fig.42) :

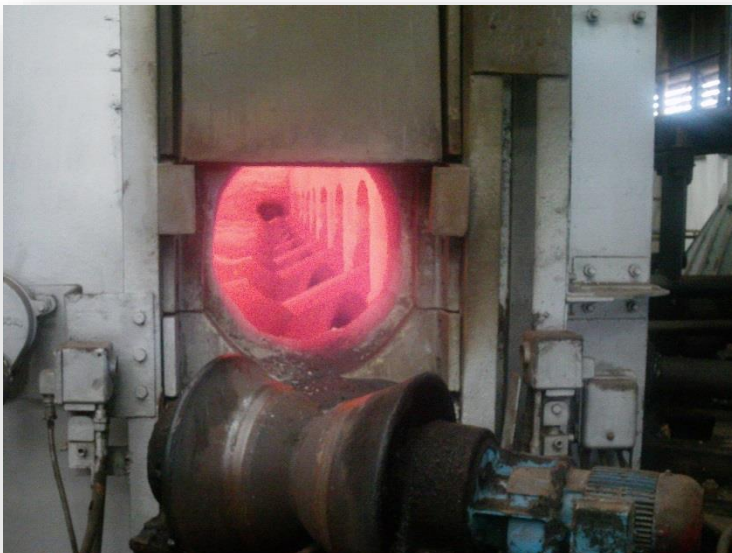


Figure 42 : La porte d'enfournement du four de
trempé de la tuberie sans soudure

La surface d'échange réelle est sous une forme circulaire, donc :

$$S_r = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$S_r = \frac{3.14 * 0.52^2}{4} = 0.212\text{ m}^2$$

Les surfaces des deux portes, enfournement et défournement sont identiques.

C. Le coefficient d'échange convectif :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_f}}$$

h_c : Coefficient de convection du fluide chaud ;

λ : Conductivité thermique de l'air (w/m°K) ;

h_f : Coefficient de convection du fluide froid ;

e : L'épaisseur des deux portes (en mètre).

$$\frac{1}{hS} : R \text{ résistance thermique convective ;}$$
$$\frac{e}{\lambda S} : R \text{ résistance thermique de conduction.}$$

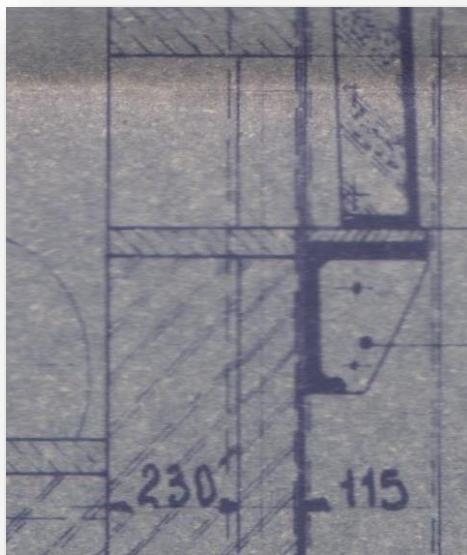


Figure 43 : L'épaisseur des portes en millimètre

D'après la fig.43, on obtient :

$$e = 230 + 115 = 345 \text{ mm}$$

A 273°K la conductivité thermique de l'air est : 0.024 w/m K

➤ Au niveau de la porte d'enfournement la température est : 915 °C 1188 K donc :

$$\lambda_1 = 0.1044 \text{ W/m K}$$

➤ Au niveau de la porte de défournement la température est : 930 °C 1203 K donc :

$$\lambda_2 = 0.1057 \text{ W/m K}$$

Lors d'une convection libre :

Le coefficient de convection de l'air chaud est $25 \text{ w/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$;

Le coefficient de convection de l'air froid est $5 \text{ w/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$;

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_f}} = \frac{1}{\frac{1}{25} + \frac{0.345}{0.0723} + \frac{1}{5}} = 0.1995 \frac{\text{w}}{\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{K}}$$

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_f}} = \frac{1}{\frac{1}{25} + \frac{0.345}{0.1057} + \frac{1}{5}} = 0.2853 \frac{\text{w}}{\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{K}}$$

$\Phi_{hf} = K S DT$		
	Porte d'enfournement	Porte de d'fournement
K $[\text{W}/\text{m}^2\text{ }^\circ\text{K}]$	0.1995	0.2853
S $[\text{m}^2]$	0.212	
DT $[\text{ }^\circ\text{K}]$	1168	1183
Φ_h [W]	49.39	71.55
Φ_h $[\text{cal}/\text{s}]$	11.80	17.1

Tableau 8: Calcule de l'énergie perdu par convection à travers les ouvertures des deux façades frontales (1 watt =0.239005736 calories / second)

Énergie perdue par convection	
Quantité d'énergie perdue par la porte d'enfournement	Quantité d'énergie perdue par la porte de d'fournement
11.8 $[\text{cal}/\text{s}]$	17.1 $[\text{cal}/\text{s}]$
708 $[\text{cal}/\text{min}]$	1 026 $[\text{cal}/\text{min}]$
42 480 $[\text{cal}/\text{h}]$	61 560 $[\text{cal}/\text{h}]$
1 019 520 $[\text{cal}/\text{j}]$	1 477 440 $[\text{cal}/\text{j}]$
30 585.6 $[\text{Kcal}/\text{moi}]$	44 323.2 $[\text{Kcal}/\text{moi}]$
367 027.2 $[\text{Kcal}/\text{an}]$	531 878.4 $[\text{Kcal}/\text{an}]$
$\Phi_{hf} = 898 905.6 \text{ } [\text{Kcal}/\text{an}]$	

Tableau 9: Quantit éd'énergie totale perdue par convection à travers les ouvertures des deux façades frontales

$\varphi_{rf} = \epsilon S \sigma T^4$		
	<i>Porte d'enfournement</i>	<i>Porte de d'effournement</i>
ϵ Émissivité	1	
S [m ²]	0.212	
σ [W/m ² K ⁴]	5,6703. 10 ⁻⁸	
T [°K]	1193	1203
φ_r [W]	24 350.26	25 177.02
φ_r [cal/s]	5 819.85	6 017.45

Tableau 10 : Récapitulation des résultats concernant les ouvertures des deux façades frontales et calcul de l'énergie perdu par convection à travers ces ouvertures.

<i>Énergie perdue par rayonnement</i>	
<i>Quantité d'énergie perdue par la porte d'enfournement</i>	<i>Quantité d'énergie perdue par la porte de d'effournement</i>
5 819.85 [cal/s]	6 017.45 [cal/s]
349 191 [cal/min]	361 047 [cal/min]
20 951 460 [cal/h]	21 662 820 [cal/h]
502 835.04 [Kcal/j]	519 907.68 [Kcal/j]
15 085 051.2 [Kcal/moi]	15 597 230.4 [Kcal/moi]
181 020 614.4 [Kcal/an]	187 166 764.8 [Kcal/an]
$\varphi_{rf} = 368 187 379.2$ [Kcal/an]	

Tableau 11 : Quantité d'énergie totale perdue par rayonnement à travers les ouvertures des deux façades frontales

IV.3.2. Les pertes par les ouvertures dans les deux façades latérales Q_{HL} :

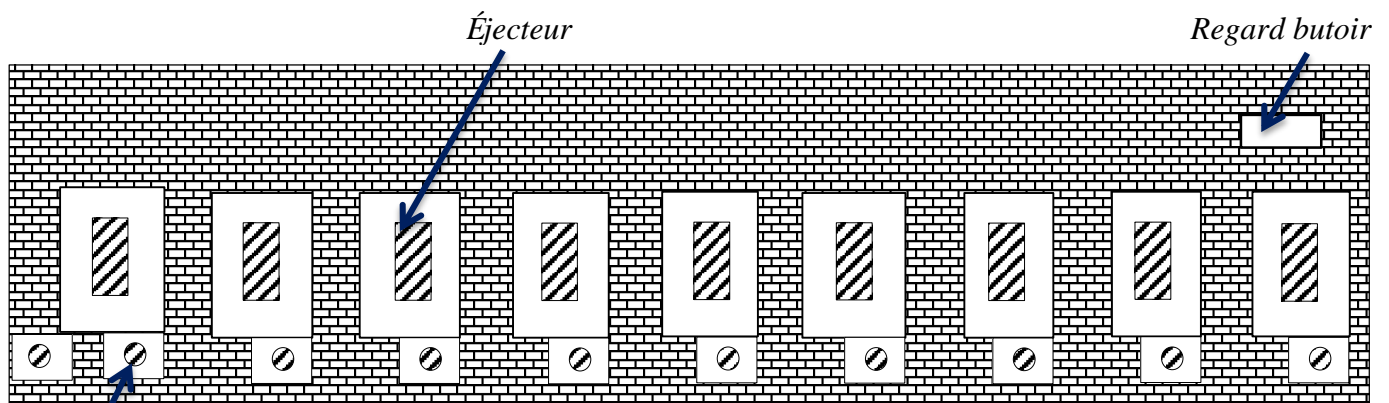


Figure 44 : Ouverture d'éjecteur et arbre de rouleau



Figure 45 : Regard butoir

Les ouvertures dans les deux façades latérales sont conçues principalement pour la pénétration des arbres des rouleaux, et aussi les éjecteurs (fig.44). On ce qui concerne la façade latérale coté enfournement (fig.46), elle contient 9 éjecteurs, 10 rouleaux et un regard butoir (fig.45). Par contre la façade latérale coté défournement contient uniquement 9 rouleaux (fig.47).



Arbres de rouleau

Figure 46 : façades latérales coté enfournement

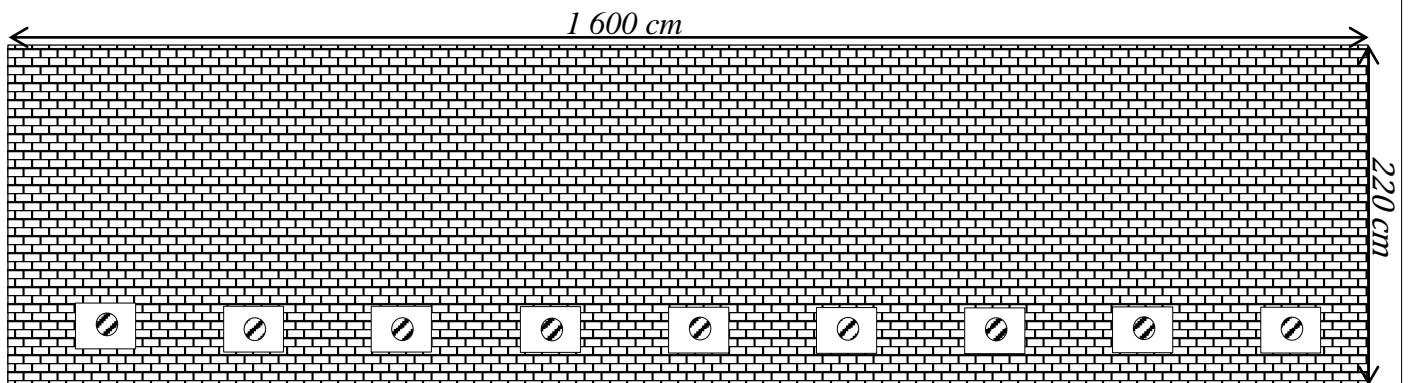


Figure 47: façades latérales coté défournement

A. La différence de température :

Coté enfournement : $DT_1 = T_{int} + T_{ext} = 915 - 20 = 895^{\circ}C$

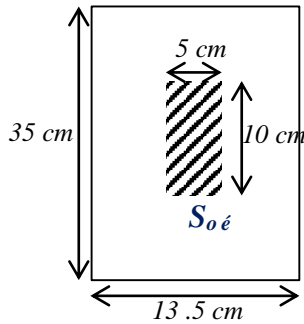
$DT_1 = 1168 \text{ K}$

Coté défournement : $DT_2 = T_{int} + T_{ext} = 930 - 20 = 910^{\circ}C$

$DT_2 = 1183 \text{ K}$

B. La surface d'échange :

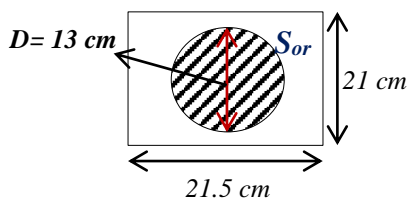
Ouverture des éjecteurs :



$S_{oé} = (35 * 13.5) - (5 * 10) = 422.5 \text{ cm}^2$

$S_{oé} = 0.04225 \text{ m}^2$

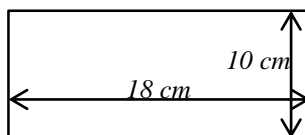
Ouverture des rouleaux :



$S_{or} = (21 * 21.5) - \left(\frac{\pi * D^2}{4}\right) = 318.835 \text{ cm}^2$

$S_{or} = 0.0318835 \text{ m}^2$

Regard butoir :



$S_{rb} = (10 * 18) = 180 \text{ cm}^2$

$S_{rb} = 0.018 \text{ m}^2$

Surface d'échange coté enfournement :

$S_{ée} = (S_{oé} * 9) + (S_{or} * 10) + S_{rb} = 0.717 \text{ m}^2$

Surface d'échange coté défournement :

$S_{éd} = (S_{or} * 9) = 0.286 \text{ m}^2$

$\varphi_{hl} = H S DT$		
	Cot é enfournement	Cot é d' enfournement
K $[W/m^2 \cdot K]$	0.1995	0.2853
S $[m^2]$	0.717	0.286
DT $[K]$	1168	1183
φ [W]	167.07	96.52
φ [cal/s]	39.93	23.07

Tableau 12 : Récapitulation des résultats concernant les ouvertures des deux façades latérale et calcul de l'énergie perdu par convection à travers ces ouvertures

Énergie perdue par convection	
Quantité d'énergie perdue cot é enfournement	Quantité d'énergie perdue cot é d' enfournement
39.93 [cal/s]	23.07 [cal/s]
2 395.8 [cal/min]	1 384.20 [cal/min]
143 748 [cal/h]	83 052.54 [cal/h]
3 449 952 [cal/j]	1 993 261.107 [cal/j]
103 498.56 [Kcal/moi]	59 797.833 [Kcal/moi]
1 241 982.72 [Kcal/an]	717 573.99 [Kcal/an]
$\varphi_{hl} = 1\,959\,556.71$ [Kcal/an]	

Tableau 13 : Quantité d'énergie totale perdue par convection à travers les ouvertures des deux façades latérale

$\varphi_{rl} = \epsilon S \sigma T^4$		
	<i>Cot enfournement</i>	<i>Cot éd fournement</i>
ϵ Émissivité	1	
S [m ²]	0.717	0.286
σ [W/m ² K ⁴]	5, 6703. 10 ⁻⁸	
T [°K]	1193	1203
φ_r [W]	82 354.43	33 965.23
φ_r [cal/s]	19 683.18	8 117.88

Tableau 14 : Récapitulation des résultats concernant les ouvertures des deux façades latérales et calcul de l'énergie perdue par rayonnement à travers ces ouvertures

<i>Énergie perdue par rayonnement</i>	
<i>Quantité d'énergie perdue par la porte d'enfournement</i>	<i>Quantité d'énergie perdue par la porte de d fournement</i>
19 683.18 [cal/s]	8 117.88 [cal/s]
1 180 990.8 [cal/min]	487 073.1 [cal/min]
70 859 448 [cal/h]	29 224 386.57 [cal/h]
1 700 626.752 [Kcal/j]	701 385.27 [Kcal/j]
51 018 802.56 [Kcal/moi]	21 041 558.33 [Kcal/moi]
612 225 630.7 [Kcal/an]	252 498 700 [Kcal/an]
$\varphi_{rl} = 864 724 330.7$ [Kcal/an]	

Tableau 15 : Quantité d'énergie totale perdue par rayonnement à travers les ouvertures des deux façades latérales

IV.4. Détermination des pertes par les parois Q_K :

Au niveau des parois du four le transfert de chaleur s'effectue par conduction, ce transfert de chaleur résulte d'un transfert d'énergie cinétique d'une molécule à une autre molécule adjacente. Ce mode de transfert est le seul à exister dans un solide opaque. Pour les solides transparents, une partie de l'énergie peut être transmise par rayonnement. Avec les fluides que sont les gaz et les liquides, la convection et le rayonnement peuvent se superposer à la conduction.

La conduction ne peut exister que s'il existe des écarts de températures, c'est-à-dire si le gradient de température n'est pas nul. Dans le cas contraire le milieu est en équilibre thermique et aucun transfert de chaleur ne peut se produire. Pour s'assurer qu'il existe vraiment un transfert de chaleur au niveau des parois du four de trempe, on va effectuer une simulation dont la quelle on va prouver que notre système n'est pas en équilibre thermique et qu'il existe bien une propagation de la chaleur.

IV.4.1. Simulation de la conduction dans une paroi du four :

Le logiciel qu'on a utilisé pour effectuer la simulation de la conduction et la propagation de la chaleur est nommé :

« Abaqus »

A. Présentation générale d'Abaqus [30] :

ABAQUS est un logiciel de calcul éléments finis développé par Dassault Systèmes.

Il se compose de trois produits : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE.

- ABAQUS/Standard est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite.
- Le solveur ABAQUS/Explicit emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi statiques non linéaires.
- ABAQUS/CAE constitue une interface intégrée de visualisation et de modification pour lesdits solveurs.

Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et/ou optionnels, spécifiques à certaines applications. Les produits ABAQUS, ABAQUS/CAE notamment, sont écrits intégralement avec les langages C++ et Fortran pour les parties calcul et Python pour les scripts et les paramétrisations. La gestion de l'interface graphique est assurée par FOX Toolkit.

ABAQUS est très largement utilisé dans les industries automobiles et aéronautiques. En raison du large spectre de ses capacités d'analyse et de sa bonne ergonomie, il est également très populaire dans les milieux universitaires, pour la recherche et l'éducation.

ABAQUS fut d'abord conçu pour analyser les comportements non-linéaires. Il possède en conséquence une vaste gamme de modèles de matériau. Ses modélisations d'élastomères, en particulier, méritent d'être reconnues.

B. Les étapes à suivre :

Les étapes suivies sont résumées comme suit :

La première étape consiste à dessiner avec le logiciel la paroi du four qui a pour dimension :

Longueur : 875 cm

Largeur : 220 cm

Épaisseur : 34.5 cm

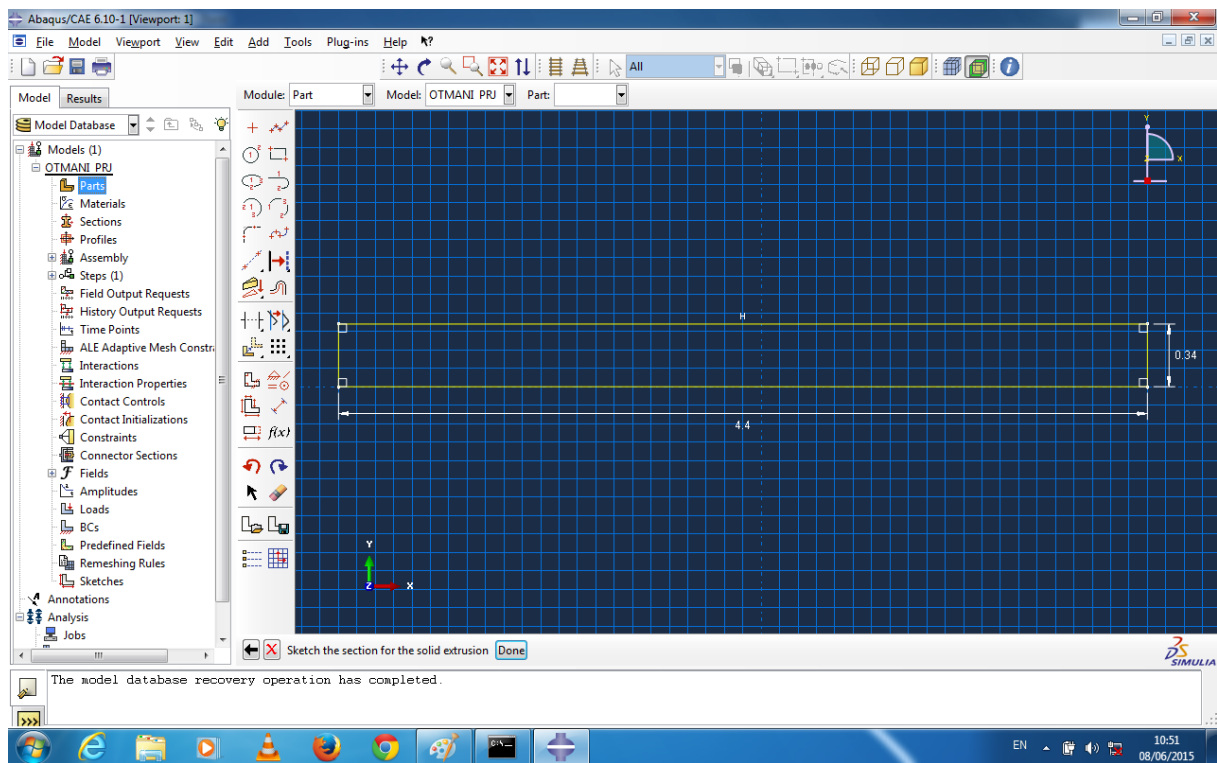


Figure 48 : Dimensionnement de la paroi considérée (mur du four)

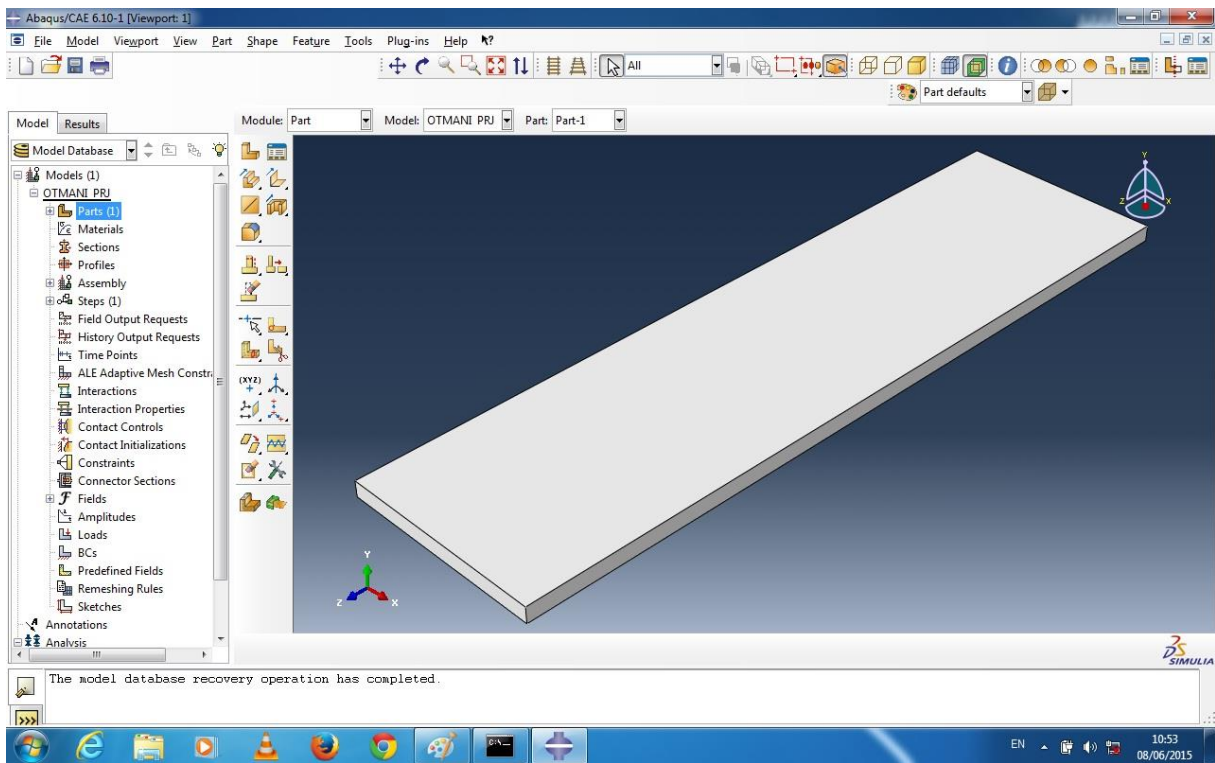


Figure 49 : Paroi du four après dimensionnement

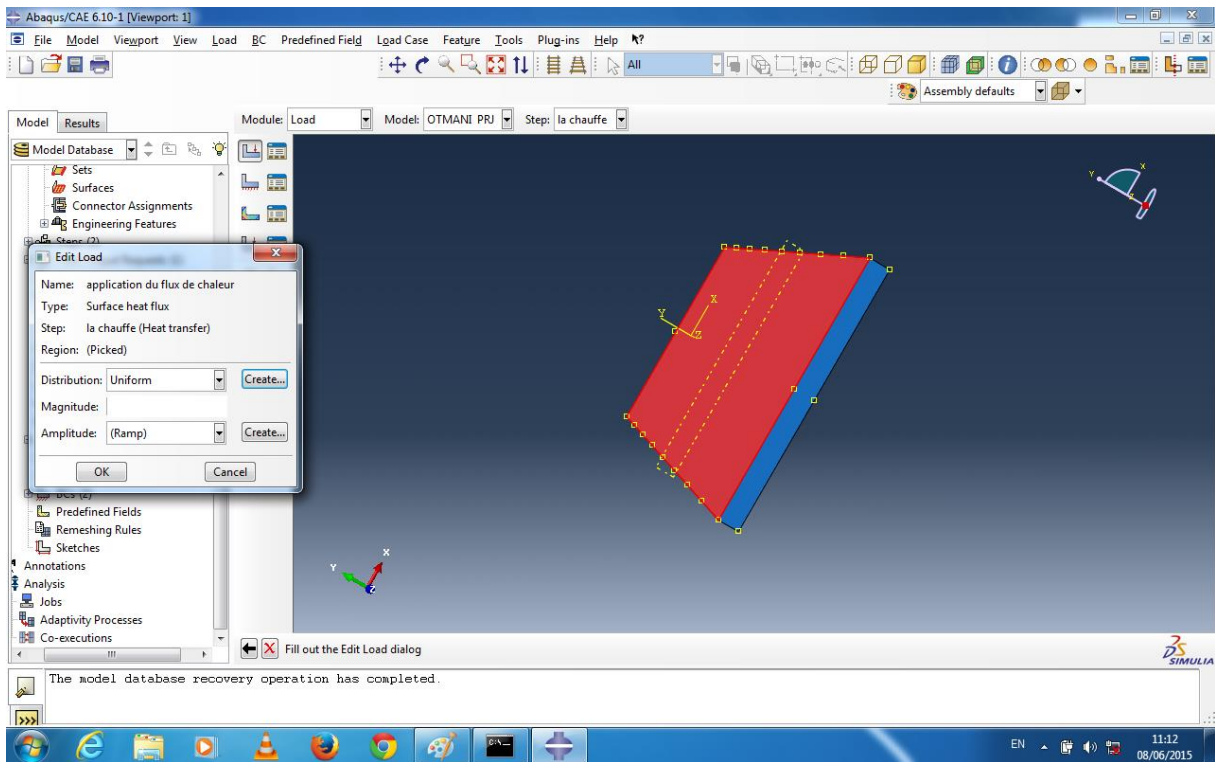


Figure 50 : Application du flux de chaleur sur la surface intérieure

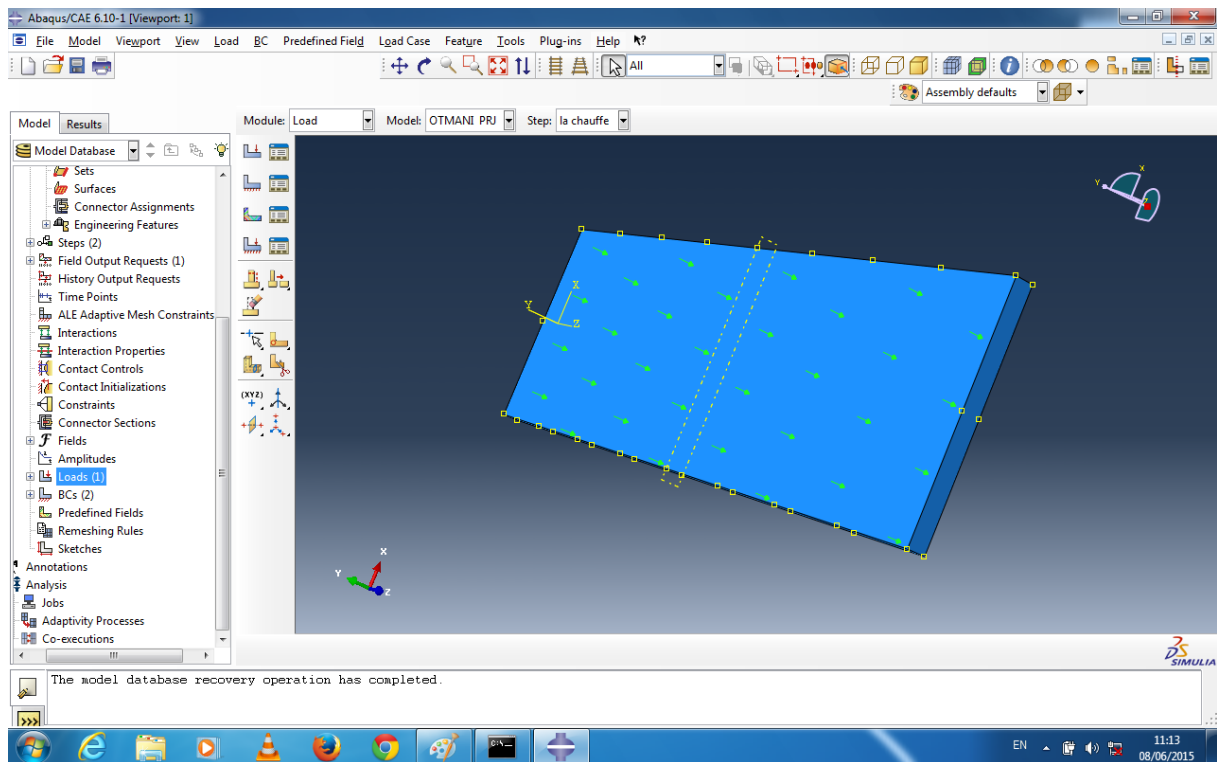


Figure 51 : Paroi soumise au flux de chaleur (flèches vertes)

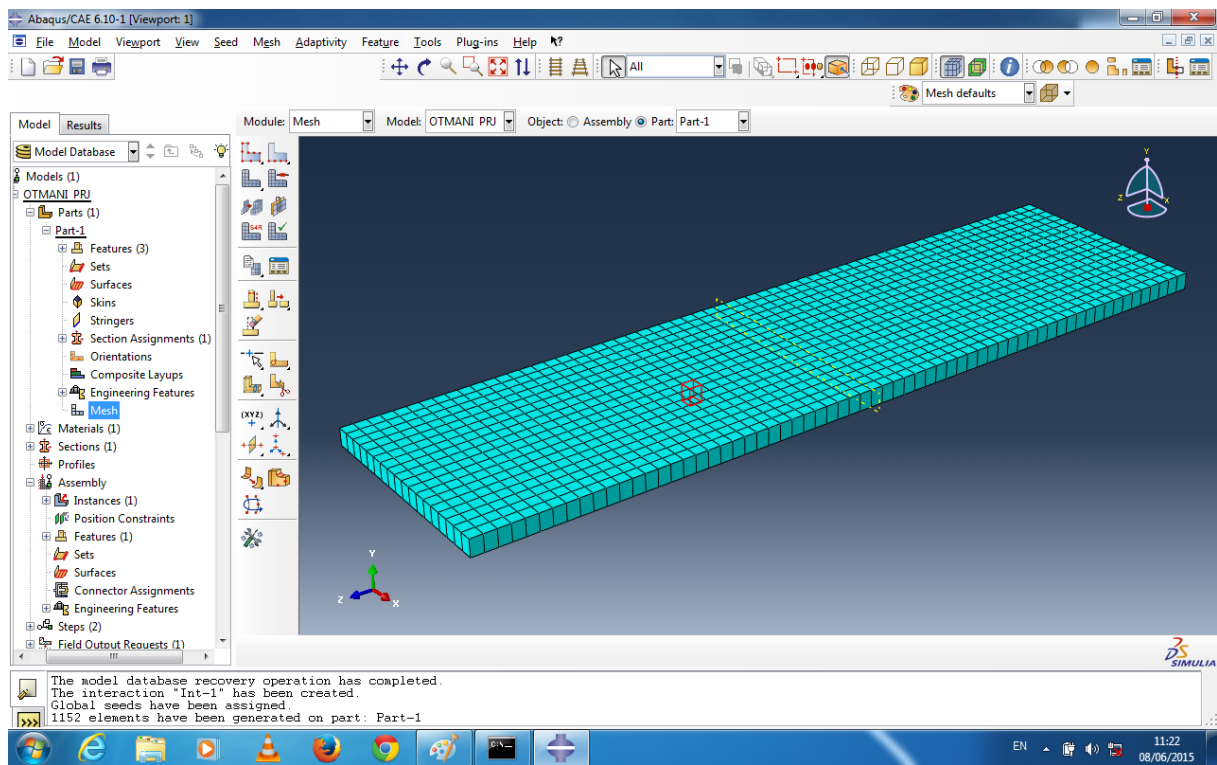


Figure 52 : Discrétisation de la paroi en éléments finies

C. Résultat obtenue :

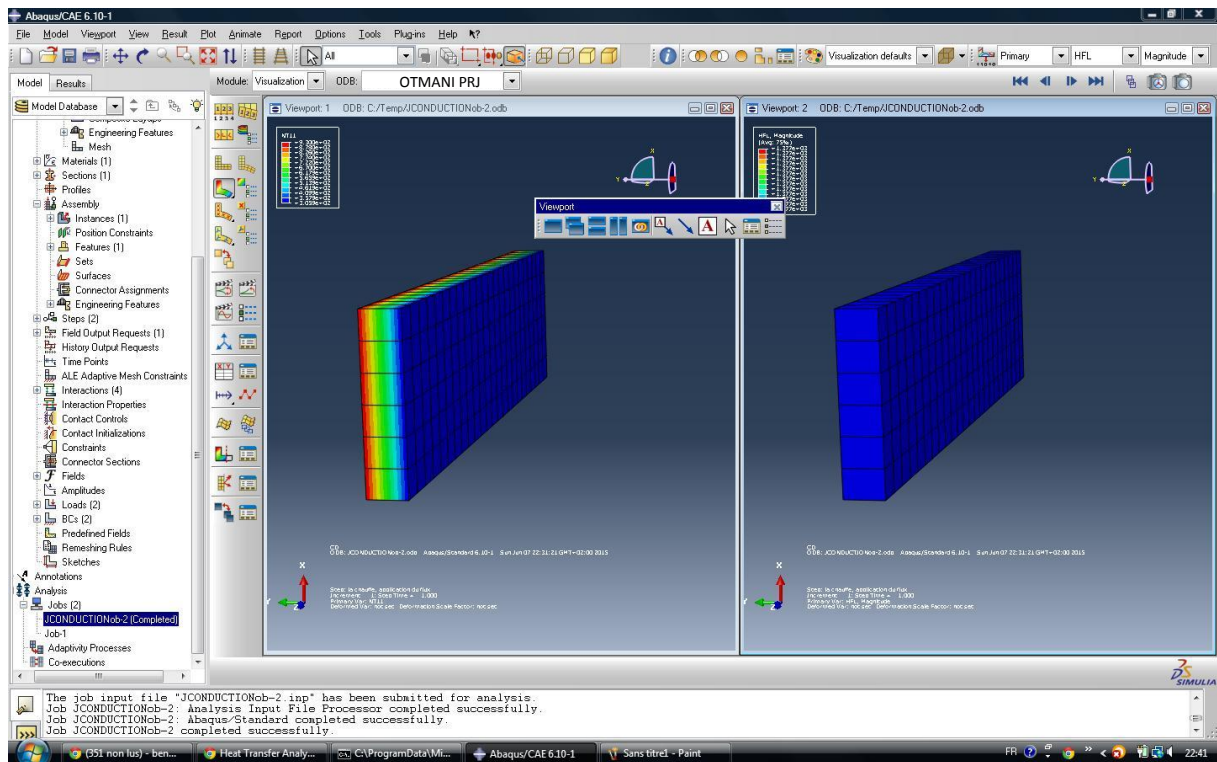


Figure 53 : Paroi avant l'application du flux de chaleur et après une durée d'exposition au flux de chaleur

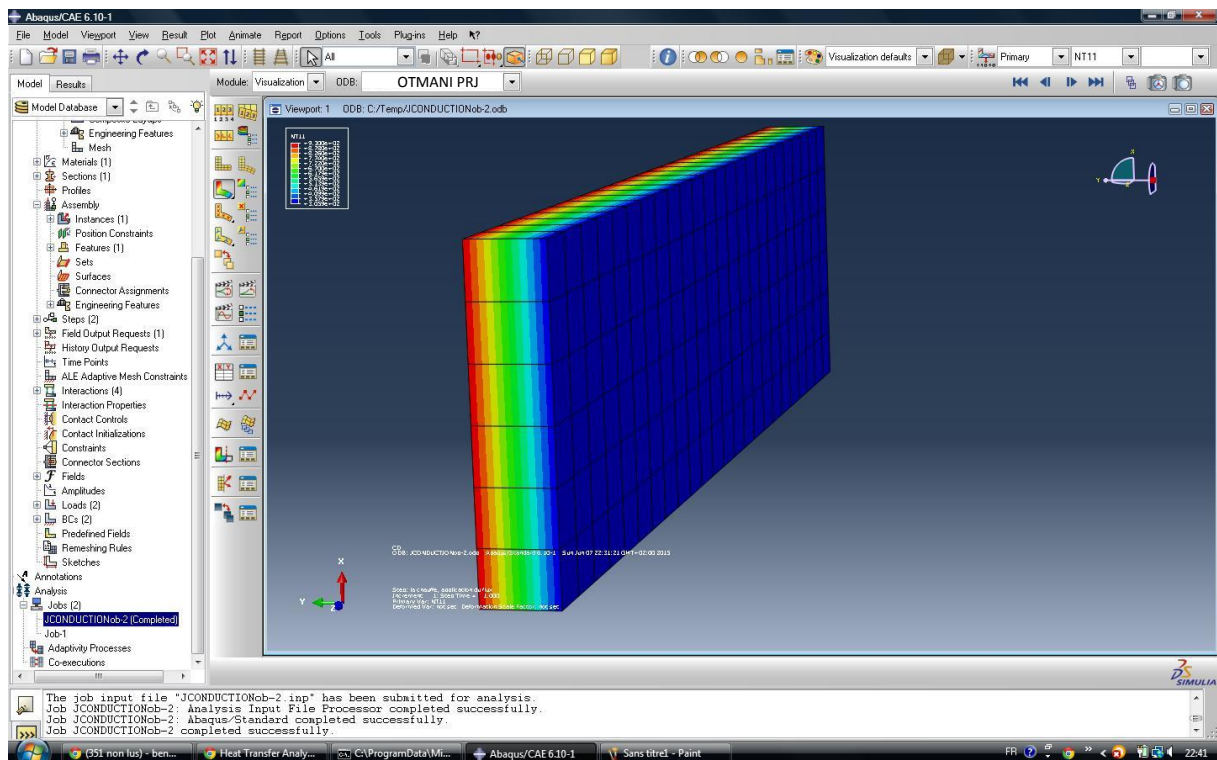


Figure 54 : Propagation de la chaleur à travers l'épaisseur de la paroi

La propagation de la chaleur à travers les parois du four (murs, voute et sole), est une source de perte énergétique, pour déterminer ces pertes on applique la relation :

$$Q_K = K S DT \quad \text{avec} \quad K = \frac{1}{\left(\sum \frac{e_i}{\lambda_i}\right) + \left(\frac{1}{K_e}\right)}$$

e_i : Épaisseur des i couches successives de réfractaires ou d'isolants ;

λ_i : Conductivité thermique des i couches successives de réfractaires ou d'isolants ;

K_e : Coefficient d'échange de la paroi externe avec l'ambiance.

IV.4.2. Détermination des pertes par les murs Q_{Km} :

A. Calcul du coefficient K de chaque mur :

Les murs du four de trempe ont la même composition et la même épaisseur (fig.55). Ils sont constitués de deux couches formant une épaisseur de 345 mm répartis comme suit :

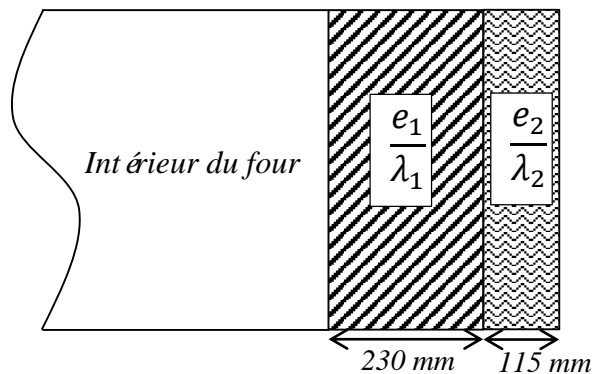




Figure 55: Représentation de l'épaisseur et la composition des murs du four de trempe

 Réfractaires isolant JMF750, $d=0.75$, $\lambda_1 = 0.928 \text{ W/m}^\circ\text{C}$; $e_1 = 0.23 \text{ mm}$

 Isolant types UAB $d=0.5$, $\lambda_2 = 0.58 \text{ W/m}^\circ\text{C}$; $e_2 = 0.115 \text{ mm}$

- Le coefficient d'échange de la paroi externe avec l'ambiance est $6.25 \text{ W/m}^2\text{K}$ soit $1712.5 \text{ W/m}^2\text{C}$

Donc :

$$\sum \frac{e_i}{\lambda_i} = \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} = \frac{0.230}{0.928} + \frac{0.115}{0.58} = 0.4461$$

$$\frac{1}{K_e} = \frac{1}{1712.5} = 5.83 * 10^{-4}$$

Alors :

$$K_{mur} = \frac{1}{\left(\sum \frac{e_i}{\lambda_i}\right) + \left(\frac{1}{K_e}\right)} = \frac{1}{(0.4461) + (5.83 * 10^{-4})} = 2.23$$

$$K_{mur} = 2.23 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

B. Calcul de la surface d'échange de chaque mur :

La surface d'échange de chaque mur est égale à la surface de la façade moins la surface des ouvertures, on ce qui concerne les deux façades frontales, elles ont la même surface (fig.56) qui est égale à la surface de la façade moins la surface de la porte (enfournement ou d'effournement).

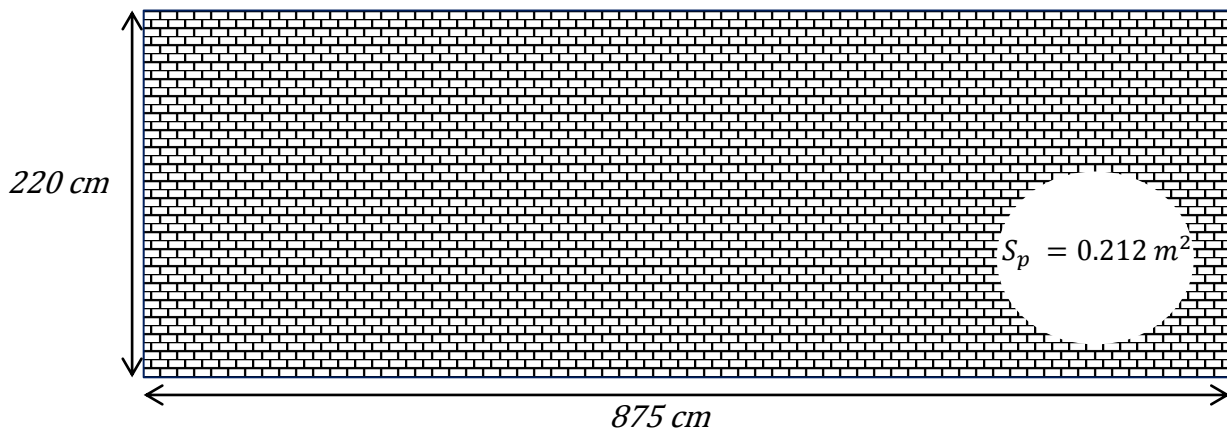


Figure 56: La façade frontale, coté enfournement du four de trempé

Donc :

$$S_{ff} = S_f - S_p = (8.75 * 2.20) - 0.212 = 19.038 \text{ m}^2$$

$$S_{ff} = 19.038 \text{ m}^2$$

Les deux surfaces des deux façades latérales sont déterminées par le même principe :

- Surface d'échange de la façade latérale coté enfournement (fig.46) :

$$S_{fl1} = S_f - S_{\acute{e}e} = (16 * 2.2) - (0.717) = 34 \text{ m}^2$$

$$S_{fl1} = 34 \text{ m}^2$$

- Surface d'échange de la façade latérale coté défournement (fig.47) :

$$S_{fl2} = S_f - S_{\acute{e}d} = (16 * 2.2) - (0.286) = 35 \text{ m}^2$$

$$S_{fl2} = 35 \text{ m}^2$$

C. Calcul de la différence de température (DT) :

La température moyenne à l'intérieur du four de trempe est estimée à 925°C, et la température à l'extérieur du four c'est la température ambiante 20°C. Donc la différence de température est :

$$DT = 925 - 20 = 905 \text{ }^\circ\text{C}$$

$Q_{Km} = K_m S_m DT$				
	Q_{c1} (mur frontale coté enfournement)	Q_{c2} (mur frontale coté défournement)	Q_{c2} (mur latérale coté enfournement)	Q_{c3} (mur latérale coté défournement)
K_m [W/m ² °C]	2.23			
S_m [m ²]	19.038		34	35
DT [°C]	905			
Q [W]	38 421.5397	38 421.5397	68 617.1	70 635.25
Q [cal/s]	9 182.96	9 182.96	16 399.88	16 882.23
Q_{Km} [cal/s]	51 648.03			

Tableau 16 : Récapitulation des résultats concernant les murs du four

Unités	Quantités d'énergie totale perdue par les murs Q_{Km}
[cal/s]	51 648.03
[cal/min]	3 098 894.196
[cal/h]	185 933 726.1
[Kcal/j]	4 462 416.566
[Kcal/moi]	133 872 630.9
[Kcal/an]	$Q_{Km} = 1\ 606\ 471\ 570$

Tableau 17 : Quantités d'énergie totale perdue par les murs du four

IV.4.3. Détermination des pertes par la sole Q_{KS} :

A. Calcul du coefficient K de la sole :

La sole du four de trempe est constituée de quatre couches qui forment une épaisseur de 325 mm répartie comme suit :

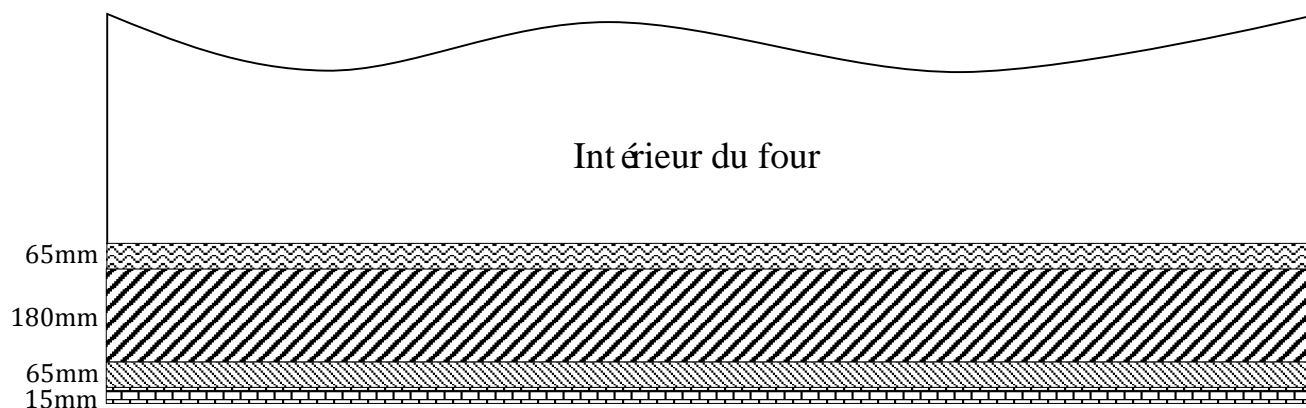


Figure 57 : Représentation de l'épaisseur et la composition de la sole du four de trempe

$$e_1 = 0.065 \text{ m} \quad \text{pour} \quad \lambda_1 = 1.508 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$e_2 = 0.180 \text{ m} \quad \text{pour} \quad \lambda_2 = 0.928 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$e_3 = 0.065 \text{ m} \quad \text{pour} \quad \lambda_3 = 0.58 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$e_4 = 0.015 \text{ m} \quad \text{pour} \quad \lambda_4 = 0.208 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

➤ Le coefficient d'échange de la paroi externe avec l'ambiance est $5.93 \text{ W/m}^2\text{K}$ soit $1\,624.82 \text{ W/m}^2\text{C}$

Donc :

$$\sum \frac{e_i}{\lambda_i} = \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3} + \frac{e_4}{\lambda_4} = \frac{0.065}{1.508} + \frac{0.180}{0.928} + \frac{0.065}{0.58} + \frac{0.015}{0.208} = 0.4212$$

$$\frac{1}{K_e} = \frac{1}{1\,624.82} = 6.15 * 10^{-4}$$

$$K_{sole} = \frac{1}{\left(\sum \frac{e_i}{\lambda_i}\right) + \left(\frac{1}{K_e}\right)} = \frac{1}{(0.4212) + (6.15 * 10^{-4})} = 2.37$$

$$K_{sole} = 2.37 \text{ W/m}^2\text{C}$$

B. Calcul de la surface d'échange de la sole :

$$S_s = l * L = 8.75 * 16 = 140 \text{ m}^2$$

$$S_s = 140 \text{ m}^2$$

$Q_{KS} = H S DT$	
Caractéristique de la sole du four de trempe	
K [W/m ² K]	2.37
S [m ²]	140
DT [°K]	905
Q [W]	300 279
Q [cal/s]	71 768.4034

Tableau 18 : Récapitulation des résultats concernant la sole du four de trempe

Unités	Quantités d'énergie totale perdue par la sole
[cal/s]	71 768.4034
[cal/min]	4 306 121.429
[cal/h]	258 470 674
[Kcal/j]	6 203 296.275
[Kcal/moi]	186 098 858.3
[Kcal/an]	2 233 186 299

Tableau 19 : Quantité d'énergie perdue par la sole du four

IV.4.4. Détermination des pertes par la voute Q_{KV} :

A. Calcul du coefficient K de la voute :

La voute du four de trempe est constituée de deux couches dont l'épaisseur totale est de 400 mm réparties comme suit :

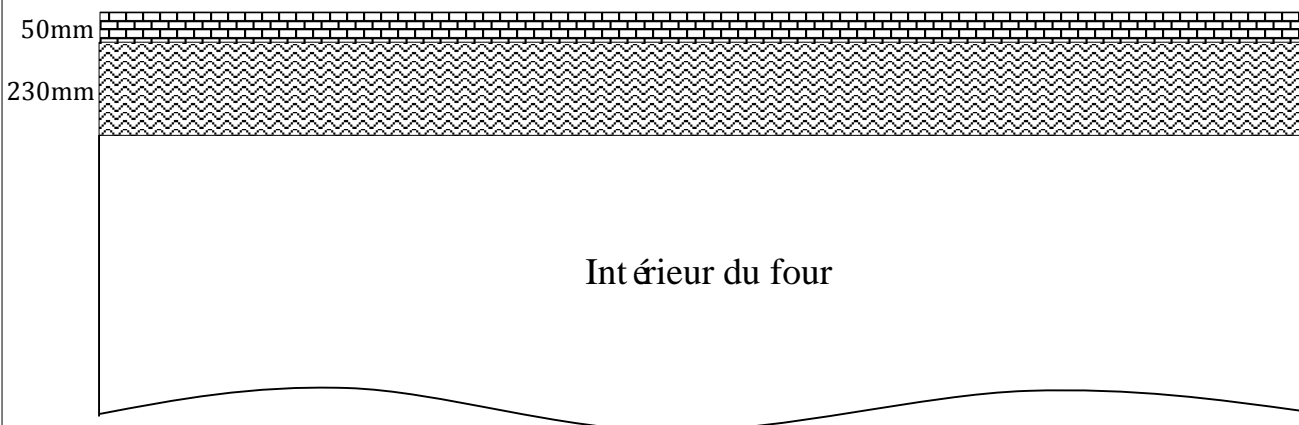


Figure 58 : Représentation de l'épaisseur et la composition de la voute du four de trempe

$$e_1 = 230 \text{ mm} \quad \text{pour } \lambda_1 = 1.508 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$e_2 = 50 \text{ mm} \quad \text{pour } \lambda_2 = 0.928 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

- Le coefficient d'échange de la paroi externe avec l'ambiance est $6.25 \text{ W/m}^2\text{K}$ soit $1712.5 \text{ W/m}^2\text{C}$

Donc :

$$K_{voute} = \frac{1}{\left(\sum \frac{e_i}{\lambda_i}\right) + \left(\frac{1}{K_e}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{0.23}{1.508}\right) + \left(\frac{0.05}{0.928}\right) + \left(\frac{1}{1712.5}\right)} = 4.87$$

$$K_{voute} = 4.87 \text{ W/m}^2\text{C}$$

La voute et la sole on la même surface d'échange qui est : 140 m^2

$Q_{KV} = H S DT$	
Caractéristique de la voute du four de trempe	
K [W/m ² K]	4.87
S [m ²]	140
DT [°K]	905
Q [W]	617 029
Q [cal/s]	147 473.4703

Tableau 20 : Récapitulation des résultats concernant la voute du four de trempe

Unités	Quantités d'énergie totale perdue par la voute
[cal/s]	147 473.4703
[cal/min]	8 848 411.756
[Kcal/h]	530 906.829
[Kcal/j]	12 741 763.9
[Kcal/moi]	382 252 916.9
[Kcal/an]	4 587 035 003

Tableau 21 : Quantité d'énergie perdue par la voute du four

IV.5. Calcul de la chaleur perdue par les fumées Q_f :

Considérons le four de trempe, un élément comprenant une seule zone, la chaleur perdue par les fumées est le produit du volume moyen des fumées fois la température des fumées et la chaleur spécifique des fumées (à la température de sortie).

$$Q_f = V_{mf} * T_f * C_f$$

Avec :

V_{mf} : Volume moyen des fumées issues du four ;

T_f : Température des fumées à la sortie du four ;

C_f : Chaleur spécifique des fumées à la température de sortie.

On ce qui concerne le four de trempe de la tuberie sans soudure, le volume des fumées est estimé à: $V_{mf} = 12.31 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ de GN}$

$$T_f = 703^\circ\text{C}$$

$$C_f = 0.28 \text{ Kcal}/\text{Nm}^3\text{C} = 0.26 \text{ Kcal}/\text{m}^3\text{C}$$

$$Q_f = 12.31 * 703 * 0.26 = 2\,287.57 \text{ Kcal}/\text{m}^3 \text{ GN}$$

$$Q_f = 12.31 * 703 * 0.28 = 2\,473 \text{ Kcal}/\text{Nm}^3 \text{ GN}$$

Les pertes horaires de fumées sont obtenues par le produit du débit horaire total du gaz naturel (voir IV.2.1.) en Nm^3/h aux pertes volumiques de fumées en $\text{Kcal}/\text{Nm}^3 \text{ GN}$:

$$Q_{TOT} = (38 * 24) + (10 * 24) = 1152 \text{ Nm}^3 \text{ GN}/\text{h} \quad (24 \text{ bruleurs dans chaque zone})$$

$$Q_{fT} = D_{TOT} * Q_f = 1152 * 2\,473 = 2848896 \text{ Kcal}/\text{h}$$

$$\mathbf{Q_{fT} = 2\,848\,896 \text{ Kcal}/\text{h}}$$

Unités	Quantités d'énergie totale perdue par les fumées
$[\text{Kcal}/\text{h}]$	2 848 896
$[\text{Kcal}/\text{j}]$	68 373 504
$[\text{Kcal}/\text{moi}]$	2 051 205 120
$[\text{Mcal}/\text{an}]$	24 614 461.44

Tableau 22 : Quantité d'énergie perdue par les fumées

Généralement il y a des pertes qu'on ne peut contrôler, en effet pour le cas du four de trempe, il s'agit des pertes causées par les défauts de construction (fig.59) et des pertes au niveau des linteaux ainsi qu'au niveau des joints d'eau... etc. Ces différentes pertes ne sont pas prises en considération dans cette étude. Donc l'énergie totale perdue par le four de trempe est déterminé par la sommation de toutes les pertes qu'on a évaluées :



$$Q_{TP} = \varphi_h + \varphi_r + Q_K + Q_f$$

L'énergie perdue par convection φ_h		L'énergie perdue par rayonnement φ_r	L'énergie perdue par conduction Q_K	
L'énergie perdue par les ouvertures des deux façades frontale	φ_{hf} 898 905.6 Kcal/an	φ_{rf} 368 187 379.2 Kcal/an	L'énergie perdue par les murs Q_{Km}	1 606 471 570 Kcal/an
L'énergie perdue par les ouvertures des deux façades latérale	φ_{hl} 1 959 556.71 Kcal/an	φ_{rl} 864 724 330.7 Kcal/an	L'énergie perdue par la sole Q_{KS}	2 233 186 299 Kcal/ans
			L'énergie perdue par la voute Q_{KV}	4 587 035 003 Kcal/an
$\varphi_h = 2 858 462.30$ Kcal/an		$\varphi_r = 1 232 911 710$ Kcal/an	$Q_K = 8 426 692 872$ Kcal/an	
L'énergie perdue par les fumées Q_f	24 614 461.44 Mcal/an			
L'énergie totale perdue par le four de trempe Q_{TP}	34 276 924.48 Mcal/an			

Tableau 23 : Récapitulation des résultats et détermination de l'énergie totale perdue par le four de trempe

Les quantités d'énergie annuel perdue par le four de trempe de la Tuberie Sans Soudure

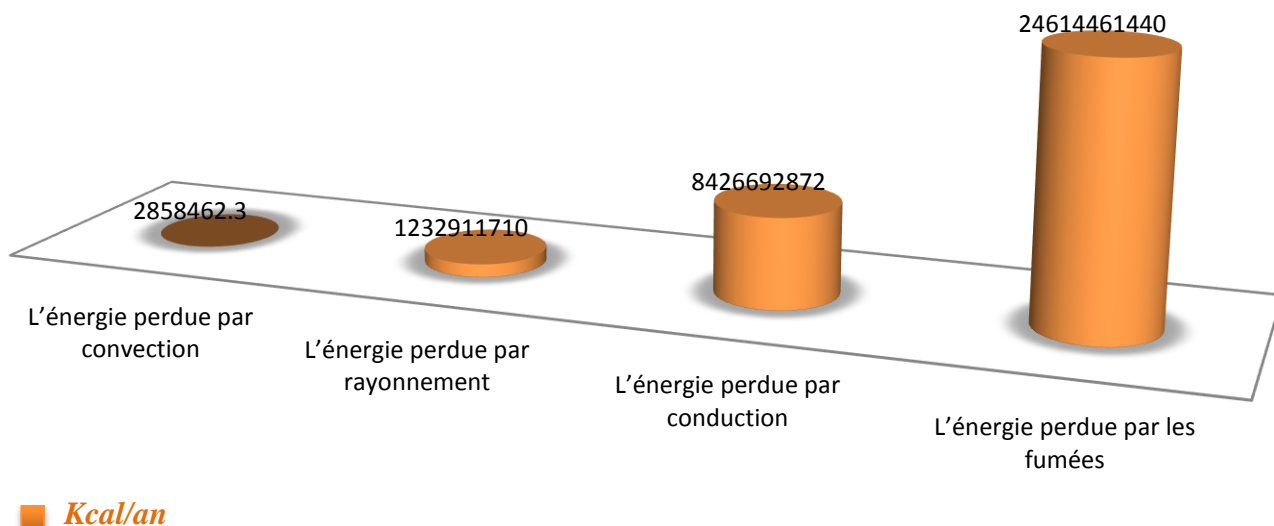


Figure 60 : Représentation graphique des pertes énergétiques du four de trempe, et leur source

La figure 60 montre que l'énergie perdue par les fumées représente la plus grande partie de l'énergie totale perdue et l'énergie perdue par conduction vient en second lieu, il est clair qu'elle est plus importante que l'énergie perdue par rayonnement et par convection étant donné que sa surface d'échange est considérable par rapport aux deux autres.

IV.6. Analyse et discussion des résultats :

En ce qui concerne les ouvertures du four, l'énergie perdue par convection et par rayonnement à travers les deux façades latérale est beaucoup plus importante que celle perdue au niveau des deux façades frontale, est cela est tout simplement à cause de la différence de surface d'échange (les deux façades latérale contiennent plus d'ouverture que les deux façades frontale).

Toujours en ce qui concerne les ouvertures du four, on remarque que l'énergie perdue par rayonnement est beaucoup plus élevée que celle perdue par convection, et cela parce que la température du four est supérieure à 900°C, et d'après la figure 37, à une telle température le rayonnement prédomine et la convection existe avec un faible pourcentage.

En ce qui concerne les parois du four, on remarque que l'énergie perdue à travers la voute est plus importante que celle perdue à travers la sole, alors qu'ils ont la même surface d'échange, cela est due à la différence du coefficient d'échange globale K . la voute a perdu beaucoup plus d'énergie parce qu'elle se compose seulement de deux couches d'isolation, donc elle possède seulement deux résistance thermique de conduction, par contre la sole est composé de quatre couche d'isolation, donc un total de quatre résistance thermique de conduction ($\frac{e}{\lambda}$), ce qui lui permet d'avoir un coefficient d'échange globale inférieur à celui de la voute.

Mais en ce qui concerne les murs du four, on remarque qu'ils ont perdu moins d'énergie que la voute, alors qu'ils sont tous les deux composés de deux couches d'isolation, la différence dans ce cas est due à la conductivité thermique des matériaux et l'épaisseur de chaque couche : Les murs du four sont composés de deux matériaux caractérisés par une faible résistance thermique et des épaisseurs importantes, donc le rapport $\frac{e}{\lambda}$ sera plus important ce qui leurs permet d'avoir un coefficient d'échange globale plus faible. Par contre la voute est composé de deux matériaux de faibles épaisseurs qui ont des résistances thermiques importantes, donc le rapport $\frac{e}{\lambda}$ sera plus faible ce qui lui permet d'avoir un coefficient d'échange globale important.

Concernant les fumées, on remarque qu'elles contiennent la plus grande partie de l'énergie perdue, car elles proviennent directement de la source (combustion) et le transfert de chaleur s'effectue directement, sans aucun obstacle, entre le four et le milieu extérieur (l'atmosphère).

IV.7. Conclusions :

- Le four de trempe sert à transformer une énergie chimique en énergie thermique, théoriquement, selon la loi de la conservation de l'énergie, toute l'énergie qu'il consomme sera transmise au produit (tubes) mais dans la réalité il y a souvent une perte d'énergie dans l'environnement.

- La quantité d'énergie utilisée pour effectuer le traitement thermique ne représente qu'une portion de la quantité d'énergie consommée. Le reste est perdu dans l'environnement ou encore transformé en une forme d'énergie non désirée (fumées).

- Il est important de se souvenir qu'il n'y a aucune perte d'énergie, mais il y a un transfert d'énergie, de l'intérieur vers l'extérieur du four, autrement dit l'énergie n'a pas disparue elle existe toujours mais dans le mauvais endroit.

V.1. Introduction :

Il est devenu clair que les réserves d'énergies fossiles ne sont pas infinies et que leur combustion à marche forcée engendre des problèmes écologiques insurmontables et de plus en plus graves. La concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère a augmenté de 50 % en un siècle et la situation deviendra rapidement insoutenable si les pays en voie de développement adoptent le mode de vie « énergivore » actuel des pays riches.

La principale cause de la pollution atmosphérique provient de la combustion des carburants fossiles. En effet, cette combustion relâche, selon le carburant, du dioxyde de carbone. Au niveau de l'atmosphère, le dioxyde de carbone représente l'une des causes attribuée aux modifications climatiques. Il serait en effet à l'origine de l'augmentation de l'effet de serre. Des milliards de tonnes de carburants fossiles sont brûlés chaque année. Plus de 85% des gaz polluants l'atmosphère proviennent de la combustion de carburant fossile. Ces énergies couvrent 80% des besoins en énergie de notre planète.

Il y a d'autres causes de la pollution environnementale qui proviennent en premier lieu, de l'utilisation extravagante des diverses sources d'énergie.

V.2. Le gaspillage énergétique :

La notion de gaspillage énergétique décrit généralement le gaspillage de sources d'énergie, et en particulier de carburants et d'électricité

Elle inclut aussi le manque d'efficacité énergétique de nombreux dispositifs. De manière générale, l'efficacité énergétique ou l'efficacité énergétique désigne l'état de fonctionnement d'un système pour lequel la consommation d'énergie est minimisée pour un service rendu identique. C'est un cas particulier de la notion d'efficacité. Depuis quelques années on lui associe souvent le concept d'énergie intelligente ou de réseau intelligent [20].

L'énergie perdue compte pour une part non négligeable de l'empreinte écologique. Elle a des conséquences collatérales dont l'émission de déchets (parfois toxiques) et de nombreux polluants et de gaz à effet de serre, ce qui se traduit par une contribution au réchauffement planétaire (ou des pollutions thermiques locales).

Une société qui gaspille moins produit a priori moins de pollution et est donc plus respectueuse de la santé des écosystèmes et des populations (santé environnementale). Malheureusement la société nationale de sidérurgie (SNS) gaspille trop d'énergie et produit beaucoup de pollution, pour notre cas, au niveau de la tuberie sans soudure le four de trempe perd énormément d'énergie, ce qui produit une quantité considérable de fumée qui contient pas mal de polluants.

V.3. Calcul du volume des fumées équivalent a l'énergie perdue :

V.3.1. La combustion et les combustibles :

La combustion peut être définie comme la réaction chimique qui a lieu lors de la combinaison entre l'oxygène et une matière combustible. Cette réaction est globalement exothermique, c'est-à-dire qu'elle se produit avec un dégagement de chaleur.

Les combustibles sont multiples (gaz, pétrole, bois, charbon, ...) mais ils ont un point commun : celui de contenir principalement des hydrocarbures, c'est-à-dire des combinaisons multiples de carbones et d'hydrogènes. La composition des combustibles peut être représentée par la formule générale : CH_yO_x Soit pour un atome de carbone (C), on trouve en moyenne "y" atomes d'hydrogène (H) et "x" atomes d'oxygène (O) [21].

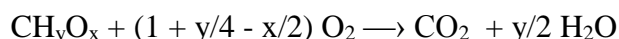
Combustible	Composition générale typique
Biomasse	$C H_{1.44} O_{0.66}$
Charbon (tourbe)	$C H_{1.2} O_{0.5}$
Charbon (anthracite)	$C H_{0.4} O_{0.02}$
Pétrole	$C H_{1.8}$
Gaz	$C H_{3.75} \dots C H_{3.95}$

Tableau 24 : Composition générale de quelques combustibles

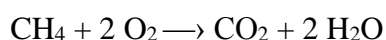
Par exemple, le CH_4 , appelé méthane, est le constituant principal du gaz naturel (entre 83 % et 88 % en volume). Un litre de fuel, est, quant à lui, constitué d'environ 726 gr de carbone (C), 110 gr d'hydrogène (H) et 2 gr de soufre (S). De manière générale, on constate qu'il y a plus d'oxygène dans la biomasse que dans les combustibles fossiles.

V.3.1.1. Produits de la combustion :

Deux produits principaux résulteront d'une combustion correcte : du dioxyde de carbone (ou CO₂) et de l'eau (ou H₂O). En effet, si on considère la combustion "stoechiométrique" (c'est-à-dire contenant la quantité d'oxygène exacte pour faire réagir le combustible de manière parfaite), on obtient :



Par exemple, on obtient pour le méthane :



C'est le CO₂ dont on parle au niveau de la pollution atmosphérique et de la problématique du réchauffement de la planète qu'il entraîne. Il est principalement lié à l'utilisation des combustibles fossiles, elle-même liée à l'activité économique. Voici les ordres de grandeur du CO₂ produit.

<i>Production de CO₂ lors de la combustion de (on peut estimer grossièrement qu'au niveau valeur énergétique, 1 m³ de gaz = 1 litre de fuel) :</i>	
<i>1 m³ de gaz</i>	<i>2 kg CO₂/m³</i>
<i>1 litre de fuel</i>	<i>2,7 kg CO₂/litre</i>
<i>Tableau 25 : Production de CO₂ lors de la combustion</i>	

Les fumées en sortie du four contiendront également de la vapeur d'eau (H₂O).

<i>Production de H₂O lors de la combustion de</i>	
<i>1 m³ de gaz</i>	<i>1,68 kg/m³</i>
<i>1 litre de fuel</i>	<i>0,9 kg/litre</i>

Tableau 26 : Production de H₂O lors de la combustion

Mais l'oxygène provient de l'air atmosphérique et celui-ci contient également de l'azote (N), qui théoriquement reste neutre dans la réaction de combustion et devrait être rejeté comme tel dans les fumées. Cependant, sous certaines conditions de combustion, cela n'est pas le cas. En effet, l'azote se combine avec l'oxygène pour former des oxydes d'azote NO, NO₂, N₂O,... rassemblés sous la dénomination NO_x. Ceux-ci sont en partie responsables des pluies acides.

Les combustibles contiennent également des traces d'autres éléments dont la combustion est nocive pour l'environnement. Le principal est le soufre dont l'oxydation fournira du SO₂ et du SO₃. Ce dernier formera de l'acide sulfurique par combinaison avec de l'eau (par exemple, lors du contact entre les fumées et les nuages). C'est ce qui entraîne aussi la formation de pluie acide.

En résumé les produits de la combustion sont principalement constitués de CO₂, d'H₂O, de NO_x et de SO_x.

V.3.1.2. Quantité d'air nécessaire pour la combustion :

La quantité d'air nécessaire pour brûler 1 m³ ou 1 litre de combustible dépendra des caractéristiques de celui-ci. Mais il est bon d'avoir en tête un ordre de grandeur.

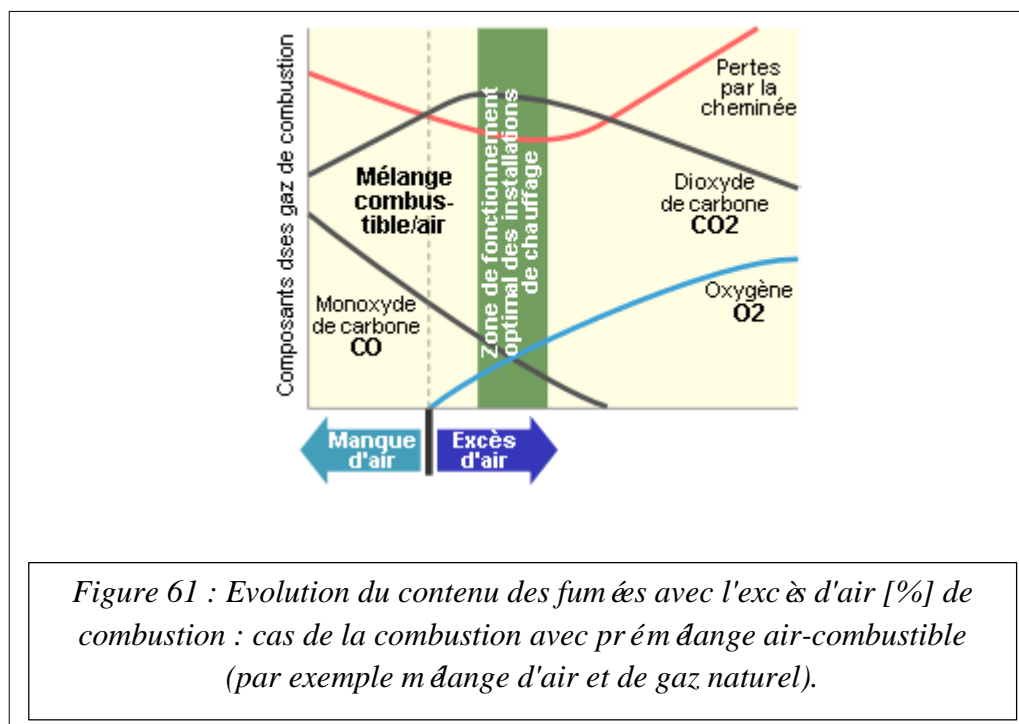
"La combustion 1 m³ de gaz naturel ou d'1 litre de fuel requiert environ 10 m³ d'air à 15 °C"

A cette quantité "stoechiométrique", c'est-à-dire requise par l'équation chimique de la combustion, s'ajoute un léger excès d'air pour s'assurer que toutes les molécules de combustible soient bien en contact avec l'oxygène. En effet, il faut prévoir que certaines molécules d'oxygène vont traverser le foyer sans se lier au combustible. Dit autrement, il faut éviter d'avoir des zones, des poches, où le processus de combustion viendrait à manquer localement d'oxygène. On travaille donc avec un excès d'air comburant qui s'élève par

exemple pour la combustion du fuel à environ 20 %. Il faut donc prévoir 12 m³ d'air pour brûler 1 litre de fuel.

Lorsqu'une combustion se fait avec une arrivée insuffisante d'oxygène, on parle de combustion incomplète. Celle-ci se traduit par la production d'imbrûlés (suies qui encrassent le four) ou d'éléments partiellement oxydés, pouvant encore brûler, comme le monoxyde de carbone (CO) qui est un gaz très dangereux : il est inodore, il passe dans le sang, se fixe sur l'hémoglobine à la place de l'oxygène et empêche le transport de celui-ci jusqu'aux cellules. Une teneur de 0,2 % de CO dans l'air entraîne la mort en moins d'une demi-heure...

La figure suivante montre l'évolution de la composition des fumées en fonction de l'excès d'air dans le cas d'une combustion à prémélange (d'air et du combustible). On constate qu'en présence d'un manque d'oxygène, il y a production de CO. Lorsque l'excès d'air augmente au-delà d'une certaine valeur, la teneur en CO₂ des fumées diminue par dilution, dilution qui diminue le rendement de combustion dans la mesure où les fumées ont une température plus basse.



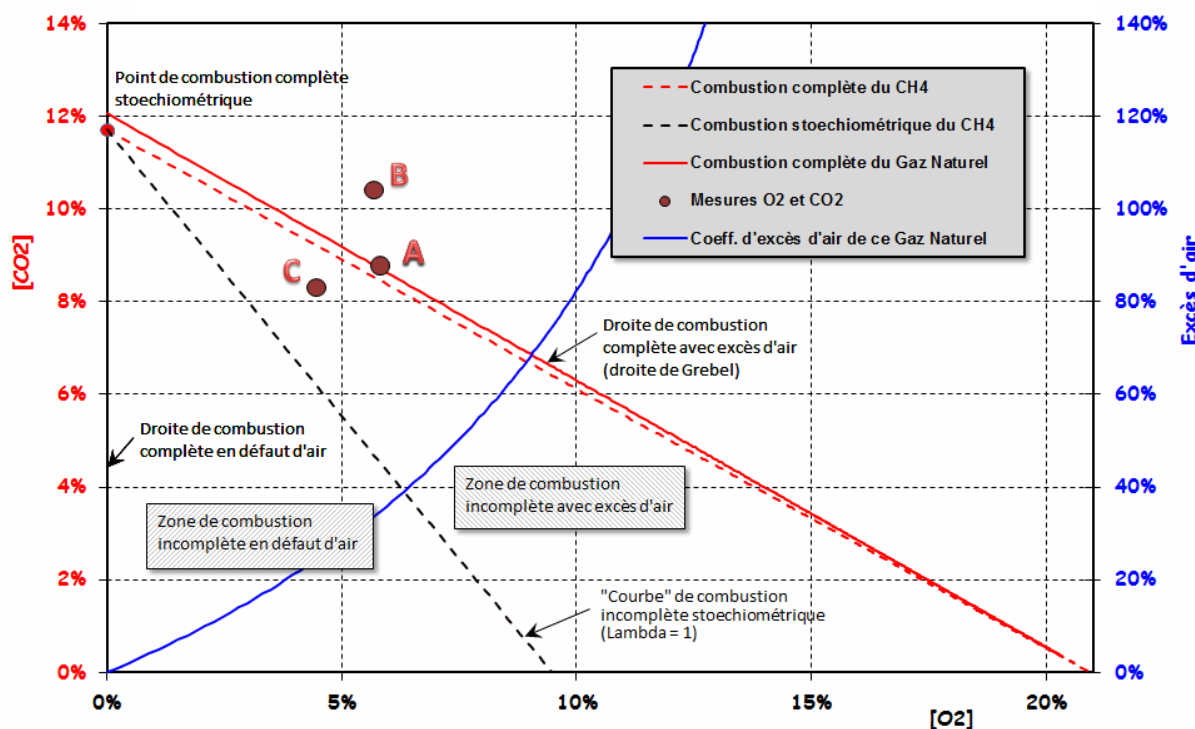


Figure 62 : Diagramme d'Ostwald-Biard m éthane pur et gaz naturel (fumées sèches)

Ce diagramme donne la relation (en bleu) entre la teneur en oxygène (abscisse) et l'excès d'air (ordonnée de droite). On voit par exemple que le point de mesure "A" est caractérisé par $[CO_2] = 8.8\%$ et $[O_2] = 5.8\%$ et par un excès d'air de 34% (point situé sur la courbe bleue, à la verticale du point "A").

V.3.1.3. Le pouvoir calorifique d'un combustible:

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la chaleur que peut dégager la combustion complète d'une unité de ce combustible. Dans le milieu scientifique, on l'exprime souvent en kJ/kg de combustible. Néanmoins, suivant le domaine d'application, on peut l'exprimer dans d'autres unités plus pratiques, par exemple, en kWh/m³ pour le gaz ou kWh/litre pour le fuel.

Dans les produits de la combustion, il y a de la vapeur d'eau, issue de la réaction de l'hydrogène du combustible. Dans certains appareils de combustion, l'eau reste à l'état de vapeur et s'échappe dans cet état vers la cheminée. La chaleur nécessaire pour vaporiser l'eau est donc perdue. Au contraire, certains appareils permettent de condenser l'eau et de récupérer l'énergie dégagée par l'eau pendant son changement de phase.

Sur base de cette distinction, on définit deux pouvoirs calorifiques :

- Le pouvoir calorifique inférieur (PCI ou H_i), mesuré en conservant l'eau à l'état vapeur,
- Le pouvoir calorifique supérieur (PCS ou H_s), mesuré après avoir récupéré la chaleur de condensation de l'eau.

Par exemple, le gaz "riche" algérien présente un PCI d'environ 36 MJ/ Nm³ (*Nm³: mètre cube normalisé*) et un PCS d'environ 40 MJ/ Nm³

Le fuel présente un PCI d'environ 36 MJ/litre et un PCS d'environ 39 MJ/litre.

<i>Vecteur</i>	<i>PCI du combustible</i>			
	<i>Unité</i>	<i>en MJ</i>	<i>(en kWh)</i>	<i>(en Wh)</i>
<i>Gaz naturel pauvre</i>	<i>m³</i>	<i>32,97</i>	<i>9,16</i>	<i>9 160</i>
<i>Gaz butane</i>	<i>kg</i>	<i>45,56</i>	<i>12,66</i>	<i>12 660</i>
<i>Gaz naturel riche</i>	<i>m³</i>	<i>36,43</i>	<i>10,12</i>	<i>10 120</i>
<i>Fuel léger</i>	<i>L</i>	<i>36,37</i>	<i>10,10</i>	<i>10 100</i>
<i>Fuel moyen</i>	<i>L</i>	<i>37,68</i>	<i>10,47</i>	<i>10 470</i>
<i>Fuel lourd</i>	<i>L</i>	<i>38,16</i>	<i>10,60</i>	<i>10 600</i>
<i>Fuel extra lourd</i>	<i>L</i>	<i>38,58</i>	<i>10,72</i>	<i>10 720</i>

Tableau 27: Pouvoirs calorifique de quelques combustibles

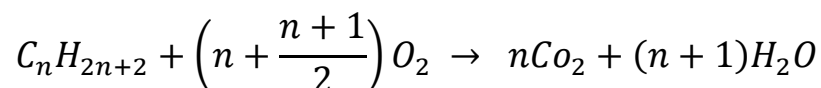
On peut déduire le PCI par unité de masse d'un combustible pur caractérisé par la composition CH_yO_x par la formule expérimentale suivante exprimée en MJ/kg :

$$PCI = \frac{(393.6 + 102.2 y - (110.6 + 204.4) y) x / (1 + y)}{(12 + y + 16x)}$$

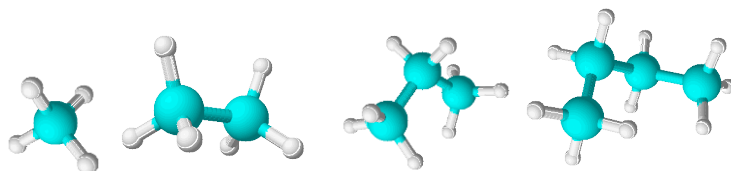
Cette formule est d'application pour tous les combustibles, qu'ils soient fossiles ou issus de la biomasse. Néanmoins, il donne l'énergie pour un combustible pur (c'est-à-dire non dilué par un agent supplémentaire comme de l'eau).

V.3.2. Calcul du volume des fumées :

La composition des fumées est déduite de la réaction du gaz naturel avec l'oxygène telle que montré sur le tableau Le gaz naturel se compose d'alcane dont la réaction de combustion est donnée par la formule suivante :



Ce qui nous donne une composition des fumées par les éléments suivant : CO₂, H₂O, O₂, N₂



Méthane CH₄

Ethane C₂H₆

propane C₃H₈

butane C₄H₁₀

Chapitre V : Influence des pertes énergétiques sur l'environnement

Composition du gaz naturel	Pourcentages	CO ₂ (m ³)	H ₂ O (m ³)	O ₂ (m ³)	N ₂ (m ³)
CH ₄	87.4	87.4	174.8	-----	-----
C ₂ H ₆	8.4	16.8	25.2	-----	-----
C ₃ H ₈	2.6	7.8	10.7	-----	-----
C ₄ H ₁₀	0.8	3.2	4	-----	-----
C ₅ H ₁₂	0.1	0.5	0.6	-----	-----
N ₂	0.7	-----	-----	-----	0.7
AIR	-----	-----	22.89	44.64	1017.86
Total	100	122.9	238.19	44.64	1018.56
Volume total des fumées en m ³	1424.29				

Tableau 28: Volume total des fumées

➤ Donc, la combustion de 100 Nm³ de gaz naturel produit 1 424.29 Nm³ de fumées

L'énergie totale perdue par le four de trempe est : $Q_{TP} = 34\ 276\ 924.48\ \text{Mcal/an}$

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du gaz naturel algérien est 36 MJ/ Nm³ ce qui représente 8 500 Kcal/Nm³ (1 MJ=238Kcal) donc on peut obtenir l'équivalence de l'énergie totale perdue :

$$1\ \text{Nm}^3\ \text{de gaz naturel} \rightarrow 8\ 500\ \text{Kcal}$$

$$4\ 032\ 579.351\ \text{Nm}^3\ \text{de gaz naturel} \leftarrow Q_{TP}\ \text{Kcal}$$

Donc, il faut **4 032 579.351 Nm³** de gaz naturel pour obtenir l'énergie totale perdue par an.

$$100\ \text{Nm}^3\ \text{de gaz naturel} \rightarrow 1\ 424.29\ \text{Nm}^3\ \text{de fumées}$$

$$4\ 032\ 579.351\ \text{Nm}^3\ \text{de gaz naturel} \rightarrow 57\ 435\ 624.43\ \text{Nm}^3\ \text{de fumées}$$

« L'énergie perdue produit : **57 435 624.43 Nm³** de fumées par ans »

Quantité de CO₂ produite :

On sait que : 1 Nm³ de gaz naturel produit 2 Kg de dioxyde de carbone (Tab.25), donc on peut déterminer la quantité de CO₂ produite par l'énergie perdue :

$$1 \text{ Nm}^3 \text{ de gaz naturel} \rightarrow 2 \text{ Kg de CO}_2$$

$$4\,032\,579.351 \text{ Nm}^3 \text{ de gaz naturel} \rightarrow 8\,065\,158.702 \text{ Kg de CO}_2$$

« L'énergie perdue produit : **8 065 158.702 Kg** de CO₂ par ans »

V.4. L'influence des polluants contenue dans les fumées :

Nos poumons filtrent en moyenne 10 000 à 15 000 litres d'air chaque jour, et jusqu'à 4 fois plus pour un sportif en exercice. Ainsi, la qualité de l'air que nous respirons a des conséquences sur notre santé, mais également sur l'environnement.

V.4.1. L'influence des polluants sur la santé humaine :

De nombreuses études permettent aujourd'hui d'affirmer que même à des niveaux faibles, la pollution a des effets néfastes sur notre santé. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé "trois millions de personnes meurent chaque année sous l'effet de la pollution atmosphérique, soit 5 % des 55 millions de décès annuels dans le monde. Vu la marge d'incertitude des estimations, le nombre réel des décès annuels pourrait se situer entre 1,4 et 6 millions"[22].

Les polluants sont des gaz ou des particules irritantes et agressives qui pénètrent plus ou moins loin dans l'appareil respiratoire et qui peuvent induire des effets respiratoires ou cardiovasculaires tels que [23] :

- Une augmentation des affections respiratoires : bronchiolites, rhino-pharyngites
- Une hyper-sécrétion bronchique.
- Une augmentation des irritations oculaires.
- Une augmentation de la morbidité cardio-vasculaire (particules fines).
- Une dégradation des défenses de l'organisme aux infections microbiennes.
- Une incidence sur la mortalité à court terme pour affections respiratoires ou cardio-vasculaires (dioxyde de soufre et particules fines).

La pollution de l'air peut avoir divers effets à court et à long terme sur la santé. La pollution de l'air en milieu urbain accroît le risque de maladies respiratoires aiguës

(pneumonie, par exemple) et chroniques (cancer du poumon, par exemple) ainsi que de maladies cardio-vasculaires.

Différents groupes d'individus sont touchés différemment par la pollution de l'air dans les zones proches du complexe sidérurgique d'El-Hadjar (Sidi Amar, Hajar-Ediss...). Des effets plus graves sur la santé sont observés chez les personnes déjà malades. En outre, les populations plus vulnérables comme les enfants, les personnes âgées et les ménages à faible revenu ayant un accès limité aux soins de santé sont plus sensibles aux effets préjudiciables de l'exposition à la pollution de l'air.

A. Risques à court terme de la pollution atmosphérique sur la santé

Lors d'une période de forte pollution atmosphérique et durant les quelques jours qui suivent, les études montrent une augmentation des hospitalisations, due notamment à une hausse des crises cardiaques (mortelles ou non) [24].

Polluants	Effets sur la santé
Dioxyde d'azote (NO ₂)	Gaz irritant pouvant pénétrer profondément dans les poumons. Il altère l'activité respiratoire et augmente les crises chez les asthmatiques. Chez les plus jeunes, il favorise des infections microbiennes des bronches. Les effets de ce polluant ne sont pas tous identifiés. Il est un bon indicateur de la pollution automobile.
Dioxyde de soufre (SO ₂)	Gaz irritant pouvant entraîner des crises chez les asthmatiques, augmenter les symptômes respiratoires aigus chez l'adulte et l'enfant : gêne respiratoire, accès de toux ou crises d'asthme.
Monoxyde de carbone (CO)	A fortes doses, il est un toxique cardio-respiratoire souvent mortel ; A faibles doses, il diminue la capacité d'oxygénation du cerveau, du cœur et des muscles. Sa nocivité est particulièrement importante chez les insuffisants coronariens et les fœtus.
Benzène (C ₆ H ₆)	Composé cancérigène pour l'homme.

Tableau 29: Effets à court terme de quelques polluants sur la santé humaine [22]

B. Risques à long terme :

Un individu soumis à la pollution atmosphérique sur une longue durée, même à faible dose, risque davantage d'être touché par une maladie cardiopulmonaire (infarctus du myocarde, asthme, etc.). Les risques de cancer sont également plus importants. La pollution atmosphérique contribue à une baisse de la fertilité, à une augmentation de la mortalité infantile et à un affaiblissement du système immunitaire.

Polluants	Effets sur la santé
Dioxyde de soufre SO ₂	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Irritation des voies respiratoires ▪ Synergie avec les particules ▪ Sensibilité particulière des asthmatiques
Oxydes d'azote NO et NO ₂	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Irritation des bronches chez un public sensible ▪ Altération de la fonction pulmonaire
Ozone O ₃	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Irritation des muqueuses (gorge, nez, yeux) ▪ diminution de la fonction respiratoire ▪ Sensibilité particulière des pathologies cardiaques ou respiratoires
Monoxyde de carbone CO	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vertiges ▪ Maux de tête ▪ Nausées <p>Le monoxyde de carbone se fixe dans le sang à la place de l'oxygène. A forte concentration (dans un espace clos), il peut provoquer la mort.</p>
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques ou HAP	<p>Toxicité variable en fonction de la molécule concernée :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Effets mutagènes ▪ Effets cancérogènes

Tableau 30: Effets à long terme de quelques polluants sur la santé humaine [25]

Il existe aussi plusieurs maladies qui résultent de la pollution de l'air, telle que [26] :

a. L'asthme : L'asthme est la principale affection causée par la pollution de l'air en nombre de cas. 10 et 35 % des causes d'asthme sur les 4 millions de cas d'asthme traités annuellement lui sont attribués.

b. La bronchite aiguë et chronique : Les bronchites aiguës sont induites par une hypersensibilisation des bronches à la pollution, qui favorisent l'installation d'un virus ou d'une bactérie. 950 000 cas annuels de bronchite aiguë sont attribuables à la pollution, selon certaines estimations. La pollution de l'air est responsable de 134 000 nouveaux cas de bronchite chronique par an, soit 10% des patients souffrant de cette affection. Elle est provoquée par l'irritation des bronches due aux agents chimiques de la pollution.

c. La broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO) : La broncho-pneumopathie chronique obstructive constitue une complication de la bronchite chronique. Elle est permanente et non réversible. 10 à 15% des cas de BPCO sont attribuables à l'environnement.

d. Cancer des voies respiratoires : Le nombre de cas de cancers des voies respiratoires attribuables à la pollution atmosphérique est difficile à estimer, dans la mesure où cette pathologie est associée à plusieurs facteurs de risques. Le nombre de cas recensés reste peu élevé comparativement aux autres maladies associées à la pollution de l'air.

V.4.2. L'influence des polluants sur l'environnement :

A l'échelle de la planète, les polluants provoquent des dégâts majeurs :

Le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote sont responsables des pluies acides : des neiges, pluies, brouillards qui deviennent, sous l'effet de ces polluants, acides. Cela altère les écosystèmes, acidifie les lacs et les cours d'eau, change les propriétés des sols et menace ainsi la faune et la flore aquatique. La pollution à l'ozone abîme les feuilles des arbres et de nombreux végétaux.

Les polluants, comme le gaz carbonique, contribuent à accroître l'effet de serre et donc au changement climatique et l'augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre. Les conséquences des changements climatiques, parmi lesquelles les inondations, les sécheresses et l'accroissement de la fréquence et de l'intensité des phénomènes météorologiques graves (fig.63), se font sentir partout sur la planète. L'on s'attend à ce que ces chocs s'intensifient au cours du 21^{ème} siècle.



sécheresse particulièrement sévère.

A. L'effet de serre :

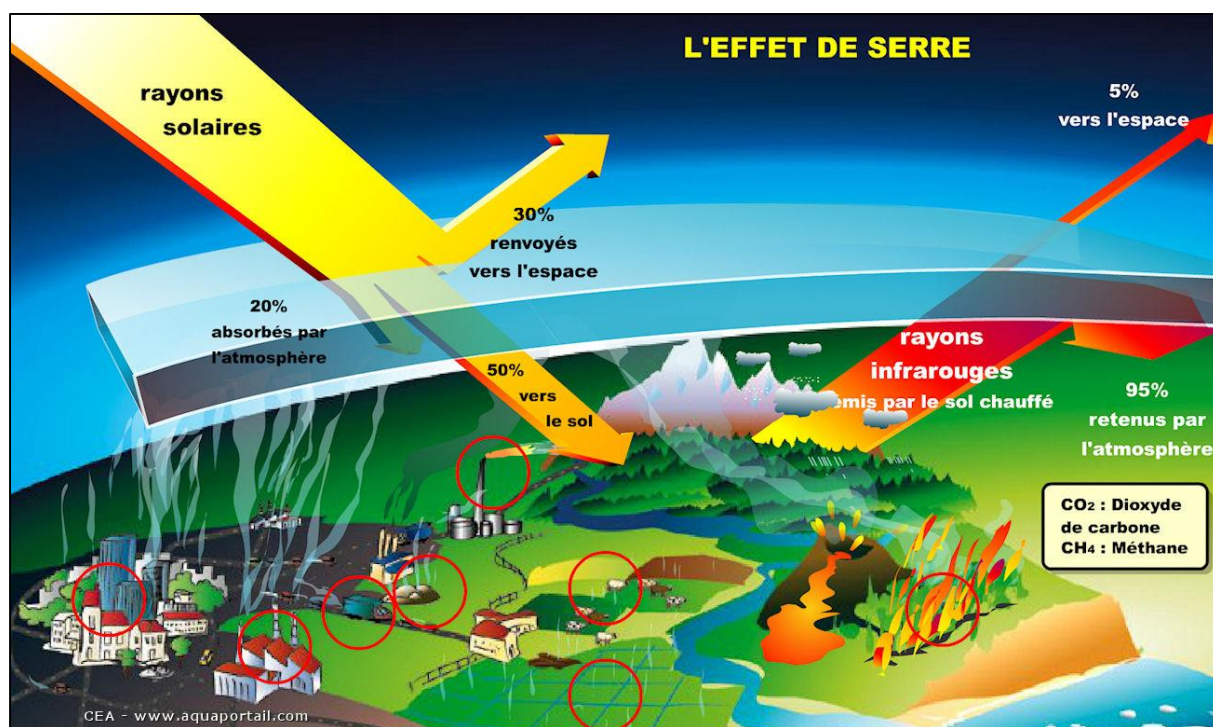


Figure 64 : Principe de fonctionnement de l'effet de serre

La Terre possède un système naturel de contrôle des températures. Certains gaz atmosphériques, connus sous le nom de gaz à effet de serre, sont des éléments cruciaux de ce système. En moyenne, près d'un tiers des rayonnements solaires atteignant la terre est renvoyé dans l'espace. Le reste est partagé entre l'atmosphère, qui en absorbe, et la terre et l'océan qui en absorbent la majeure partie. La surface de la terre se réchauffe et émet un rayonnement infrarouge. Les gaz à effet de serre bloquent le rayonnement infrarouge et réchauffent l'atmosphère. Les gaz à effet de serre d'origine naturelle comprennent la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, l'ozone, le méthane et l'oxyde nitreux, qui créent ensemble un effet de serre naturel. Toutefois, les activités humaines font augmenter le taux de gaz à effet de serre dans l'atmosphère [27]. Et en fait, le principal gaz à effet de serre c'est le fameux CO₂. Ce gaz, le plus abondant émis par les activités humaines assure à lui seul les deux tiers de l'effet de serre [28].

b. Les pluies acides :

Les « pluies acides », tout comme le « réchauffement planétaire » constituent un phénomène dont l'existence même est contestée par certains individus. En fait, la preuve de pluies acides a été observée de par le monde dans les villes industrielles depuis le milieu du XIX^{ème} siècle. « Pluie acide » est un terme qui désigne le mélange de dépôts humides et de retombées sèches provenant de l'atmosphère contenant de grandes quantités d'acide nitrique et sulfurique, résultat à la fois d'émissions naturelles et d'émissions créées par l'homme. Les effets sur les structures et sur les habitations sont tout à fait réels. Les inspecteurs peuvent se renseigner au sujet des pluies acides et de leurs signes destructeurs sur les métaux et les composants rocheux se trouvant à l'extérieur des maisons.

Les pluies acides sont formées lorsque les précurseurs chimiques de l'acide nitrique et de l'acide sulfurique, soit respectivement le dioxyde de soufre (SO₂) et l'oxyde d'azote (NO_x), sont combinés à des particules acides de source naturelle, telle que les volcans et la végétation pourrissante. Quand ce mélange réagit avec l'oxygène, l'eau ou d'autres produits chimiques (y compris des polluants tels que le dioxyde de carbone), il en résulte des pluies acides, qui peuvent être transportées par la pluie, et même la neige, le givre, le brouillard et la brume, et qui, à leur tour, s'échappent dans le sol et les nappes phréatiques [29].

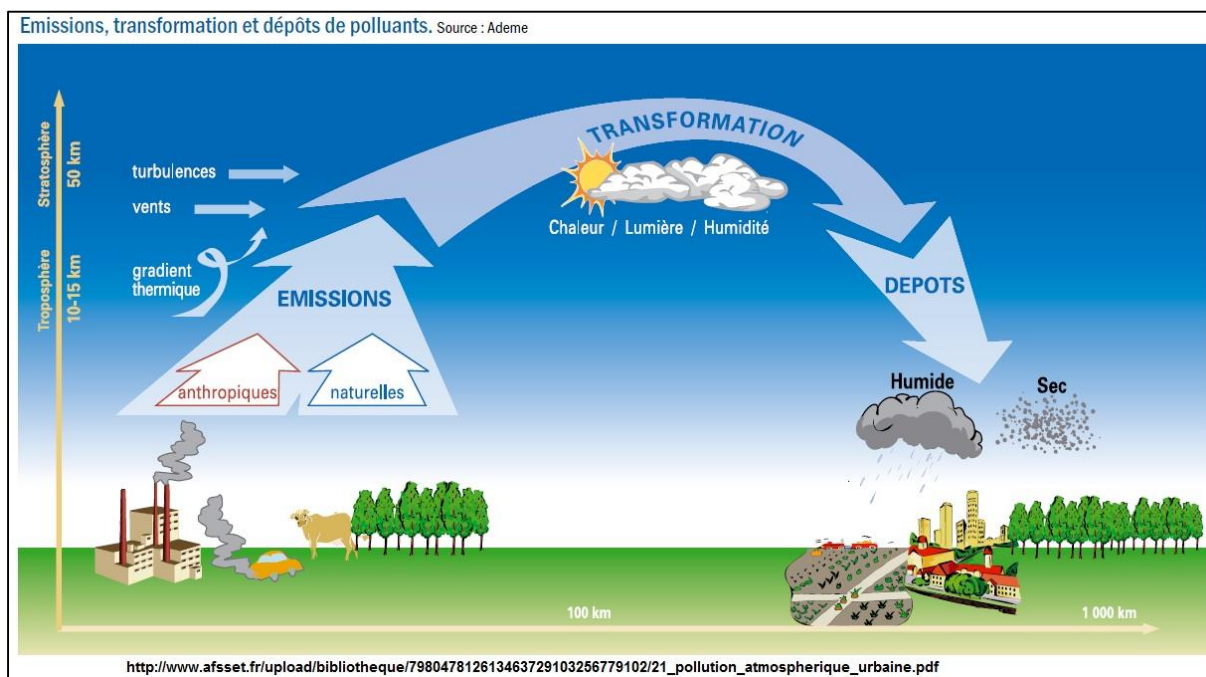


Figure 65 : Emissions, transformation et dépôts de polluants

V.5. L'influence des pertes d'énergie sur l'économie :

D'après les calculs précédant, l'énergie perdue est produites par la combustion de **3 887 356.625 Nm³** de gaz naturel, sachons qu'au niveau d'ArcelorMittal, le mètre cube normalisé du gaz naturel coute 1.642 DA ; ce qui nous permet de déterminé les pertes économique comme suite :

$$1 \text{ Nm}^3 \rightarrow 1.642 \text{ DA}$$

$$4 \text{ 032 579.351 Nm}^3 \rightarrow 662 \text{ 149 5.29 DA}$$

« L'énergie perdue coute : **662 149 5.29 DA** par ans »

V.6. Solutions proposées :

On a conclu que les pertes énergétiques ont des graves conséquences sur la santé humaine, sur l'environnement et sur l'économie du pays, donc il faut le plus vite possible trouver des solutions à ce problème. Dans cette étude on propose à ArcelorMittal Pipe et Tube Algérie, quelques solutions basées sur deux principes : la récupération et la minimisation des pertes énergétiques.

V.6.1. Solution pour minimiser les pertes :

On a remarqué que l'énergie perdue par la porte d'enfournement et celle du défournement, représente une partie importante de l'énergie totale perdue, et cela est à cause de l'ouverture permanente des deux portes. Pour éliminer ce problème on propose l'installation de deux portes automatisées (ouverture et fermeture automatique). Cette idée est inspirée des portes automatiques coulissantes (fig.66) utilisées au niveau des bâtiments administratifs et autres (hôpitaux, hôtels, aéroport...).



Figure 66 : Porte coulissante / automatique

Une photorésistance est un composant électronique dont la résistance varie en fonction de la quantité de lumière incidente (en présence de lumière la résistance électrique est maximale, et en absence de lumière la résistance est minimale).

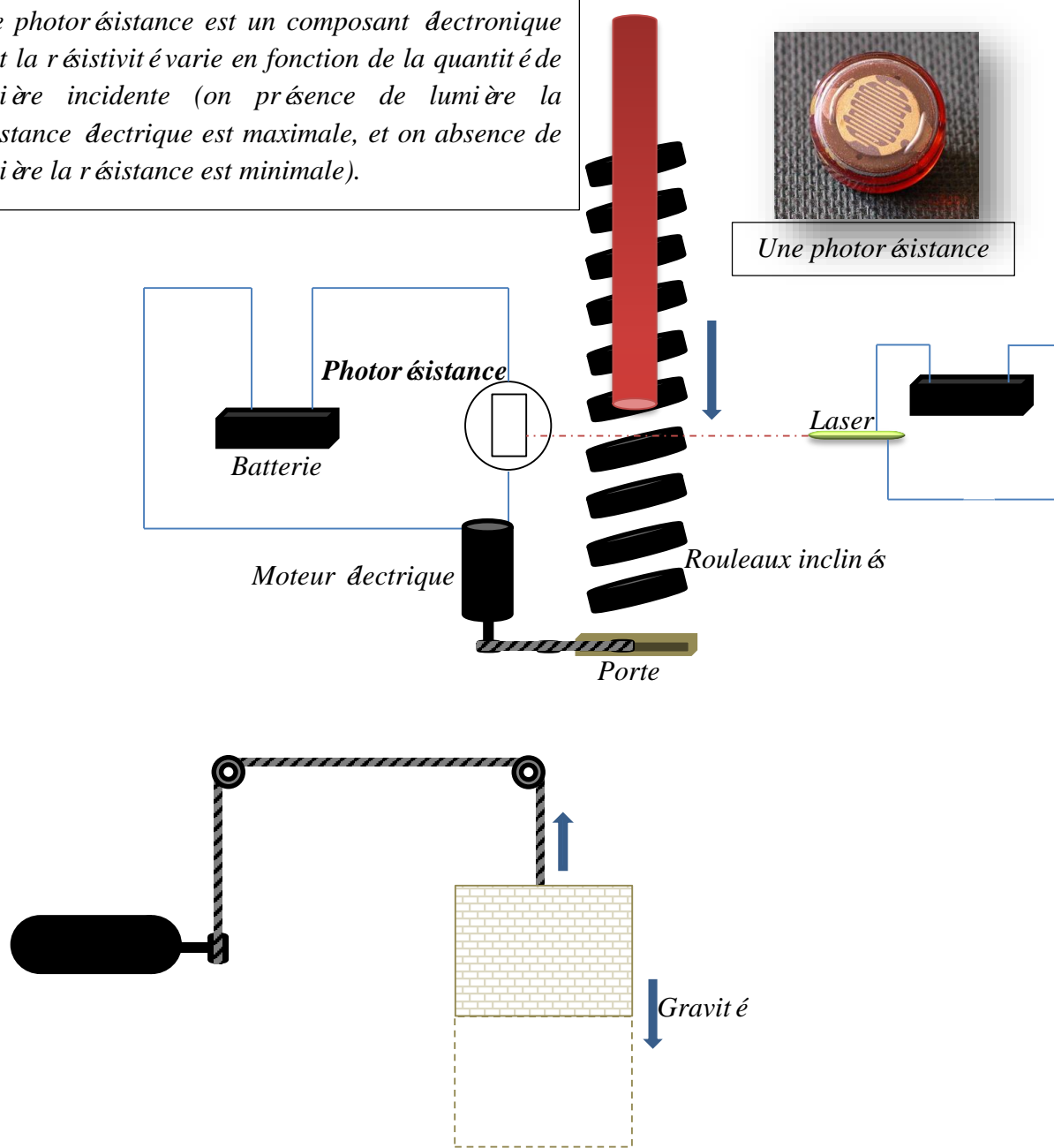


Figure 67 : Principe de fonctionnement de la porte automatique suggéré

Le principe de fonctionnement de l'installation qu'on propose est assez simple : lorsqu'un objet (tube) interrompt la lumière du laser, la photorésistance joue le rôle d'un conducteur, ce qui permet d'obtenir un circuit électrique fermé pour alimenter le moteur électrique, qui va alors entraîner la porte vers le haut ; et lorsque l'objet (tube) libère la lumière du laser, les photons incidents diminuent le nombre des porteurs libres et augmentent la résistance électrique de la photorésistance, par conséquent le moteur électrique s'arrête et la porte rejoint sa position (de fermeture) grâce à son propre poids (gravité).

V.6.2. Utilisation des pertes pour le chauffage des bureaux administratifs :

Pendant la période du stage, on a remarqué qu'il y a aucune installation de chauffage au niveau des bureaux administratif de la tuberie sans soudure, alors que d'après les résultats qu'on a obtenue dans cette étude, on conclue qu'il y a énormément de chaleur perdue, qu'on peu utilis é pour réaliser une installation de chauffage centralisé

Le chauffage central est un système de chauffage où l'air ou bien l'eau est chauffé en un point central (four de trempe pour notre cas) puis envoyé à l'intérieur d'un bâtiment via des aérations ou des tuyaux et des radiateurs pour chauffer les différentes pièces ou parties de l'immeuble.

L'idée c'est d'entouré le four de trempe (murs, sole et voute) avec des tuyaux (conductivité thermique élevé) qui vont transporter un fluide caloporteur vers les radiateurs. Un fluide caloporteur (lit. porte-chaleur) est un fluide chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de température. Le terme « caloporteur » est synonyme de « caloripporteur ».

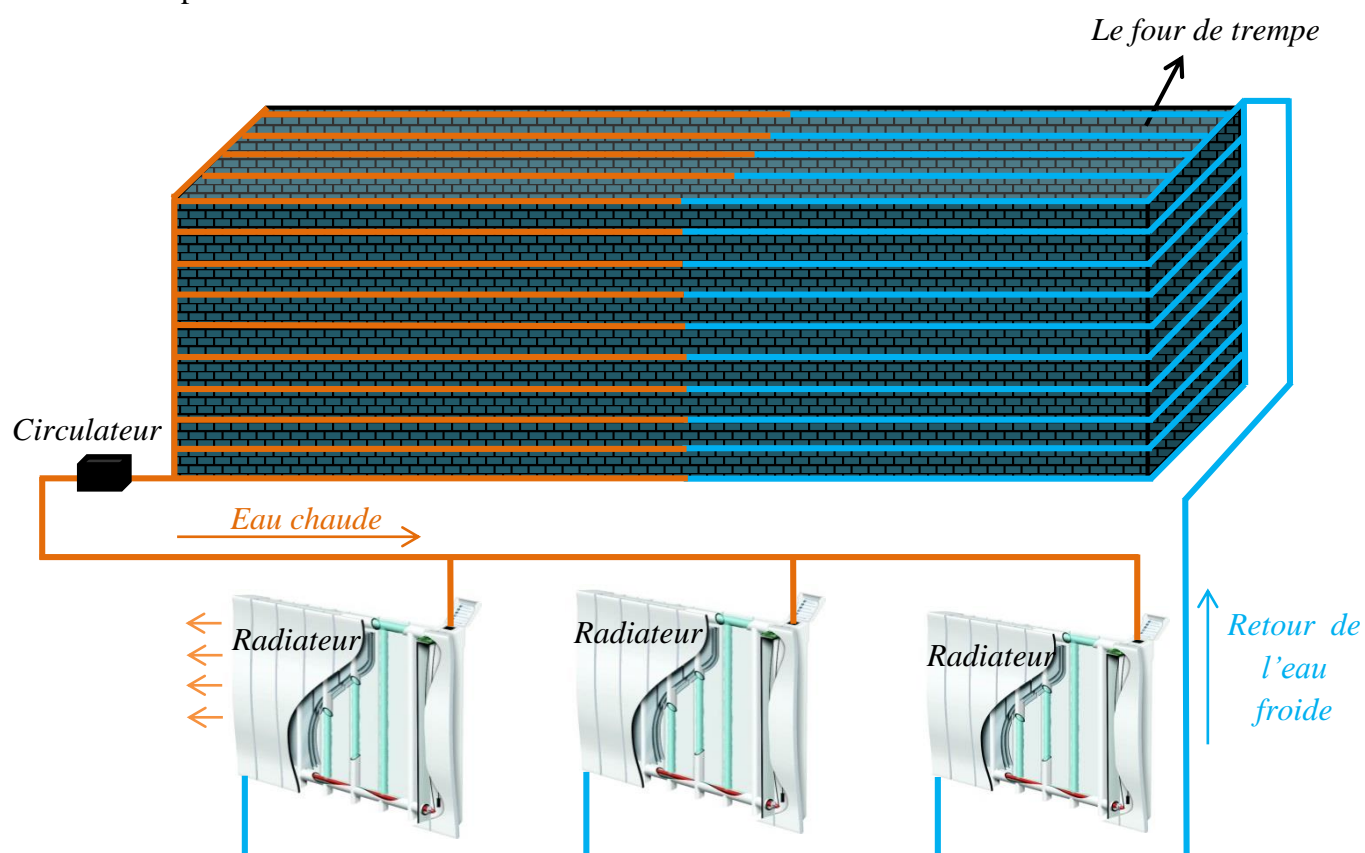


Figure 68 : Principe de l'utilisation des pertes pour le chauffage

V.6.3. Utilisation de l'énergie des fumées pour le préchauffage de l'air de combustion :

Lorsque la température des fumées est particulièrement élevée, les économiseurs peuvent être utilisés uniquement si certaines conditions sont remplies. C'est ici que les réchauffeurs d'air interviennent : ils extraient des fumées chaudes, une énergie précieuse, qui serait sinon évacuée par la cheminée sans être exploitée, et préchauffent ainsi l'air de combustion du système de chauffe. Un réchauffeur d'air permet ainsi d'économiser jusqu'à 10 % de combustible et réduire nettement l'impact sur l'environnement.

On distingue deux grandes familles de réchauffeur (récupérateur) :

- Les récupérateurs continus, pour lesquels l'écoulement des fluides est continu et toujours de même sens ; le régime thermique y est permanent ;
- Les récupérateurs régénératifs, pour lesquels l'écoulement des fluides s'inverse régulièrement ; le régime thermique y est transitoire au cours d'un cycle.

V.6.3.1. Récupérateurs continus :

Ils sont constitués d'un grand nombre de tubes ou de plaques, de manière à obtenir des surfaces d'échange importantes imposées par le faible coefficient de transfert de chaleur entre deux fluides gazeux. L'écoulement des fluides s'y fait, selon les cas, en courants parallèles, à contre-courants ou à courants croisés. Ils peuvent être statiques ou mobiles (fig.69).

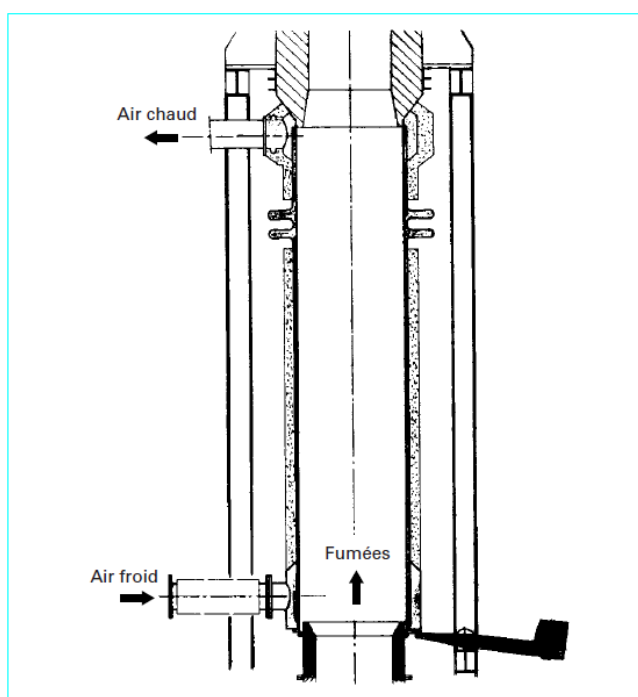


Figure 69 : Exemple de récupérateur continu dit à rayonnement

V.6.3.2. Récupérateurs régénératifs :

Utilisés de préférence sur les hautes températures, ils sont constitués d'empilage de pièces en matériaux réfractaires dans lesquels sont ménagés des passages pour les fluides (fig.70).

Dans un premier temps, les fumées, en provenance du four, s'y refroidissent en réchauffant le matériau réfractaire. Dans un second temps, l'air de combustion, allant vers les brûleurs, s'y réchauffe en refroidissant le matériau réfractaire.

Le système nécessite plusieurs équipements en parallèle, les uns se réchauffant pendant que les autres se refroidissent. Globalement, le transfert de chaleur y est du type à contre-courant.

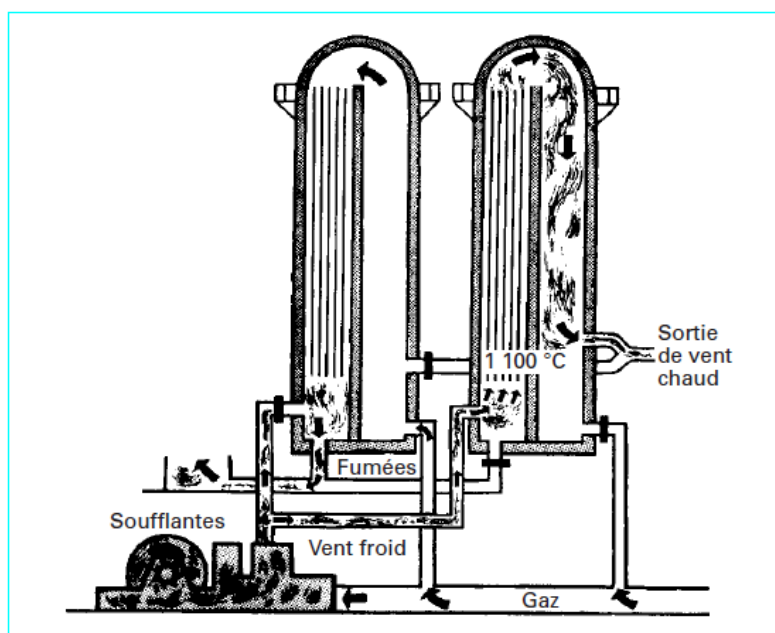


Figure 70 : Exemples de récupérateurs régénératifs (Cowper)

V.6.3.3. Brûleurs auto-récupérateurs :

Les équipements décrits précédemment sont des appareils de grandes dimensions qui réchauffent la totalité de l'air de combustion utilisé sur le four. Dans certains fours, les fumées, au lieu d'être collectées en un point, quittent le laboratoire en de multiples endroits. Sur ces fours, le réchauffage de l'air peut se faire dans des récupérateurs intégrés, par construction, dans les brûleurs.

Les brûleurs auto-récupérateurs peuvent être, soit :

- Auto-récupérateurs continus ; il s'agit, en particulier, les tubes radiants qui sont utilisés dans les fours à chauffage indirect comme substitut à un chauffage par résistances électriques (fig.71) ;

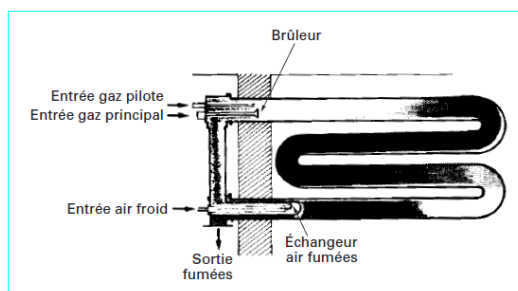


Figure 71 : Brûleur à tube radiant avec récupérateur incorporé

- Auto-récupérateurs régénératifs ; ces équipements entraînent un fonctionnement discontinu (par tout ou rien) des brûleurs associés ; ce fonctionnement est utilisé pour améliorer le brassage de l'atmosphère du four, les brûleurs non éteints étant toujours à leur puissance maximale et fournissant, de ce fait, le maximum de débit de quantité de mouvement, en utilisant toute la pression disponible fournie par les ventilateurs d'air de combustion (fig.72).

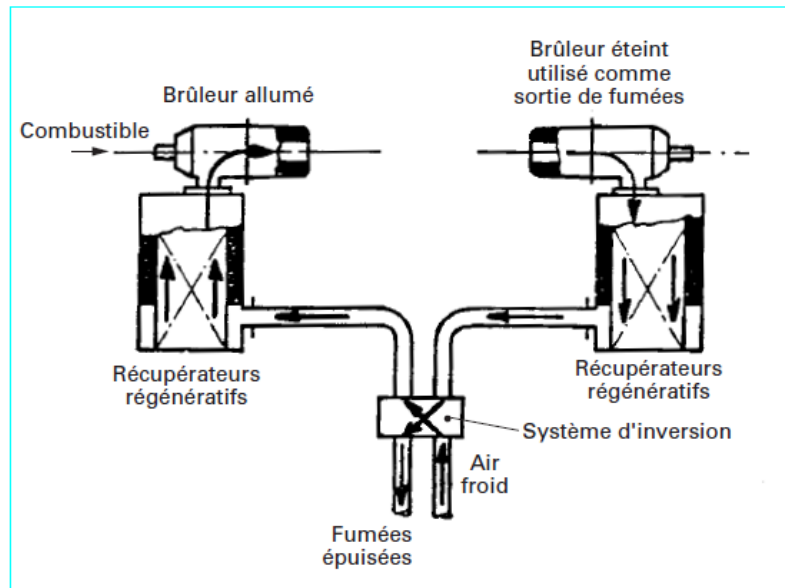


Figure 72 : Brûleur avec récupérateur régénératif incorporé et principe de fonctionnement de deux brûleurs associés

V.6.3.4. Construction des récupérateurs :

La construction des récupérateurs doit prendre en compte :

- Les niveaux de température auxquels se fait le transfert de chaleur ;
- L'agressivité du milieu. On trouve de ce fait, des récupérateurs construits dans des matériaux très divers : céramique, fonte, verre, plastiques, acier, acier réfractaire, acier émaillé etc.

Pour augmenter la surface d'échange, on utilise assez fréquemment des surfaces étendues, tels que des ailettes (fig.73) ou des picots ou studs (fig.74).

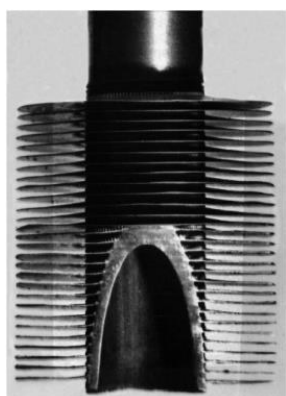


Figure 73 : Tube avec ailettes

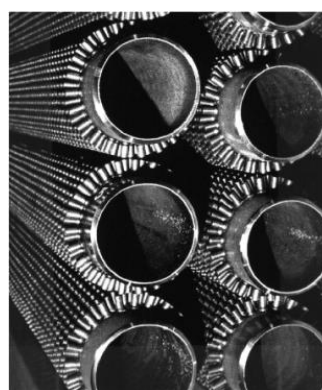


Figure 74 : Tubes avec picots

Un point important est l'étanchéité entre les deux fluides. En effet, un manque d'étanchéité entraîne des fuites d'air de combustion, dont la pression est usuellement la plus élevée, vers le circuit de fumées avec les conséquences suivantes :

- diminution de la quantité d'air arrivant aux brûleurs, d'où détérioration de la combustion ;
- refroidissement des fumées, par mélange, donc modification de la valeur des pertes thermiques à la cheminée ;
- surcharge du système d'extraction des fumées.

Certains récupérateurs sont, par construction, imparfaitement étanches. Ce sont les récupérateurs rotatifs, les récupérateurs en céramique et les récupérateurs régénératifs. Cela doit être pris en compte lors de la conception de l'ensemble four et récupérateur. D'autres, étanches à l'origine, peuvent cesser de l'être en cours d'exploitation soit pour cause de rupture (récupérateur en tubes de verre), soit pour cause de corrosion (récupérateur métallique). Il y a donc lieu, dans tous les cas, d'assurer en cours d'exploitation, un suivi permanent de l'état de ces appareils.

V.7. Conclusions :

- Le CO₂ dont on parle au niveau de la pollution atmosphérique et de la problématique du réchauffement de la planète qu'il entraîne. Il est principalement lié à l'utilisation des combustibles fossiles, elle-même liée à l'activité économique.
- L'énergie perdue compte pour une part non négligeable de l'empreinte écologique. Elle a des conséquences collatérales dont l'émission de déchets (parfois toxiques) et de nombreux polluants et de gaz à effet de serre, ce qui se traduit par une contribution au réchauffement planétaire (ou des pollutions thermiques locales).
- La tuberie sans soudure produit chaque année plus de cinquante million mètres cube de fumées, contenant plus de huit million kilogrammes de dioxyde de carbone, tout cela c'est en ce qui concerne l'énergie perdue, sans compter les produits de l'énergie utile, qui seront en fait énormément plus élevés.
- La société nationale de sidérurgie (SNS) gaspille trop d'énergie et produit beaucoup de pollution, donc on peut la considérer comme une société non respectueuse de l'environnement.
- Enfin, on conclut que les pertes énergétiques ont des graves conséquences sur la santé humaine, sur l'environnement et sur l'économie du pays, et pour régler ce problème, il y a beaucoup de solutions possibles, il suffit d'avoir une bonne volonté de le faire.

Au bout de 90 jours de stage passés chez ArcelorMittal pipe et tube Algérie au niveau de l'atelier du parachèvement, nous avons pu constater que cette filiale contient plusieurs failles, principalement dues à la négligence et l'ignorance de plusieurs processus industriels, qui peuvent avoir un impact très grave sur l'être humain et son environnement.

Dans ce projet on s'est concentré sur la négligence et l'ignorance des pertes énergétiques du four de traitement thermique, et on a pu prouver, à l'issue de plusieurs calculs thermiques, que ces pertes représentent une fatale source de pollution et une énorme perte économique. On a aussi conclu que cette quantité d'énergie perdue pourrait satisfaire les besoins énergétiques de plusieurs autres applications, donc il serait mieux de profiter de cette énergie que de la laisser s'évader dans la nature. D'autres constatations ont été déduites au cours de cette étude :

- Le traitement thermique d'un matériau est un groupe de procédés industriels utilisés pour modifier les propriétés physiques et parfois chimiques de ce dernier.
- La trempe est l'une des fameuses techniques de traitement thermique dans la masse des métaux et surtout les aciers. Elle consiste à chauffer uniformément un acier à une température dite "d'Austénitisation" puis à le refroidir de façon rapide et continue, l'échauffement est obtenu généralement grâce à un four industrielle nommé four de trempe. Ce dernier est un élément principal et irremplaçable dans ce genre de traitement thermique.
- Le four de trempe sert à transformer une énergie chimique en énergie thermique, théoriquement, selon la loi de la conservation de l'énergie, toute l'énergie qu'il consomme sera transmise au produit (tubes) mais dans la réalité il y a souvent une perte d'énergie dans l'environnement.
- La quantité d'énergie utilisée pour effectuer le traitement thermique ne représente qu'une portion de la quantité d'énergie consommée. Le reste est perdu dans l'environnement ou encore transformé en une forme d'énergie non désirée (fumées).

- La capacité de production du four de trempe pourrait être augmentée si les temps de séjour des tubes dans le four étaient réduits. Et pour réduire le temps de séjour des tubes dans le four il faudrait minimiser au maximum les pertes énergétiques, et cela a été éprouvé par la simulation de la température, dans laquelle on a conclu que :

Pour chauffer un tube de 20 °C jusqu'à 930°C (température d'austinitisation, voir II.4.3) dans un four de trempe réel (maximum de pertes de chaleur), il faudrait au moins 3900 sec : 1h 5min (fig.53). Alors que d'après les spécifications techniques, lorsque le four de trempe est parfaitement isolé cette opération de chauffage doit durer seulement 28 min.

- L'énergie perdue compte pour une part non négligeable de l'empreinte écologique. Elle a des conséquences collatérales dont l'émission de déchets (parfois toxiques) et de nombreux polluants et de gaz à effet de serre, ce qui se traduit par une contribution au réchauffement planétaire (ou des pollutions thermiques locales).
- La tuberie sans soudure produit chaque année plus de cinquante million mètres cube de fumées, contenons plus de sept million kilogrammes de dioxyde de carbone, tous cela c'est en ce qui concerne l'énergie perdue, sans compter les produits de l'énergie utile, qui seront en fait énormément plus élevés.
- La société nationale de sidérurgie (SNS) gaspille trop d'énergie et produit beaucoup de pollution, donc on peut la considérer comme une société non respectueuse de l'environnement.
- Enfin, on conclut que les pertes énergétiques ont des graves conséquences sur la santé humaine, sur l'environnement et sur l'économie du pays, et pour régler ce problème, il y a beaucoup de solutions possibles, il suffit d'avoir une bonne volonté de le faire.

Références

Livre :

[1] FERCHAULT DE RÉAUMUR (R.A.). – L'art de convertir le fer forgé en acier et l'art d'adoucir le fer fondu (1722).

[2] GARNIER (J.). – Le fer. Hachette (1874).

[3] Dominique Ghiglione, Claude Leroux, Christian Tournier, « Pratique des traitements thermochimiques », Éditions techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques

[4] Michel Dupeux, « Aide-mémoire de science des matériaux », Dunod, 2005

[7]. Finnish Thermowood Association, Snellmaninkatu 13, FIN-00171 Helsinki, FINLAND, Thermowood Handbook.

[8]. A. J. Stamm, H. K. Burr, and A. A. Kline. Heat-stabilized wood (staybwood). Agriculture-Madison, 1955.

[11]. M. Chaouch. Effet de l'intensité du traitement sur la composition élémentaire et la durabilité du bois traité thermiquement : développement d'un marqueur de prédiction de la résistance aux champignons basidiomycètes. PhD thesis, Université Henri Poincaré Nancy, 2011

[13]. J. L. Shi, D. Kocaefe, and J. Zhang. Mechanical behavior of quercus woods species heat-treated using thermowood process. Holz Roh Werkst, (65) :255–259, 2007.

[14]. D. Kocaefe, B. Chaudhry, S. Poncsak, M. Bouazara, and A. Pichette. Thermogravimetric study of high temperature treatment of aspen : effect of treatment parameters on weight loss and mechanical properties. J Mater Sci, (42), 2007.

Technologie des métaux, contrôles et essais des soudures Par Michel Bramat

G. BRUHAT, Thermodynamique, Edition Masson

J.P. BARDON, Températures de surface, Notions fondamentales (R2730) Edition Techniques de l'ingénieur

C. CHAUSSIN, C. HILLY et J. BARRALS Chaleur et thermodynamique, Edition Lavoisier

Références

Site internet :

- [5] <http://www.adtaf.com/nos-prestations/traitement-thermique-dans-la-masse/>
- [6]. Norme XP CEN/TS 15679:2008-03
- [9]. <http://www.leboispassionnement.fr/67-le-bois-thermochauffe--veritable-alternative-aux-bois-exotiques-classe-4-naturelle.html> [archive]
- [10]. <http://www.boisdurablesdebourgogne.fr> [archive]
- [12]. C. Welzbacher, C. Brischke, and A. Rapp. Estimating the heat treatment intensity through various properties of thermally modified timber. In A presentation for course. IRG, May 2009.
- [15] <http://www.newglasstech.com/?page=product&cat=Safety&product=verre-trempe-thermique&lang=fr>
- [16] http://www.verreonline.fr/v_plat/tran_tremp2.php
- [17] <http://www.coutellerie-ap.fr/trempe/index.html>
- [19] Les bûcheurs disent que les briques emmagasinent la chaleur.
- [20] Définition de la Directive européenne relative à l'efficacité énergétique, 2006, reprise par la Directive 2010/31/UE [archive] du 19 mai 2010 sur la performance énergétique des bâtiments
- [21] <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10981>
- [22] <http://environnement.doctissimo.fr/un-air-plus-pur/pollution-et-sante/Quels-effets-sur-la-sante-.html>
- [23] <http://www.airparif.asso.fr/pollution/effets-de-la-pollution-generalites>
- [24] <http://www.futura-sciences.com/magazines/sante/infos/qr/d/corps-humain-pollution-atmospherique-impact-sante-4092/>
- [25] <http://www.airfobep.org/impacts-pollution-sante.html>
- [26] <http://sante-medecine.commentcamarche.net/faq/38050-pollution-de-l-air-consequences-sur-la-sante>
- [27] <http://www.grida.no/publications/vg/africa-fr/page/3144.aspx>
- [28] <http://www.mtaterre.fr/le-changement-climatique/43/Quel-est-le-principal-gaz-a-effet-de->
- [29] <http://www.nachi.org/acid-rain-french.htm>
- [30] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Abaqus>

Annexe

▪ Exécution du programme (SAFIR) :

219x219 steel section	NODE 3	0.1095 0
CERC219	NODE 4	0.1035 10
NPTTOT 440	NODE 5	0.1065 10
NNODE 57	NODE 6	0.1095 10
NDIM 2	NODE 7	0.1035 20
NDIMMATER 1	NODE 8	0.1065 20
NDDLMAX 1	NODE 9	0.1095 20
EVERY_NODE 1	NODE 10	0.1035 30
END_NDDL	NODE 11	0.1065 30
TEMPERAT	NODE 12	0.1095 30
TETA 0.9	NODE 13	0.1035 40
TINITIAL 20.0	NODE 14	0.1065 40
MAKE.TEM	NODE 15	0.1095 40
LARGEUR11 40000	NODE 16	0.1035 50
LARGEUR12 100	NODE 17	0.1065 50
NORENUM	NODE 18	0.1095 50
CERC219.tem	NODE 19	0.1035 60
NMAT 1	NODE 20	0.1065 60
ELEMENTS	NODE 21	0.1095 60
SOLID 36	NODE 22	0.1035 70
NG 2	NODE 23	0.1065 70
NVOID 0	NODE 24	0.1095 70
END_ELEM	NODE 25	0.1035 80
NODES_CYL	NODE 26	0.1065 80
NODE 1 0.1035 0	NODE 27	0.1095 80
NODE 2 0.1065 0	NODE 28	0.1035 90

Annexe

NODE 29	0.1065 90		NODE 56	0.1065 180				
NODE 30	0.1095 90		NODE 57	0.1095 180				
NODE 31	0.1035 100							
NODE 32	0.1065 100		NODELINE	0.003	0.00			
NODE 33	0.1095 100		YC_ZC	0.000	0.00			
NODE 34	0.1035 110		FIXATIONS					
NODE 35	0.1065 110		END_FIX					
NODE 36	0.1095 110		NODOFSOLID					
NODE 37	0.1035 120	ELEM	1 1 4 5 2 1	0.0				
NODE 38	0.1065 120	ELEM	2 2 5 6 3 1	0.0				
NODE 39	0.1095 120	ELEM	3 4 7 8 5 1	0.0				
NODE 40	0.1035 130	ELEM	4 5 8 9 6 1	0.0				
NODE 41	0.1065 130	ELEM	5 7 10 11 8 1	0.0				
NODE 42	0.1095 130	ELEM	6 8 11 12 9 1	0.0				
NODE 43	0.1035 140	ELEM	7 10 13 14 11 1					
NODE 44	0.1065 140			0.0				
NODE 45	0.1095 140	ELEM	8 11 14 15 12 1					
NODE 46	0.1035 150			0.0				
NODE 47	0.1065 150	ELEM	9 13 16 17 14 1					
NODE 48	0.1095 150			0.0				
NODE 49	0.1035 160	ELEM	10 14 17 18 15 1					
NODE 50	0.1065 160			0.0				
NODE 51	0.1095 160	ELEM	11 16 19 20 17 1					
NODE 52	0.1035 170			0.0				
NODE 53	0.1065 170	ELEM	12 17 20 21 18 1					
NODE 54	0.1095 170			0.0				
NODE 55	0.1035 180	ELEM	13 19 22 23 20 1					
				0.0				
		ELEM	14 20 23 24 21 1					
				0.0				

Annexe

- *Simulation du coup de b éier* *dans un tube sans soudure*

dimension p(10,10) , v(10,10),sigm(10,10)

data d,al,ro,g,hres,tmax,tf,a/0.25,600,1000,9.81,50,6,0.005,1414/

v0=0.1

alamd= 0.018

e= 0.0015

t=0

n=20

ns=n+1

dx=al/float(n)

dt=dx/a

pres=ro*g*hres

c1=ro*a

c4=d/(2*e)

open(unit=1,file='presionCI',status='old')

open(unit=2,file='vitesseCI',status='old')

open(unit=1,file='pamon1',status='old')

open(unit=2,file='vamon1',status='old')

open(unit=3,file='ppcouron1',status='old')

open(unit=4,file='vpcouron1',status='old')

open(unit=9,file='contrainte',status='old')

open(unit=5,file='paval1',status='old')

open(unit=6,file='vaval1',status='old')

j=1

do 10 i=1,ns

Annexe

```
v(i,j)=v0
p(i,j)=pres-(ro*alamd*dx*(i-1)*v0*abs(v0))2*d
write(1,'(f12.4,f12.4)')t,p(i,1)
write(2,'(f12.4,f12.4)')t,v(i,1)

10 continue

12 j=j+1

t=t+dt

do 15 i=2,n

A1=(alamd*ro*v(i-1,j-1)*abs(v(i-1,j-1)))/(2*d)
A2=(alamd*ro*v(i+1,j-1)*abs(v(i+1,j-1)))/(2*d)
cp=ro*a*v(i-1,j-1)-p(i-1,j-1)+A1*a*dt
cm=-ro*a*v(i+1,j-1)-p(i+1,j-1)+A2*a*dt

p(i,j)=-0.5*(cp+cm)
v(i,j)=(cp+p(i,j))/c1
sigm(i,j)=p(i,j)*(c4)
write(3,'(f0.0,f12.4)')t,p(i,j)
write(4,'(f0.0,f12.4)')t,v(i,j)
write(9,'(f0.0,f12.4)')t,sigm(i,j)

15 continue

i=1

A2=(alamd*ro*v(i+1,j-1)*abs(v(i+1,j-1)))/(2*d)
cm=-ro*a*v(i+1,j-1)-p(i+1,j-1)+A2*a*dt

p(i,j)=pres
v(i,j)=(cm+p(i,j))/(-c1)
write(1,'(f12.4,f12.4)')t,p(1,j)
write(2,'(f12.4,f12.4)')t,v(1,j)

i=ns
```

Annexe

```
if(t.lt.tf) then
v(i,j)=v0*(1-t/tf)
else
v(i,j)=0
endif
A1=(alamd*ro*v(i-1,j-1)*abs(v(i-1,j-1)))/(2*d)
cp=ro*a*v(i-1,j-1)-p(i-1,j-1)+A1*a*dt
p(i,j)=c1*v(i,j)-cp
write(5,'(f12.4,f12.4)')t,p(ns,j)
write(6,'(f12.4,f12.4)')t,v(ns,j)
if (t.lt.tmax) goto 12
end
```

Annexe

R ésultats obtenu :

La pression :

.0000	.0000	.1697
490500.0000	478252.8000	490500.0000
.0000	.0000	.1909
489625.2000	477378.0000	490500.0000
.0000	.0000	.2122
488750.4000	476503.2000	490500.0000
.0000	.0000	.2334
487875.6000	475628.4000	490500.0000
.0000	.0000	.2546
487000.8000	474753.6000	490500.0000
.0000	.0000	.2758
486126.0000	473878.8000	490500.0000
.0000	.0000	.2970
485251.2000	473004.0000	490500.0000
.0000	.0212	.3182
484376.4000	490500.0000	490500.0000
.0000	.0424	.3395
483501.6000	490500.0000	490500.0000
.0000	.0636	.3607
482626.8000	490500.0000	490500.0000
.0000	.0849	.3819
481752.0000	490500.0000	490500.0000
.0000	.1061	.4031
480877.2000	490500.0000	490500.0000
.0000	.1273	
480002.4000	490500.0000	
.0000	.1485	
479127.6000	490500.0000	

Annexe

La contrainte :

407292,0000	401461,0000	402195,0000
406563,0000	403646,6000	401466,1000
405834,0000	402920,6000	403647,6000
405105,0000	402189,0000	402921,6000
404376,0000	405838,0000	402193,5000
403647,0000	404379,0000	407296,4000
402918,0000	403650,0000	405841,0000
402189,0000	402921,1000	404383,5000
401460,0000	402192,1000	402924,1000
403647,5000	401463,0000	402195,0000
402918,5000	403646,5000	401466,1000
405835,0000	402920,5000	403647,6000
405106,0000	407295,0000	402921,6000
404377,0000	405838,0000	402193,5000
403648,1000	404379,0000	401468,0000
402919,1000	403650,0000	400736,0000
402190,0000	402921,1000	405844,0000
401461,0000	402192,1000	404388,1000
403646,6000	401463,0000	402930,0000
407293,5000	403646,5000	401470,0000
405835,0000	402920,5000	403649,5000
405106,0000	402192,5000	402923,6000
404377,0000	401463,0000	402195,6000
403648,1000	405841,0000	401470,0000
402919,1000	404383,5000	407298,0000
402190,0000	402924,1000	405844,0000

Annexe

La vitesse :

0,8994	0,8988	0,8975
0,8994	0,9012	0,8975
0,8994	0,9012	0,9000
0,8994	0,9012	0,9000
0,8994	0,8975	0,9000
0,8994	0,8981	0,8957
0,8994	0,8981	0,8963
0,8994	0,8981	0,8969
0,8994	0,8981	0,8975
0,9019	0,8981	0,8975
0,9019	0,9006	0,8975
0,8988	0,9006	0,9000
0,8988	0,8969	0,9000
0,8988	0,8975	0,9000
0,8988	0,8981	0,9000
0,8988	0,8981	0,9000
0,8988	0,8981	0,8951
0,8988	0,8981	0,8957
0,9012	0,8981	0,8963
0,8981	0,9006	0,8969
0,8988	0,9006	0,8994
0,8988	0,9006	0,8994
0,8988	0,9006	0,8994
0,8988	0,8963	0,8994
0,8988	0,8969	0,8944
0,8988	0,8975	0,8951