

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTÈRE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE
FILIERE DE GENIE MECANIQUE**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences & Technologie

Filière : Génie Mécanique

Parcours : Master II

Spécialité : Energétique

THÈME

**Etude de l'optimisation de la combustion d'une
chaudière à gaz et réduction des NOx par le
procédé « RUBERNING » pour un
développement durable**

**Préparé par : ABDOULAYE ILLIA Houkachatou
CHONGO Arménio Edson João**

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Lieu d'exercice	Qualité
ATMAN H	MCA	UIK Tiaret	Président
MEKROUSSI	MCB	UIK Tiaret	Examineur
SASSI Ahmed	MCA	UIK Tiaret	Encadreur

Table des matières

Introduction Générale	7
I. Généralité sur les Combustibles et la Combustion	10
I.1 Les combustibles	10
I.1.1 Les différents types de combustible.....	10
I.1.2 Gaz naturel	11
I.1.3 Gaz de pétrole liquéfiés (GPL)	12
I.1.3.1 Préparation des gaz de pétrole liquéfiés.....	12
I.2 Combustion	14
I.2.1 Notions générales sur la combustion	14
I.2.2 Les différents types de combustion.....	17
I.2.3 Bilan énergétique de la combustion	23
I.2.4 Combustion et émissions de CO ₂	26
I.2.4.1 Chaleur de combustion (système ouvert)	27
I.2.4.2 Pouvoir calorifique (PCI et PCS)	28
II. Etude des Chaudières	33
Introduction	33
II.1 Classification des chaudières	34
II.1.1 Classification par source de chaleur	35
II.1.1.1 Chaudières électriques	35
II.1.1.2 Chaudières à récupération	36
II.1.1.3 Chaudière à combustion	37
II.1.2 Classifications par type de fluide caloporteur	38
II.1.3 Classification par gamme de puissance	39
II.1.4 Classification par construction.....	39
II.1.4.1 Chaudière à tube de fumée	39
II.1.4.2 Chaudière à tubes d'eau.....	40
II.1.4.3 Chaudières compactes	40
II.1.4.4 Chaudières à retour de flamme.....	41
II.2 Principe de fonctionnement d'une chaudière	41
II.2.1 Description de la chaudière.....	42
II.2.2 Calculs sur les performances des chaudières	46
II.2.2.1 Rendement nominal ou rendement utile	47
II.2.2.2 Rendement de combustion.....	48
II.2.2.3 Rendement saisonnier ou rendement global annuel	49

II.4.2.4	Mesure du rendement global annuel.....	50
II.2.2.5	Influence du surdimensionnement sur le rendement	52
III.	Optimisation de la combustion et réduction des NOx	55
	Introduction.....	55
III.1	Le procédé REBURNING.....	55
III.2	Etude Comparative	56
I.2.1	Hypothèse et domaine de calcul	56
III.2.1.1	Méthodes numériques	56
III.2.1.2	Les hypothèses géométriques utilisées sont les suivantes :.....	57
III.2.1.3	Etude de la Température	57
III.2.1.4	Réduction des émissions Nox	58
	Conclusion Générale	64

Listes des tableaux :

Tableau : 1.1 Propriétés du Méthane.....	10
Tableau 1.2 : Propriétés de quelques hydrocarbures	11
Tableau 1.3 : Températures de rosée de propane et butane commerciaux.....	12
Tableau 1.4 – Enthalpie de formation à 25 °C pour quelques corps.....	23
Tableau 1.5 – Calcul des PCI et émissions de CO2 pour quelques combustibles.....	24
Tableau 1.6 – Émissions annuelles de CO2 pour une centrale thermique (rendement sur PCI de 0,33) suivant le combustible et émissions évitées en passant du carbone au méthane.....	25
Tableau 1.7 ; Les valeurs approximatives des pouvoirs calorifiques.....	27

Listes des figures :

Fig.I.1 : Combustion théorique du méthane pur.....	16
Fig.I.2 : Combustion des gaz naturels.....	16
Fig.I.3 : Combustion complète en défaut d'air.....	17
Fig.I.4 : combustion complète en excès d'air.....	18
Fig.I.5 : Analyse de combustion.....	19
Fig.I.6 : combustion incomplète.....	20
Fig.I.7 : Combustion stoechiométrique.....	21
Fig.1.8 : différence entre PCI et PCS.....	29
Fig. II-1 : Chaudière industrielle.....	31
Fig. II-2 : classification des chaudières.....	34
Fig. II-3 : chaudière électrique.....	35

Fig. II-4 : Chaudière a récupération.....	35
Figure3.5 Chaudière à foyer.....	36
Fig. II-6 : Chaudière à combustion (gaz).....	37
Fig. II-8 : Chaudière à tubes fumés.....	38
Fig. II-9 : chaudière compacte a deux passes.....	39
FigII.10 échangeur.....	41
Fig.II-11 : Brûleur gaz à air pulsé.....	43
Fig.II.12 : Brûleur gaz atmosphérique	44
Fig.II.13 : Rendements et pertes des chaudières traditionnelles et à condensation.....	47
Figure3.14 : Pertes de la chaudière par rayonnement et par balayage.....	49
Fig.II.15 : Détermination du rendement global annuel selon la norme DIN 4702-8.	50
FigII.16 : Rendements globaux annuels pour différents types de chaudière.....	51
Fig.II.17 : Cycle de fonctionnement d'un brûleur en fonction de son surdimensionnement.....	52
Fig.III.1 : chaudière utilisée.....	55
FigIII.1 Chaudière normal.....	56
FigIII.2 chaudière avec reburning	56
Image (a) : cas de référence.....	57
Image (b) : cas optimisé.....	57
Image (c) : cas de référence - production des NOx.....	58
Image (d) cas optimisé - réduction des NOx.....	58
Image (e) cas de référence : courbes des NOx.....	59
Image (f) cas optimisé : courbe des NOx.....	59

Introduction Générale

Introduction Générale

Le gaz naturel est considéré comme la troisième source d'énergie la plus utilisée dans le monde après le pétrole et le charbon, aujourd'hui le gaz naturel est une principale source alternative en énergie avec moins d'impact environnemental.

L'objectif de la présente étude est : L'optimisation de la combustion dans une chaudière à gaz, avec une adaptation du procédé REBURNING. Cela veut dire optimiser les différents paramètres de la combustion, à savoir la stœchiométrie, la température et le temps de séjours. Cette investigation va être faite par simulation numérique du processus de combustion dans une chaudière, en utilisant le logiciel FLUENT.

Optimiser la combustion des hydrocarbures passe également par la réduction des molécules nocives qu'elle engendre. Parmi elles, on s'intéresse aux oxydes d'azotes (NOx), capables d'altérer le fragile équilibre atmosphérique et au monoxyde de carbone (CO) qui peut quant à lui s'avérer mortel pour l'homme s'il est inhalé en grande quantité. La prise de conscience environnementale actuelle laisse fortement présager le durcissement des contraintes réglementaires portant sur ces émissions polluantes.

En moyen terme, cette étude a donc pour objectif d'aider l'exploitant dans la prédiction des émissions polluantes et ses besoins opérationnels définissent les propriétés de l'outil numérique à développer :

1. Prédire avec précision la formation des polluants (notamment le NO),
2. Disposer d'un temps de réponse rapide (utilisation dynamique sur site),
3. Fournir une méthodologie applicable à différentes technologies de chambre de combustion (géométrie), à différentes compositions du combustible (gaz naturel) et à divers régimes de fonctionnement.

Malgré le progrès des techniques expérimentales (méthodes de mesure non intrusives par diagnostic laser) et les avancées de la simulation numérique (machines massivement parallèles), mesurer ou simuler in situ la formation des polluants dans une configuration industrielle reste un challenge scientifique de haute volée.

Si l'expérience permet de valider les modèles proposés, la simulation numérique est l'unique voie de recherche qui est empruntée dans ce mémoire. Sa pertinence provient de la réduction des coûts de développement et de l'accès aux phénomènes locaux les plus complexes comme la formation et élimination des polluants.

Le présent mémoire se compose de trois parties dont l'objectif principal est la contribution pour la réduction des émissions des gaz à effet de serre ; nous allons présenter dans une

première partie les mécanismes de la combustion ainsi que les différents combustibles pouvant générer ces émissions ; nous avons développé dans la deuxième partie une étude sur les chaudières qui sont des équipements générateurs des émissions nocives ; dans la dernière partie, nous avons traité le procédé reburning et voir comment peut-il être adapté à ce type de combustion.

CHAPITR I

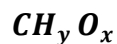
Généralité sur les Combustibles et la Combustion

I. Généralité sur les Combustibles et la Combustion

I.1 Les combustibles

Introduction

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 carbone et d'hydrogène. La composition des combustibles peut être représentées par la formule générique :



Soit pour un atome de carbone (C), on trouve en moyenne 'y' atome d'hydrogène (H) et 'x' atomes d'oxygène (O).

I.1.1 Les différents types de combustible

On distingue 3 types de combustible : solide, liquide et gazeux :

❖ Combustible solide

L'appellation combustible solide dépasse la notion familière de charbon ou de houille et permet de raccorder l'ensemble des ressources carbonées naturelles (biomasse, bois, charbon de bois, etc.) aux combustibles solides d'origine paléovégétale. La caractéristique commune des combustibles solides ainsi définis est de renfermer une proportion élevée de carbone. Cette apparente unité recouvre pourtant une très grande diversité de caractéristiques et de propriétés, principales causes des défis technologiques que posent les combustibles solides dans leurs applications modernes. [1]

❖ Combustible liquide

Les combustibles liquides tirés du pétrole brut se divisent en deux grandes classes :

- Les combustibles distillés, soutirés en phase gazeuse des colonnes de distillation des raffineries, tels que dans ce cas précis, on trouve les produits à molécules relativement légères qui distillent, éventuellement par entraînement à la vapeur d'eau, à leur température de craquage.
- Les combustibles résiduels, soutirés en bas de colonne de distillation.

Dans les combustibles résiduels, se concentrent les molécules les plus lourdes renfermées dans le pétrole brut ou formées au cours de certaines opérations de raffinage. A pression atmosphérique, ces molécules ne peuvent être portées à leur température d'ébullition sous peine d'être craquées par effet thermique. Dans ces fonctions, par ailleurs, se concentrent également une part importante des impuretés présentes dans le pétrole brut traité. [2]

❖ Combustible gazeux

Basé sur l'exploitation de gisement d'hydrocarbures enfermés à plus ou moins grande profondeur dans le sol, dans des roches magasins. Lorsque, par forage, Les gaz ainsi recueillis sont « humides », c'est-à-dire qu'ils contiennent des vapeurs d'hydrocarbures entraînées au moment de la séparation et dont la pression partielle dans le gaz est inférieure à leur tension de vapeur dans les conditions ambiantes. Réciproquement, la phase liquide contient des constituants légers qui, dans les conditions ambiantes de température et de pression, se présenteraient sous forme gazeuse, mais qui sont retenus en solution dans le liquide.

Bien entendu, il existe aussi des gisements de gaz naturel, c'est-à-dire des dépôts dans lesquels la quantité de produits liquides enfermés dans la roche est faible vis-à-vis de la quantité de produits légers, à fort tension de vapeur qui se vaporisent après extraction et détente.

Les produits bruts extraits des gisements sont raffinés avant leur emploi. [2]

I.1.2 Gaz naturel

Sous cette dénomination, on désigne des gaz combustibles qui ne se liquéfient pas aux températures ordinaires sous les pressions de quelques bars sous lesquelles ces gaz sont généralement transportés et manipulés.

Le constituant essentiel des gaz naturels est le méthane, le plus simple et le plus léger de tous les hydrocarbures. C'est ainsi qu'il constitue 69% du gaz brut de Lacq, 97,6% du gaz épuré, 81% du gaz brut d'Hassi-R'Mel. 96% du gaz de Cortemaggiore, 81% du gaz de Groningue. A côté du méthane, le gaz naturel contient également des hydrocarbures de masse moléculaire plus élevée : éthane, propane, butane et même de petites quantités d'hydrocarbure en C₅ ou C₆. Le gaz naturel peut également renfermer des gaz non combustibles, tels que l'azote (14 % dans le gaz de Groningue) ou le gaz carbonique (9,6 % dans le gaz de Lacq brut) ainsi que d'autres produits (par exemple 15,2 % d'hydrogène sulfuré H₂S dans le gaz de Lacq brut). Compte tenu de leur forte teneur en méthane, les gaz naturels ont généralement des propriétés

physiques et chimiques voisines de celles du méthane. Le tableau ci-dessous rappelle quelques-unes de propriétés du méthane. [2]

Tableau : 1.1

PROPIETES DU METHANE

Masse volumique (g/dm ³)	0,7168
Densité par rapport à l'air	0,554
Pouvoir calorifique supérieur (Kcal/m ³)	9 510
Pouvoir calorifique inférieur (Kcal/m ³)	8 570
Volume d'air de combustion à richesse 1	9,52
Vitesse de combustion laminaire à richesse 1 dans l'air à 25°C (cm/s)	43,4
Température de combustion adiabatique à richesse 1 dans l'air à température initiales de 25°C (°C)	1952
limites d'inflammabilité (concentration en méthane dans l'air) :	
limite inférieur environs (%)	5
limite supérieur environs (%)	15
température d'auto-inflammation (°C)	580

I.1.3 Gaz de pétrole liquéfiés (GPL)

Deux gaz différents sont offerts à la consommation sur le marché en général : le propane et le butane.

Les gaz de pétrole liquéfiés sont pour leur plus grande part fournis par les raffineries qui les recueillent lors de la distillation des pétroles bruts. [2]

I.1.3.1 Préparation des gaz de pétrole liquéfiés

Sur les champs de gaz, le propane et le butane se retrouvent partiellement dans les produits condensés à la tête de puits, bien qu'une fraction de ces gaz accompagne le méthane et se retrouve dans les constituants du gaz naturel.

Mais, qu'il s'agisse de traiter des condensats recueillis à la tête des puits ou des pétroles bruts liquides, le butane et le propane se séparent au cours des distillations fractionnées auxquelles sont soumis les produits bruts.

Tableau 1.2 : Propriétés de quelques hydrocarbures

Hydrocarbure	Etane	Etène ou (Ethylène)	Propane	Propène ou (Propylène)	n-butane	Isobutane	Butène-1	Iso-butène	n-pentane	Pentène-1	Isopentane
Propriétés PCS { kcal/kg Kcal/m ³	12399 16820	12022 15150	12034 24290	11692 22390	11832 31990	11797 31480	11577	11505	11715 40520	11545	11688
PCI { kcal/kg kcal/m ³	11350 15390	11272 14200	11072 22370	10942 20960	10826 29540	10892 29070	10826	10755	10840 37290	10755	10813
Kg air/kg (NTP) m ³ air/kg (NTP) m ³ air/m ³	16,05 12,41 15,65	14,74 11,40 14,37	15,63 12,02 24,41	14,74 11,40 21,83	15,42 11,93 32,25	15,42 11,93 31,83	14,74 11,40	14,74 11,40	15,58 11,40	14,74 11,40	15,58 12,05
Teneur maximale en CO ₂ dans la fumées { humides sèches	10,92 13,12	13,02 14,98	11,56 13,69	13,02 14,98	11,90 13,99	13,02 14,98	13,02 14,98	12,10 14,17	13,02 14,98	13,02 14,98	12,10 14,17
Température (°C) de combustion adiabatique, à la richesse 1 dans l'air à 25°C à la pression de 1 bar	1986	2096	1994	2061	1996	1992	2048	2040	1999	2040	1996
Limite d'inflammabilité, % en volume dans le mélange combustible-air :											
Limite inférieure	3	3,1	2,25	2,2	1,85	1,8	1,6	--	1,45	--	1,4
Limite supérieure	12,5	32	9,4	10,5	8,4	8,4	9,35	--	7,8	--	7,5
Température d'auto-inflammation dans l'air à la richesse 1, (°C)	490	520	480	460	420	480	385	--	290	--	450

La distillation, à pression constante, d'un mélange de produits miscibles se fait en effet à température progressivement croissante au fur et à mesure de la vaporisation. Les vapeurs émises au débit de l'opération sont en effet plus riches en produits volatils que le liquide dans lequel se retrouvent les produits plus lourds.

En raffinerie, la séparation des différents produits se fait dans des tours de fractionnement munies de plateaux assurant un contact étroit entre les phases liquide et vapeur qui circulent en sens inverse : les vapeurs de bas en haut, la chaleur de telle sorte qu'un gradient de température s'établit le long de la tour de fractionnement, dite colonne à plateaux. L'extraction de la chaleur dans le haut de la tour est augmentée et le gradient de la température contrôlé par la recirculation, après refroidissement, d'une partie des produits recueillis en tête.

Au cours de la distillation fractionnée, les gaz sortent en haut de colonne. La séparation deux propane et du butane, et surtout la séparation des produits saturés et des produits non saturés (propène et butène) se fait dans des colonnes spéciales munies de nombreux plateaux. Cette séparation est cependant incomplète et les produits commerciaux sont des mélanges de différents hydrocarbures voisins.

Le tableau ci-contre rassemble quelques valeurs des propriétés physiques et chimiques d'hydrocarbures gazeux entrant dans la composition des GPL.

Il est utile, dans la manipulation des produits commerciaux, de connaître les températures de rosée en fonction de la pression ; le tableau Suivant donne les valeurs observées sur des produits commerciaux pour les différentes pressions. [2]

Tableau 1.3 : Températures de rosée de propane et butane commerciaux

Pression relative du produit (bar)	Propane	Butane
0	-42	-0,5
1	-26,5	+19
2	-14	+31
3	-5,5	+40,5

I.2 Combustion

I.2.1 Notions générales sur la combustion

Des réactions chimiques interviennent dans de nombreux problèmes d'énergétique : la combustion est néanmoins le cas le plus important où des réactions chimiques sont mises en jeu dans l'énergétique. En présence de réactions chimiques, la loi de conservation de matière s'applique sur chaque élément. Considérons par exemple la réaction d'oxydation du carbone (combustion du carbone en présence d'oxygène) qui s'écrit :



Réactifs produit

Cette équation montre que deux moles réagissent ensemble pour donner naissance à une seule mole. Les réactifs peuvent être gazeux, liquides ou solides de même que les produits. Pour la réaction d'oxydation du carbone, l'un des réactifs est solide (le carbone) alors que l'autre (l'oxygène) est gazeux et le produit est gazeux. La flèche indique ici que la réaction est irréversible, on sait facilement faire un feu à partir de charbon ou de bois mais on ne sait pas reconstituer du charbon ou du bois à partir de la fumée ! Dans le cas de la combustion d'hydrocarbures (rappelons qu'un hydrocarbure ne contient que du carbone et de l'hydrogène) de formule chimique $\text{C}_\alpha\text{H}_\beta$, il y a oxydation du carbone et de l'hydrogène pour donner naissance à du dioxyde de carbone et à de l'eau. En général l'hydrocarbure est liquide ou gazeux et l'oxygène, le dioxyde de carbone et l'eau sont gazeux (dans certains cas il y a formation d'eau liquide). Les hydrocarbures et plus spécifiquement les alcanes (de formule chimique $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$) jouant un rôle important dans la combustion, nous allons considérer la combustion de ces alcanes qui s'écrit :

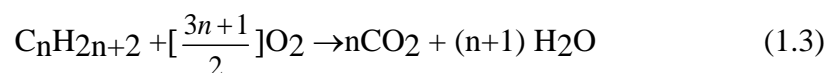


réactifs produits

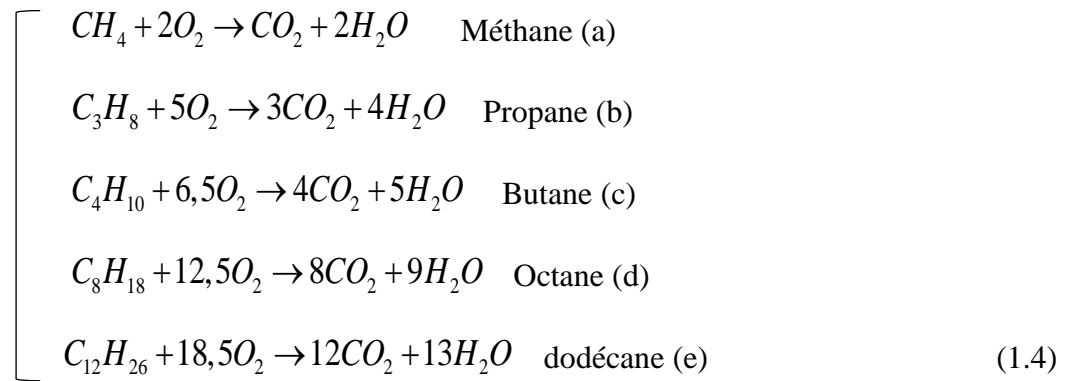
Où n est un entier positif et les α , β et γ sont les coefficients stœchiométriques positifs de la réaction. L'équation de la réaction est toujours rapportée à une mole de combustible. Pour équilibrer une telle réaction, on utilise les règles de stœchiométrie, à savoir que l'on doit trouver le même nombre d'atomes de chaque élément du côté des réactifs et du côté des produits (loi de Lavoisier « *Rien ne se perd, rien ne se crée* »). Effectuant un tel bilan successivement sur l'élément carbone puis hydrogène et enfin oxygène, on obtient :

$$\alpha = (3n+1)/2 \quad \beta = n \quad \gamma = n+1$$

Pour un alcane, la réaction [1.2] s'écrit donc :



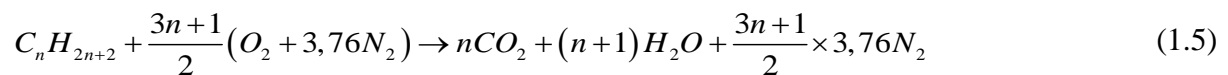
Par exemple, pour le méthane (représentatif du gaz naturel), le propane, le butane, l'octane (représentatif de l'essence) et le dodécane (représentatif du diesel), on obtient :



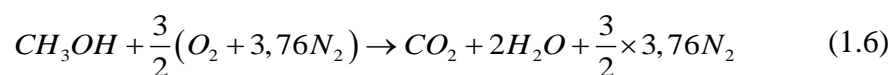
La réaction étant équilibrée et connaissant l'état (liquide ou gazeux) des différents réactifs et produits, on peut ainsi facilement calculer le nombre de moles dans les différentes phases dans le flux des réactifs et des produits s'il s'agit d'un écoulement permanent en système ouvert.

Généralement, la combustion ne s'effectue pas à partir d'oxygène pur mais à partir d'air. Dans le cas le plus général de combustion, on dispose d'un combustible (solide, liquide ou gazeux) qui peut être du carbone (charbon sous ses différentes formes ou bois), un hydrocarbure (essence à base essentiellement d'octane, C₈H₁₈ ou diesel à base essentiellement de dodécane, C₁₂H₂₆) ou un liquide tel le méthanol ou l'alcool (biocarburants, qui ne sont pas des alcanes) ou d'autres combustibles moins utilisés. On dispose de plus d'un comburant oxydant : généralement de l'air ou de l'oxygène pur.

Lorsque l'oxydant est de l'air, il faut tenir compte de la composition de l'air qui est de 21% d'oxygène en volume et de 79% d'azote en volume, ce qui correspond à 3,76 moles d'azote pour 1 mole d'oxygène. La combustion complète d'un alcane en présence d'air s'écrit donc :



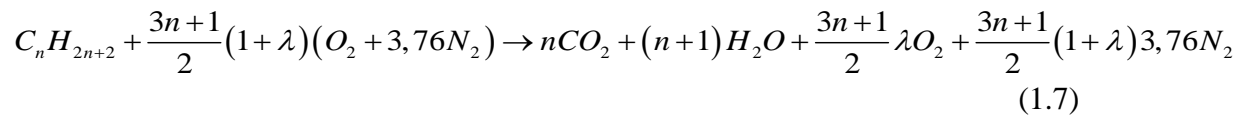
Si le combustible n'est pas un alcane, la même méthode s'applique. Par exemple, pour la combustion complète du méthanol en présence d'air, on commence par effectuer le bilan sur le carbone, ensuite on passe au bilan sur l'hydrogène, ensuite on comptabilise les oxygènes et on termine en comptabilisant les azotes et on obtient :



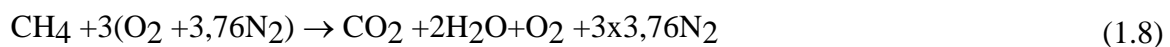
Cette démarche donne la quantité exacte d'oxygène nécessaire pour que la combustion soit

complète. On dit en effet qu'une combustion est complète si l'oxydation du carbone est totale (formation de dioxyde de carbone et pas de monoxyde de carbone).

Si on utilise de l'air en excès, il y a présence d'air dans les produits et on définit le taux d'air en excès, λ . Par exemple pour un alcane, on obtient :



Une combustion de méthane comprenant 50 % d'air en excès ($\lambda=0,5$) s'écrit ainsi :



Dans la combustion avec excès d'air, on trouve de l'oxygène dans les produits de combustion ce qui n'était pas le cas de la combustion complète avec la quantité adéquate d'air ($\lambda=0$). Il est important de noter que les quantités de CO_2 et d'eau dans les produits sont les mêmes pour une combustion complète en présence d'oxygène pur, d'air stœchiométrique ou d'air en excès. La différence entre les différentes combustions réside uniquement sur les flux d'oxygène et d'azote.

Si la combustion est incomplète (chambre à combustion imparfaite ou manque d'air), alors les produits de combustion comportent du CO (monoxyde de carbone), ce qui est très mauvais pour la pollution atmosphérique et doit être évité dans la mesure du possible. [3]

I.2.2 Les différents types de combustion

La combustion apparaît sous la forme d'une flamme constituée par le volume gazeux dans lequel s'effectuent les réactions chimiques d'oxydation

Il existe quatre types de combustion :

- la combustion stœchiométrique ou combustion théorique ;
- la combustion complète en excès d'air ;
- la combustion complète en défaut d'air ;
- la combustion incomplète.

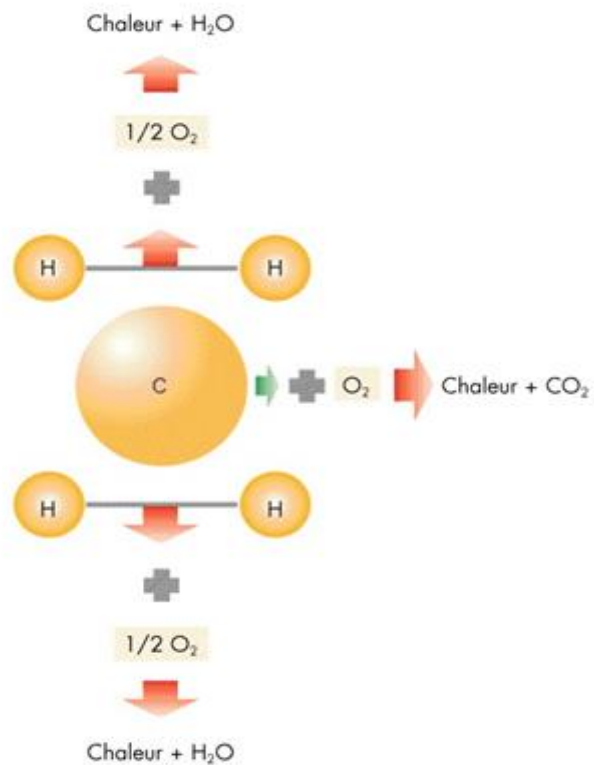


Fig.I.1 : Combustion théorique du méthane pur

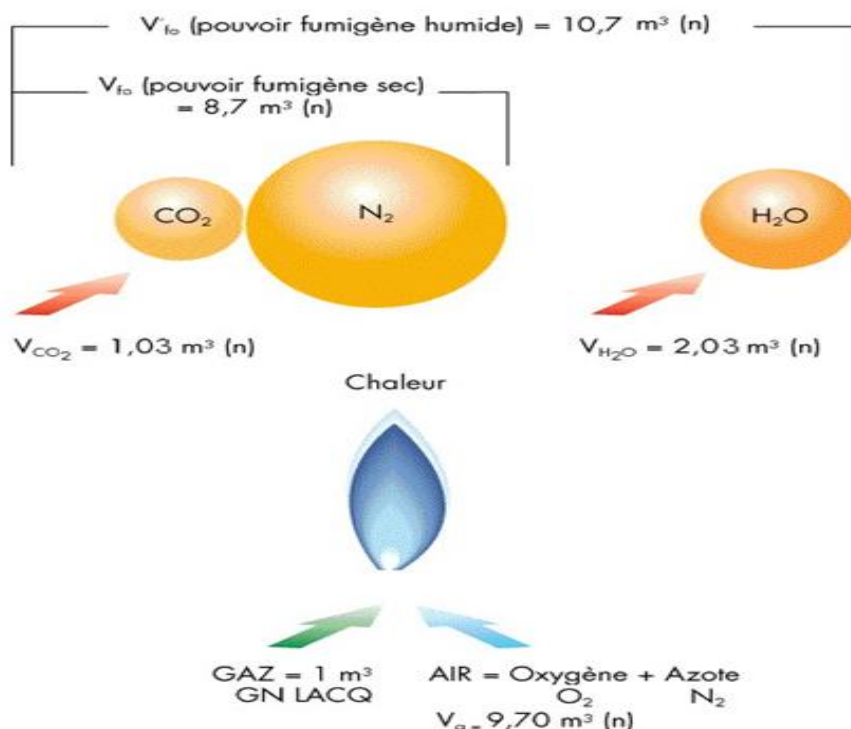


Fig.I.2 : Combustion des gaz naturels

❖ Combustion complète en défaut d'air (utilisation totale de l'oxygène)

C'est la combustion donnée par 1 m³(n) de gaz associé à un volume d'air inférieur à l'air stoechiométrique, les réactions d'oxydation étant menées à leur terme.

On trouve dans les produits de combustion :

- des imbrûlés : monoxyde de carbone et hydrogène et, pour les défauts d'air importants, méthane et carbone suie ;
- de l'azote ; du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau.

Ce type de combustion est parfois recherché dans certaines applications industrielles en raison de l'action de tels produits de combustion sur la charge de certains fours. Il est très difficile à réaliser dans la pratique.

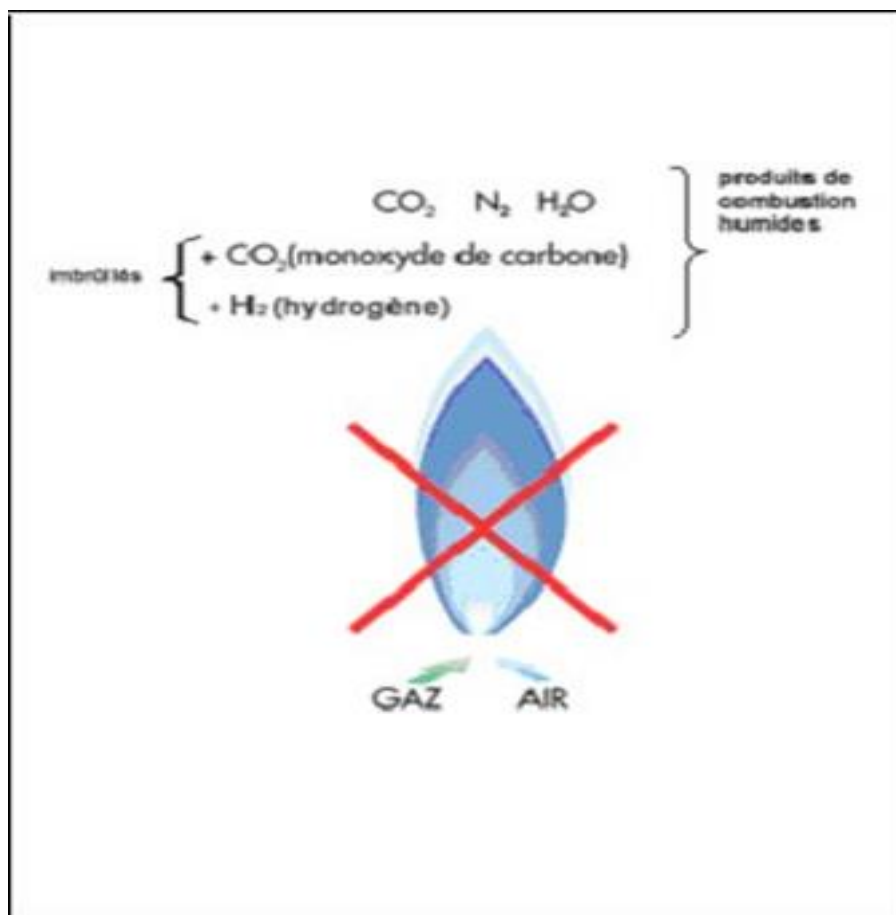


Fig.I.3 : Combustion complète en défaut d'air

❖ Combustion complète en excès d'air

C'est la combustion donnée par 1 m³(n) de gaz associé à un volume d'air supérieur à l'air stoechiométrique.

Pour chaque m³ de gaz, une partie de l'air associé, égale à l'air stoechiométrique, sert à assurer l'oxydation complète du carbone et de l'hydrogène. Le reste, l'air en excès, ne participe pas à la combustion et se retrouve, intégralement, dans les produits de combustion qui comprennent :

- du dioxyde de carbone ;
- de la vapeur d'eau ;
- de l'oxygène ;
- de l'azote.

Ce type de combustion est le plus courant.



Fig.I.4 : combustion complète en excès d'air

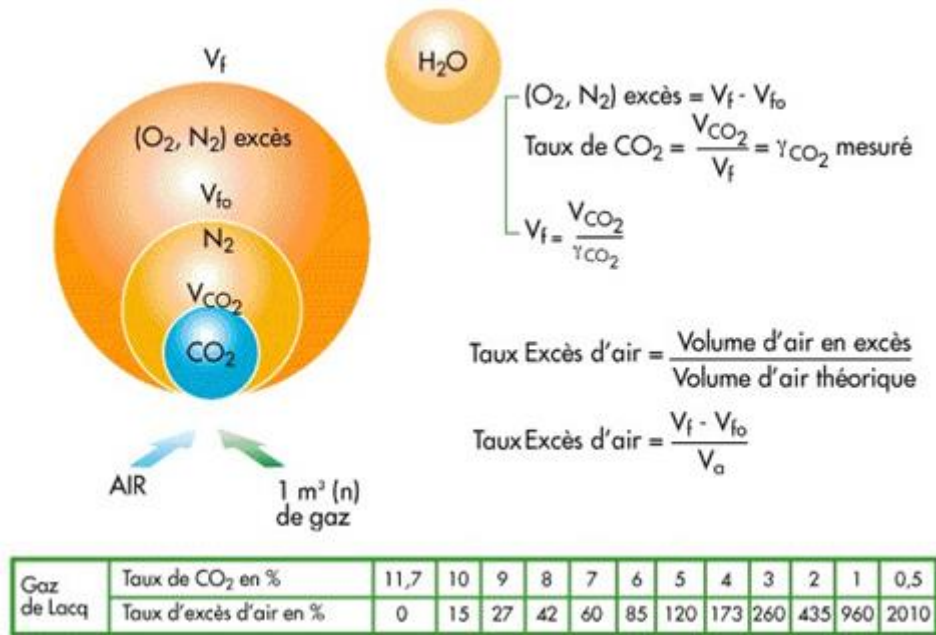


Fig.I.5 : Analyse de combustion

❖ Combustion incomplète

La combustion est incomplète si 1 m³(n) de gaz est associé à un volume d'air quelconque et, en raison de conditions défavorables, une partie du gaz ne participe pas à la combustion. Celle-ci se caractérise par la présence simultanée d'oxygène et d'imbrûlés dans les produits de combustion. Voir schéma ci-dessous

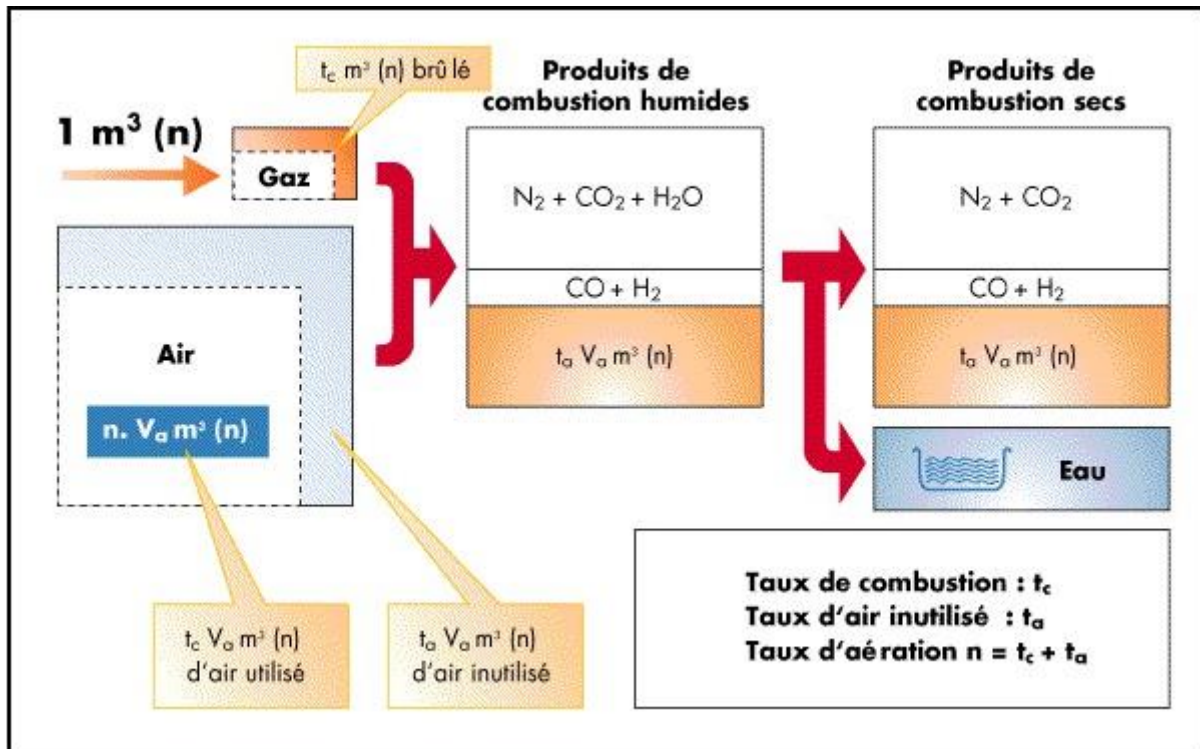


Fig.I.6 : combustion incomplète

On rencontre ce type de combustion lorsque le gaz et l'air disponibles ne se combinent pas totalement dans la zone de combustion. Ce peut être le résultat de la détérioration d'un brûleur, qui assure un mélange imparfait, ou d'un refroidissement brutal provoquant l'arrêt de la combustion. On peut également rencontrer une telle combustion sur des fours industriels lorsqu'une partie de l'air est aspirée par des ouvertures du fait de la dépression régnant dans l'enceinte.

Cette combustion n'est jamais souhaitable et correspond à des équipements mal réglés ou détériorés.

❖ Combustion stoechiométrique

C'est la combustion produite par 1 m³ (n) de gaz associé à un volume d'air égal à l'air stoechiométrique. Tout le carbone et tout l'hydrogène sont oxydés et tout l'oxygène de l'air comburant a été utilisé.

Les produits de combustion contiennent seulement :

- du dioxyde de carbone ;
- de la vapeur d'eau ;
- de l'azote.

Dans ce cas, le volume des produits de combustion est minimal ; il est égal au pouvoir fumigène.

Ce type de combustion est difficile à réaliser dans la pratique, car il nécessite de fournir au brûleur l'air et le gaz très rigoureusement dans les proportions stoechiométriques. De plus, tout manque d'homogénéité du mélange risque d'entraîner une combustion incomplète. [4]

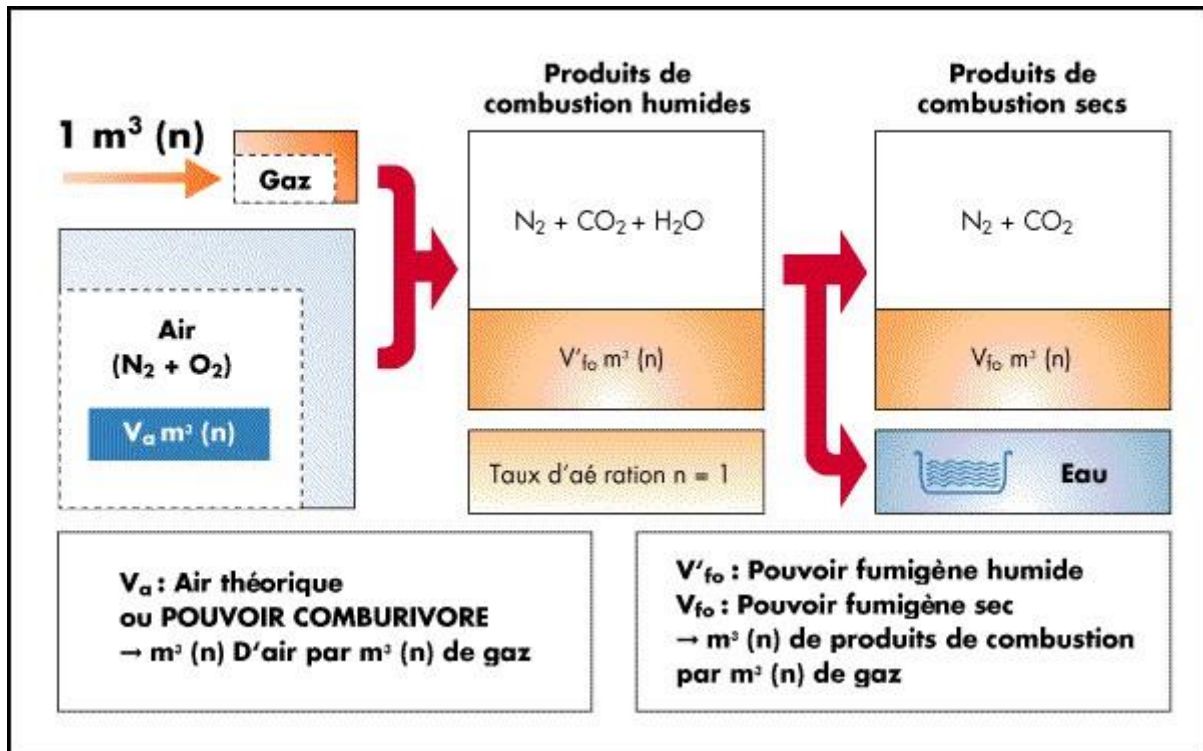
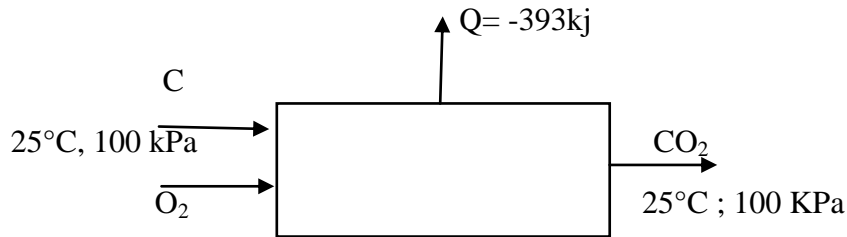


Fig.I.7 : Combustion stoechiométrique

I.2.3 Bilan énergétique de la combustion

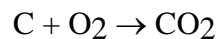
Enthalpie de formation

Nous avons vu plus haut que pour connaître les chaleurs mises en jeu au cours de la combustion, il fallait connaître les enthalpies des différents corps présents dans la réaction. Ces enthalpies peuvent être aisément calculées à partir des enthalpies de formation. Pour introduire la notion d'enthalpie de formation, nous allons considérer un procédé (idéalisé) de la combustion mettant en jeu du carbone à l'état solide et de l'oxygène à l'état gazeux.



Exemple d'un procédé idéalisé de combustion mettant en jeu 1 mole de carbone, plus 1 mole d'oxygène et donnant 1 mole de dioxyde de carbone.

Supposons que l'oxygène gazeux et le carbone solide entrent dans la chambre de combustion à 25 °C et à la pression atmosphérique de 0,1 MPa et que le dioxyde de carbone sorte de la chambre de combustion à la même température de 25 °C et à la même pression de 0,1 MPa. La réaction s'écrit :



Appliquant le premier principe (tenant compte que $W = 0$), on obtient :

$$Q = (H_p - H_r)$$

Or :

$$H_r = \bar{H}_c + \bar{H}_{O_2} \quad H_p = \bar{H}_{CO_2}$$

D'où :

$$Q = \bar{H}_{CO_2} - (\bar{H}_c + \bar{H}_{O_2}) \quad (1.18)$$

La mesure (par calorimétrie) de la chaleur Q mise en jeu au cours de la combustion donne la différence entre l'enthalpie des produits de combustion et celle des réactifs. Pour les réactions chimiques, on définit une règle très précise pour l'origine des enthalpies : l'origine des enthalpies pour tous les corps constitués d'un seul élément est prise égale à zéro à l'état de référence de 25 °C et 0,1 MPa. Dans la mesure où :

$$\left[\bar{H}_c \right]_{25^\circ C; 0,1 MPa} = \left[\bar{H}_{O_2} \right]_{25^\circ C; 0,1 MPa} = 0 \quad (1.9)$$

On obtient :

$$Q_{25^{\circ}\text{C};0,1\text{MPa}} = \left[\bar{H}_{O_2} \right]_{25^{\circ}\text{C};0,1\text{MPa}} = \bar{H}_f^0 (\text{CO}_2) \quad (1.10)$$

Cette enthalpie du composé CO_2 à 25°C et $0,1\text{ MPa}$ est appelée enthalpie de formation et est notée \bar{H}_f^0 . Connaissant l'enthalpie de formation de tous les corps à l'état de référence de 25°C et $0,1\text{ MPa}$, on peut en déduire leur enthalpie dans tout autre état car l'enthalpie est une fonction d'état :

$$\bar{H}_{T,P} = \left[\bar{H}_f^0 \right]_{25^{\circ}\text{C};0,1\text{MPa}} + \left[\Delta\bar{H} \right]_{25^{\circ}\text{C};0,1\text{MPa} \rightarrow T,P} \quad (1.11)$$

Où le terme $\Delta\bar{H}$ est calculé en choisissant un chemin thermodynamique judicieux rendant ce calcul aisé. Si le corps est un gaz parfait, l'enthalpie ne dépend que de la température et l'on a :

$$\Delta\bar{H} = \int_{298k}^T C_p dT \quad \text{gaz parfait} \quad (1.12)$$

L'enthalpie de formation des corps constitués de plus d'un élément est ainsi théoriquement obtenu à partir de la mesure expérimentale de la chaleur de réaction (dans un calorimètre) dans des conditions normales de température et de pression. Dans le tableau (1.4) sont données des valeurs d'enthalpies de formation pour quelques corps intervenant dans des procédés de combustion.

Tableau 1.4 – Enthalpie de formation à 25°C pour quelques corps.

Corps	Formule	M	Etat	\bar{H}_f^0 (KJ/mol)
Eau	H_2O	18	gaz	-241
Eau	H_2O	18	liquide	-285
Carbone	C	12	solide	0
Monoxyde de carbone	CO	28	gaz	-110
Dioxyde de carbone	CO_2	44	gaz	-393
Méthane	CH_4	16	gaz	-75
Octane	C_8H_{18}	114	gaz	-208
Octane	C_8H_{18}	114	liquide	-250

Méthanol	CH ₃ Oh	32	gaz	-201
----------	--------------------	----	-----	------

Tenant compte de ces notions d'enthalpie de formation ainsi que de variation d'enthalpie due à la température, on obtient pour les enthalpies des réactifs et des produits : [3]

$$H_r = H_r^0 + \Delta H_r \quad (1.13)$$

$$H_p = H_p^0 + \Delta H_p \quad (1.14)$$

Dans ce cas, le premier principe d'une chambre à combustion ouverte s'écrit :

$$\boxed{Q = (H_p^r - H_r^0 + \Delta H_p - \Delta H_r)} \quad (1.15)$$

1.2.4 Combustion et émissions de CO₂

L'émission de CO₂ est une caractéristique de la combustion qui est indépendante de l'excès d'air. Dans la mesure où les émissions sont une préoccupation importante à notre époque, il est utile de classer les combustibles en fonction du CO₂ émis pour fournir une énergie déterminée. Une telle comparaison peut être facilement effectuée à partir de l'équation de la combustion et du calcul du PCI. Les résultats sont présentés dans le tableau (1.5).

Tableau 1.5 – Calcul des PCI et émissions de CO₂ pour quelques combustibles.

Combustible	PCI		CO ₂ émis		
	kJ/mol	kJ/kg	mol CO ₂ / mol comb.	kg CO ₂ /MJ	kg CO ₂ /kWh
C	393	32 750	1	0,112	0,403
CH ₄	800	50 000	1	0,055	0,198
C ₈ H ₁₈	5 105	46 600	8	0,069	0,248

D'après le tableau, on constate que, pour une production de chaleur donnée, le méthane émet deux fois moins de CO₂ que le carbone et sensiblement moins que l'octane. C'est la raison

pour laquelle, à l'heure actuelle, la substitution du gaz naturel au charbon (en Chine et dans l'ex-Allemagne de l'Est par exemple) se traduit par une réduction conséquente des émissions de CO₂.

Exemple

Considérons une centrale thermique de 100 MWh (7 000 heures de fonctionnement par an) qui produit de l'électricité avec un rendement sur PCI de 0,33, ses émissions de CO₂ suivant le combustible utilisé sont présentées dans le tableau (1.6).

Tableau 1.6 – Émissions annuelles de CO₂ pour une centrale thermique (rendement sur PCI de 0,33) suivant le combustible et émissions évitées en passant du carbone au méthane.

Combustible	Energie électrique (MWh/an)	Energie primaire (MWh/an)	CO ₂ émis (t/an)	Emissions évitées (t/an)
C	700 000	2 100 000	846 000	0
CH ₄	700 000	2 100 000	416 000	430 000

Le passage du carbone (charbon) au méthane (gaz naturel) permet d'éviter d'émettre 430 000 t de CO₂ par an soit une réduction de moitié des émissions. [3]

I.2.4.1 Chaleur de combustion (système ouvert)

La démarche à suivre pour calculer la chaleur de combustion est de calculer la quantité de chaleur. Il faut noter que dans ce cas précis, la chaleur de combustion échangée avec l'extérieur n'est plus nulle.

En l'absence d'échange de travail mécanique avec le milieu extérieur, l'utilisation du premier principe, conduit à :

$$-Q = \text{PCI} + (\Delta H_f - \Delta H_p) \quad \text{ou} \quad -Q = \text{PCS} + (\Delta H_f - \Delta H_p) \quad (1.16)$$

Suivant que la vapeur sort à l'état vapeur (PCI) ou à l'état liquide (PCS). Le terme ΔH_p étant positif, la chaleur de combustion, $-Q$, est d'autant plus élevée que ΔH_p est faible, donc que la température des gaz de sortie est faible. C'est la raison pour laquelle, les chaudières à condensation (qui permettent d'une part de récupérer une partie de la chaleur de condensation

de l'eau et d'autre part de faibles températures de gaz d'échappement) ont été développées pour augmenter le rendement. On définit un rendement sur PCI ou sur PCS des chaudières :

$$\eta_{ch}^{PCI} = \frac{-Q}{PCI} \text{ ou } \eta_{ch}^{PCS} = \frac{-Q}{PCS} \quad (1.17)$$

Notons que, pour une chaleur de combustion donnée, $\eta_{ch}^{PCS} < \eta_{ch}^{PCI}$. Si l'on ne récupère pas la chaleur de condensation et si les conditions d'admission sont les conditions normales, on obtient : [3]

$$\eta_{ch}^{PCI} = \frac{-Q}{PCI} = 1 - \frac{\Delta H_p}{PCI} \quad (1.18)$$

I.2.4.2 Pouvoir calorifique (PCI et PCS)

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur produite par sa combustion, à pression constante et dans les conditions dites "normales" de température et de pression (c'est à dire à 0°C et sous une pression de 1 013 mbar). Le pouvoir calorifique du gaz naturel s'exprime en kWh par mètre cube.

La combustion d'un produit génère, entre autres, de l'eau à l'état de vapeur. Certaines techniques permettent de récupérer la quantité de chaleur contenue dans cette eau de combustion en la condensant (chaudières à condensation).

On distingue donc deux pouvoirs calorifiques :

- le pouvoir calorifique inférieur (PCI) qui suppose que les produits de combustion contiennent l'eau de combustion à l'état de vapeur. La chaleur contenue dans cette eau n'est pas récupérée.
- Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) qui suppose que l'eau de combustion est entièrement condensée. La chaleur contenue dans cette eau est récupérée.

Pour un même combustible, le PCS est toujours supérieur au PCI. Il existe, pour la plupart des combustibles, un rapport entre ces deux coefficients :

- Gaz naturel : 1,111
- Butane, Propane : 1,087
- FOD : 1,075
- FOL : 1,055

- Charbon : 1,052

Le gaz naturel permet de récupérer, par la condensation, la chaleur contenue dans les fumées sans qu'il y ait de problème de corrosion. Les rendements courants des chaudières à condensation peuvent atteindre 105 % sur PCI.

Ainsi, en raisonnant en kWh PCI, on atteint des rendements supérieurs à 100 %. Le raisonnement en kWh PCS est donc plus adapté à l'énergie gaz naturel car les rendements sont toujours inférieurs à 100 %. Par exemple, un rendement de 110 % en PCI correspond à un rendement de 99 % en PCS.

Les valeurs approximatives des pouvoirs calorifiques sont représentées dans le Tableau ci-dessous : [4]

Tableau 1.7 ; Les valeurs approximatives des pouvoirs calorifiques

	PCI	PCS
Gaz naturel	de 8 à 11,5 kWh/m ³	de 9 à 13 kWh/m ³
Butane, Propane	≅ 13,5 kWh/kg	≅ 15 kWh/kg
FOD*	≅ 12 kWh/kg	≅ 13 kWh/kg
FOL	≅ 11 kWh/kg	≅ 12 kWh/kg
Charbon	≅ 8 kWh/kg	≅ 8,5 kWh/kg
* <i>La densité du FOD à 15°C avoisine les 0.844</i>		

❖ **Le pouvoir calorifique supérieur et le pouvoir calorifique inférieur d'un gaz combustible**

La combustion d'un gaz, tel que le gaz naturel constitué pour sa plus grande part de méthane, produit du gaz carbonique, de la vapeur d'eau et de la chaleur.

Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète, à pression constante, d'un mètre cube de gaz mesuré à 0°C sous 1 013 mbar. Les constituants du mélange combustible sont pris secs et à 0°C et les produits de la combustion sont ramenés à 0°C. L'eau résultant de la combustion est supposée ramenée à l'état liquide.

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) répond à la même définition que celle du PCS, mais l'eau de combustion est supposée conservée à l'état de vapeur à 0°C.

On s'aperçoit que, dans la mesure du PCS, on récupère la quantité de chaleur supplémentaire que dégage la vapeur d'eau lorsqu'elle se condense en eau liquide et que l'on appelle la chaleur latente.

Le gaz de Lacq, par exemple, se compose pour 97,3% de méthane, 2,1% d'éthane, 0,2% de propane et 0,4% de divers gaz. La combustion de 1 m³(n) de gaz de Lacq produit 2,03 m³(n) de vapeur d'eau, soit 1,62 kg d'eau et dégage 10,2 kWh de chaleur (PCI).

Le changement d'état de l'eau vapeur en eau liquide dégage 1,1 kWh supplémentaire. Pour 1 m³(n) de gaz combustible, la quantité totale de chaleur récupérable est :

10,2 kWh (chaleur sensible) + 1,1 kWh (chaleur latente) = 11,3 kWh et représente le pouvoir calorifique supérieur (PCS).

Cette distinction entre PCS et PCI trouve son intérêt pratique dans les chaudières à condensation. En effet, dans les chaudières traditionnelles, la vapeur d'eau des produits de combustion est évacuée dans la cheminée. La chaleur utile dégagée par la combustion du gaz peut se définir par rapport au PCI.

Par contre, dans une chaudière à condensation, une fraction des produits de combustion, variable selon la chaudière et son point de fonctionnement, est condensée dans un échangeur qui récupère une partie de la chaleur latente de la vapeur d'eau. On conçoit donc que dans ces chaudières la chaleur utile transmise au fluide caloporteur puisse être supérieure à celle due au seul PCI et que l'on puisse ainsi obtenir des valeurs de rendement supérieures à 100% par rapport au PCI.

Pour le gaz naturel, le rendement exprimé par rapport au PCS est égal au rendement exprimé par rapport au PCI multiplié par 0,90 : Rendement (% PCS) = 0,90 x Rendement (% PCI).

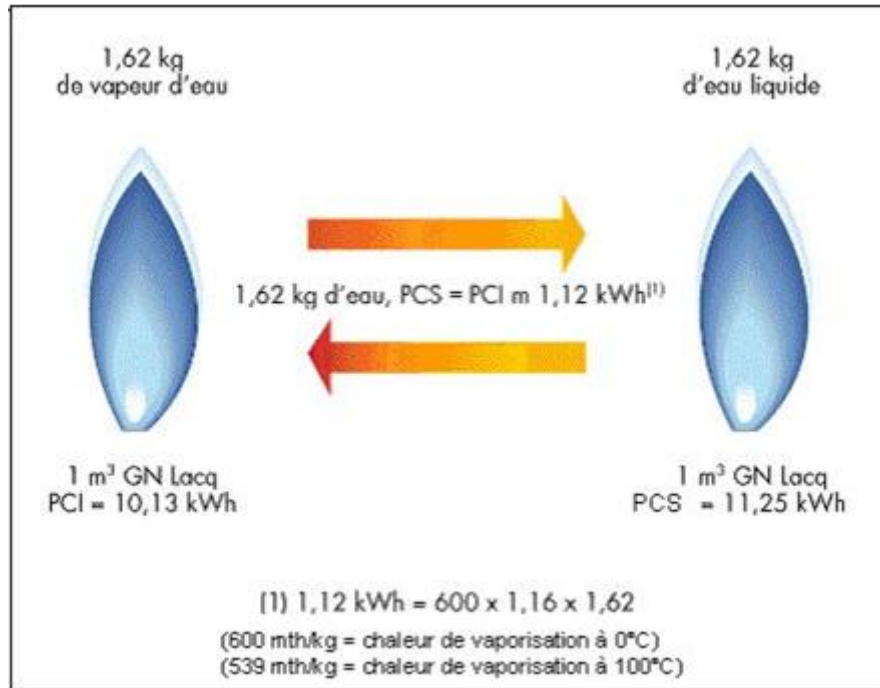


Fig.1.8 : différence entre PCI et PCS

Conclusion

Le gaz naturel est la source d'énergie fossile la moins polluante de l'atmosphère car pour ces raisons que notre étude est basée principalement dessus. Dans cette partie nous pouvons dire que la combustion stœchiométrique est la combustion idéale qu'on peut utiliser afin d'avoir une combustion complète et parfaite, donc moins nocive pour l'environnement. Tout de même cette combustion reste théorique.

CHAPITRE II

Etude des Chaudières

II. Etude des Chaudières

Introduction

La chaudière est un générateur de chaleur produisant généralement de l'eau chaude pour le chauffage. Ce n'est pas la seule utilisation d'une chaudière qui peut produire de la vapeur, le plus souvent pour des applications industrielles. Une chaudière comporte un corps de chauffe avec un circuit d'eau intégré qui récupère la chaleur produite par un bruleur utilisant un combustible gaz, fioul, bois ... Elle présente de par son combustible, un rendement de combustion. Selon son dimensionnement et les différents appels de puissance, elle générera un rendement de production. C'est dire qu'une chaudière qu'elle soit une chaudière gaz, ou une chaudière au fioul ou une chaudière bois pourra présenter différents rendements selon les applications qu'elle sert. D'où la notion d'économies d'énergie et d'efficacité énergétique de ladite chaudière.

L'efficacité des chaudières est désormais réelle. Nous trouvons les meilleurs rendements avec les chaudières à condensation. La chaleur latente des fumées est ainsi récupérée sur le retour d'eau chaude de chauffage. Les fumées sortent plus froides et la chaleur est transférée au circuit de chauffage.



Fig. II-1 : Chaudière industrielle

Historique

L'idée d'utiliser la vapeur comme force motrice remonte au 1er siècle Apr. JC avec l'invention de l'éolipile par Héron d'Alexandrie. Mais ce n'est véritablement qu'à partir de la fin du 17ème siècle que les ingénieurs ont développé les machines à vapeur modernes. En 1800, l'ingénieur américain Evans mis au point la première chaudière à tubes de fumée qui servit dans les premières locomotives. La nécessité d'avoir des débits et pressions de vapeur importants aboutit en 1867 à la mise au point de la chaudière à tubes d'eau par les ingénieurs américains Babcock et Wilcox. Depuis, celles-ci se sont sans cesse perfectionner permettant d'avoir notamment des rendements de 90,0 %.

Années 1955-1970 : apparition des foyers au fuel avec les premières chaudières à éléments en fonte, et l'apparition de nouvelles chaudières plus performantes après crise du pétrole de 1973. Après 1973 : chaudières chauffage central avec rendements plus élevés et réductions des pertes par les gaz brûlés par rayonnement ainsi qu'à l'arrêt du brûleur.

Années 1980 : Amélioration des rendements avec les lois d'eau soit des chaudières dont la température d'eau varie progressivement en fonction de la température extérieure. Apparition des chaudières basse température (chaudière dont la température d'eau chaude ne dépasse pas 75°C et qui peut descendre à 40°C)

Années 1990 : montée en puissance de la chaudière à condensation qui récupère la chaleur latente des fumées. Les rendements dépassent les 100% sur PCI.

Années 2000 : mixage des énergies avec pompes à chaleur et solaire. Apparition de l'éco-générateur, de la chaudière hybride (avec pompe à chaleur).

II.1 Classification des chaudières

C'est une gageure que de vouloir établir une classification des chaudières industrielles, celle-ci faisant intervenir trop de critères non significatifs lorsqu'ils sont pris isolément, trop de variantes et trop de combinaisons possibles.

Il est évident que chaque modèle de chaudière possède, de par sa conception et ses dimensions en général, une limitation en capacité de production de vapeur ; mais il est bien rare de buter sur tous les critères de limitation en même temps et il suffit souvent de changer

un paramètre pour étendre sensiblement la plage d'utilisation.

Donc une description de chaudière se fait par classification : [5]

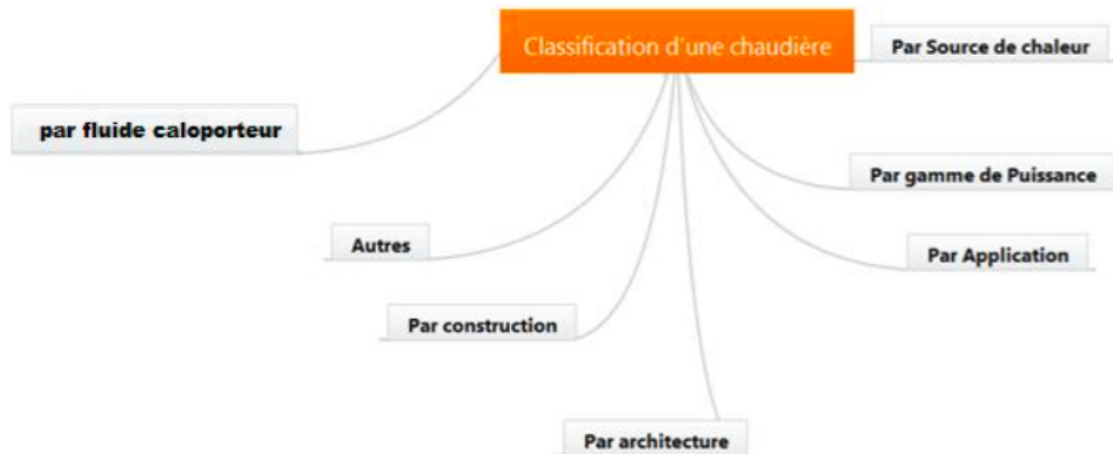


Fig. II-2 : classification des chaudières

II.1.1 Classification par source de chaleur

II.1.1.1 Chaudières électriques

L'électricité n'est pas à proprement parler un combustible. C'est cependant une source d'énergie qui est parfois convertie en chaleur dans des chaudières électriques. Il existe plusieurs principes de chauffe. Les chaudières à résistances chauffent l'eau à l'aide d'une résistance électrique immergée dans l'eau. Les chaudières à effet joule chauffent l'eau à l'aide d'électrodes immergées dans l'eau. C'est alors l'effet joule de l'eau qui permet le chauffage de l'eau ou la vaporisation. Les chaudières ioniques projettent des ions à grande vitesse (280 km/s) à l'aide d'un champ électrique, provoquant l'échauffement du liquide caloporteur.

La rareté des chaudières électriques s'explique par le prix de l'électricité qui est une énergie plus coûteuse que la plupart des autres énergies. On trouve des chaudières électriques dans le domaine du chauffage central domestique, dans l'humidification de locaux équipés d'air conditionné (petites chaudières vapeur utilisées pour l'humidification), mais aussi dans l'industrie pour des puissances allant jusque quelques dizaines de MW. Du fait de l'absence de pertes d'énergie par la chaleur sensible des fumées, le rendement des chaudières électriques est souvent proche de 100 %. [6]

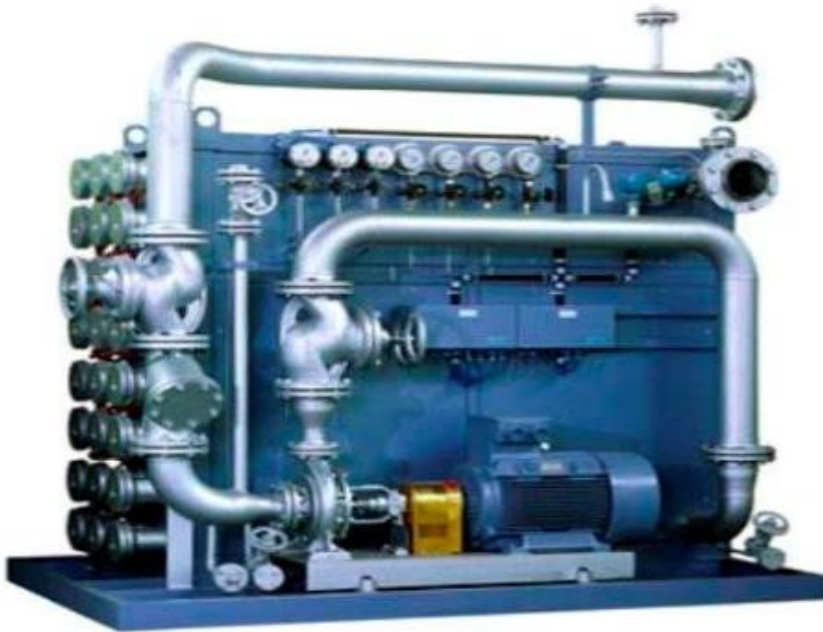


Fig. II-3 : chaudière électrique

II.1.1.2 Chaudières à récupération

Une chaudière de récupération est une chaudière qui utilise la chaleur des gaz d'échappement de la turbine à gaz, elle permet de récupérer les calories contenues dans les fumées pour produire de la vapeur.

La chaudière fonctionne en mode récupération pure (sans post de combustion), elle permet de récupérer l'énergie disponible dans les fumées à l'échappement de la turbine à combustion, pour produire de la vapeur surchauffée à partir d'eau déminéralisée à température ambiante.

[6]

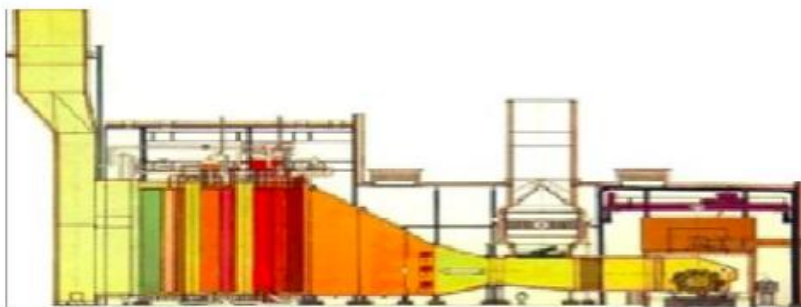


Fig. II-4 : Chaudière a récupération

II.1.1.3 Chaudière à combustion

Chaudière à combustibles solide : caractérisé par des foyers les chaudières se sépare en trois types à combustion solide selon leur foyer [7]

-Les foyers à grilles

-Les foyers à charbon pulvérisé-Les foyers à lit fluidisé



Figure3.5 Chaudière à foyer

Chaudière à combustibles liquide ou gazeux : ce type de chaudière est généralement doté d'un brûleur qui s'occupe de la combustion

- **Chaudière à combustion gazeuse** : le fonctionnement au gaz est un système à combustion : le gaz est brûlé dans une chaudière, avec un corps de chauffe. Celui-ci (petit radiateur) chauffe de l'eau qui est ensuite diffusée dans l'habitation par des tuyaux via une ou plusieurs pompes à eau. Ce type de chaudières est très répandu comme utilisation domestique ou bien dans l'industrie il présente des avantages (prix très abordable du gaz, rendement énergétique excellent...) comme des inconvénients (dégâts d'explosions ou d'intoxications).
- **Chaudière à combustion liquide** : De nombreuses habitations, ou usines industrielles sont équipées au fioul, les chaudières au fioul ont réalisé de considérables progrès en termes de rendement, d'écologie et d'hygiène. [7]



Fig. II-6 : Chaudière à combustion (gaz)

II.1.2 Classifications par type de fluide caloporteur

Une chaudière échange de l'énergie thermique avec différents types de fluides caloporteurs qui ensuite la véhiculent jusqu'au point d'utilisation. [6]

- ❖ **L'eau chaude** Est principalement utilisée dans les systèmes de chauffage de locaux d'habitation, commerciaux ou industriels. Dans le domaine du chauffage central domestique, c'est quasiment le seul fluide utilisé ; [6]
- ❖ **L'eau surchauffée** L'eau surchauffée est principalement utilisée dans le chauffage urbain. On peut aussi la trouver dans l'industrie. Pression et température courantes d'usage tournent autour de 20 bars à 180 °C avec retour à 90 °C. [6]
- ❖ **La vapeur saturée** Principalement utilisée dans les procédés industriels. La vapeur produite par la chaudière sert alors à chauffer des fluides au travers d'échangeurs. Des machines spécifiques comme les machines à papier peuvent également avoir besoin d'une alimentation en vapeur. [6]
- ❖ **La vapeur surchauffée** La vapeur surchauffée sert principalement à être turbiner, généralement dans le but d'entraîner un alternateur pour produire de l'électricité. Ce principe est utilisé par les centrales thermiques. Certaines industries ont des déchets à éliminer, ces derniers utilisés comme combustibles leur permettent de produire de

l'énergie électrique et tout ou partie de l'énergie thermique nécessaire à l'usine. On parle alors de cogénération. [6]

- ❖ **Fluide thermique** : Généralement des huiles, permettant d'atteindre de hautes températures sans nécessiter des pressions élevées. Ils sont utilisés comme énergie thermique par exemple dans l'industrie des panneaux de bois aggloméré. L'utilisation de fluide thermique permet également de meilleures précisions dans la régulation de température. Cependant, l'utilisation de fluide thermique génère de nombreuses contraintes d'exploitation pour les industriels, ils sont de plus en plus remplacés par de la vapeur. [6]

II.1.3 Classification par gamme de puissance

- **Chaudière domestique** : utilisé pour le chauffage dans les habitas et les bâtiments sa consommation est inférieure à 70 KW. [5]
- **Chaudière industrielle** : dans l'industrie l'utilisation de la chaudière a une importance massive, elle est utilisée dans plusieurs domaines tels que (la production du lait lacté, industrie de textile etc.) sa consommation dépasse les 70 KW. [5]

II.1.4 Classification par construction

II.1.4.1 Chaudière à tube de fumée

C'est historiquement le premier type de construction. Les premiers modèles utilisaient une circulation verticale, plus facile à réaliser, du fait de la convection des gaz, mais par la suite, on réalisa des chaudières avec un arrangement horizontal, plus adaptées, à l'utilisation pour le chemin de fer ou la navigation. [8]

Une chaudière à tubes de fumées est constituée d'un grand réservoir d'eau traversé par des tubes dans lesquels circulent les fumées. Le premier tube du parcours de fumées est un tube de plus gros diamètre qui constituent le foyer. Ce type de construction est aujourd'hui utilisé presque exclusivement pour les combustibles gazeux et liquides. En effet, la forme du foyer des chaudières à tubes de fumées rend difficile l'extraction des cendres. Lorsqu'elles sont utilisées avec des combustibles solides le foyer est placé à l'extérieur de la chaudière proprement dite. [8]

Dans ce cas, le foyer est un avant foyer à tubes d'eau ou en réfractaire. Ce type de construction est généralement réservé à des puissances n'excédant pas 20 ou 30 MW



Fig. II-8 : Chaudière à tubes fumés

II.1.4.2 Chaudière à tubes d'eau

Dans cette construction, c'est le fluide caloporteur qui circule dans des tubes, les gaz chauds circulant à l'extérieur de ceux-ci. L'avantage de cette formule est surtout la sécurité de ne pas avoir de grandes quantités d'eau dans la chaudière même, qui pourraient en cas de rupture mécanique, entraîner une création explosive de vapeur. Elles ont également l'avantage d'avoir une plus faible inertie. Dans ce type de chaudière, le foyer a toujours un volume très important. De plus, le foyer a la possibilité d'être ouvert dans sa partie inférieure. Ce sont ces deux caractéristiques qui font qu'elles sont souvent utilisées avec des combustibles solides même pour des puissances de quelques MW seulement. [8]

II.1.4.3 Chaudières compactes

Elle possède une enveloppe externe cylindrique contenant deux de gros diamètres dans lesquels est placé le foyer. Les gaz de combustion sortent du tube foyer dans une chambre en brique réfractaire et sont véhiculés à travers les tubes de petits diamètres situés de part et d'autre du tube foyer. Ces tubes représentent une grande surface d'échange pour chauffer l'eau. Les fumées sont ensuite extraites de la chaudière en face avant par un extracteur puis à travers la cheminée. Elle se détermine par deux modèles : [6]

- **Les chaudières compactes à deux passes**
- **Les chaudières compactes à trois passes**



Fig. II-9 : chaudière compacte a deux passes

II.1.4.4 Chaudières à retour de flamme

La chambre de combustion est en forme de dé et le bruleur est situé au centre. La flamme revient dans cette chambre vers l'avant de la chaudière.

Les tubes de fumées entourent le foyer et permettent l'évacuation des gaz à travers la cheminée située à l'arrière de la chaudière.

II.2 Principe de fonctionnement d'une chaudière

Quel que soit le modèle que vous avez, le principe de fonctionnement d'une chaudière repose sur des éléments qui varient peu :

- Une chaudière a besoin d'un carburant, d'une source d'énergie : bois, fioul, gaz, électricité, ou plus récemment, air.
- Pour les chaudières à combustion, le carburant est brûlé, et c'est cette action qui produit de la chaleur.
- Pour les modèles électriques ou thermodynamiques, il n'y pas de combustion, mais l'utilisation d'une source d'énergie "invisible".
- Dans tous les cas, l'énergie utilisée ou dégagée par la combustion sert à produire de la chaleur, qui se transmet ensuite à des circuits reliés à des émetteurs de chaleur (radiateurs, planchers chauffants) et/ou au dispositif d'alimentation en eau chaude.
- Les vapeurs dégagées et résidus de combustion sont évacués, sauf dans les modèles à condensation, dans lesquels la vapeur est réutilisée en circuit interne. [5]

II.2.1 Description de la chaudière

➤ La chambre de Combustion

La chambre de combustion est une boîte hermétique avec une sortie d'air aspiré par thermodynamique, (**atmosphériques**) appelé (sortie des gaz brûlés) puis une entrée d'air permettant le mélange air/gaz et ainsi la combustion. Les appareils à ventouse fonctionnent sur le même principe mais l'air mélangé aux gaz ainsi qu'évacuation des gaz brûlés est propulsé par une ventilation, la chambre de combustion de ces appareils est donc (**dynamique**). [9]

➤ L'échangeur

Dans la partie supérieure se trouve l'échangeur, avec l'arrivée d'eau froide à droite et le départ d'eau chaude à gauche, cette circule dans le serpentin situé au-dessous de la flamme (l'échangeur) et récupère la chaleur diffusée par la combustion du mélange gaz et air ambiant, la chaleur est bien répartie sur toute la surface du serpentin grâce aux ailettes soudés sur le serpentin.

Nous pouvons constater que les deux pièces démontables, sur les tubes d'arrivée et départ d'eau, permettant le démontage de l'échangeur en cas de besoin, car dans certaines circonstances l'échangeur se perce prématurément pour cause de, point rosé, ambiant humide, ou manque de ventilation. [9]



FigII.10 échangeur

➤ La garniture

Nous pouvons constater que la chambre de combustion est protégé par une isolation intérieure de couleur blanche (j'ai enlevé la plaque avant, pour faire la photo), cette protection empêche la chaleur de s'échapper de la chambre et de se transmettre aux autre organes de l'appareil. Elle limite aussi les déperditions de chaleur, ce qui veut dire que la totalité de la chaleur produite par la combustion traversera obligatoirement l'échangeur. [9]

➤ Les sécurités gaz

Sur le bruleur nous trouvons dans ce cas précis un thermocouple qui équipe de nos jours toute sorte d'appareils au gaz (sauf certaines plaques de cuisson bas de gamme). Le rôle de cette pièce est de s'assurer de la présence de la flamme, en cas d'extinction de la flamme cette pièce coupe automatiquement le gaz au bout de quelques secondes, pour résumer, le bloc gaz n'ouvre le gaz que si la flamme est allumée, c'est pour cette raison que nous sommes obligés de maintenir un bouton enfoncé lors de l'allumage de certains appareils munis de ce dispositif. [9]

➤ Le bruleur

Puis sur la partie inférieure de l'image nous trouverons alors le bruleur, avec les injecteurs situés à l'intérieur, c'est cette pièce qui doit être adapté au type de gaz qui alimente l'appareil, elle injecte le gaz tout en le mélangeant avec de l'air permettant sa combustion.

Bien entendu les blocs gaz sont de plus en plus performants, plus économiques les uns que les autres, et les plus récents mieux sécurisés que ses prédécesseurs, quel qu'en soit le procédé et le mécanisme utilisé pour sa fabrication le principe de fonctionnement reste toujours basé sur le débit du combustible passant à l'intérieur, plus le débit est important et plus importante doit être la flamme à l'intérieur de la chambre de combustion. [9]

➤ On distingue différents brûleurs à gaz

Un brûleur a pour fonction de mélanger, dans des proportions correctes, le combustible et l'air comburant pour permettre la combustion et le meilleur rendement possible.

Brûleurs à air pulsé l'alimentation en air est fournie par un ventilateur, qui puise dans l'air ambiant de la chaufferie. L'alimentation en gaz est assurée par une électrovanne et

des régulateurs de pression. La puissance du brûleur dépend du débit de gaz. [10]

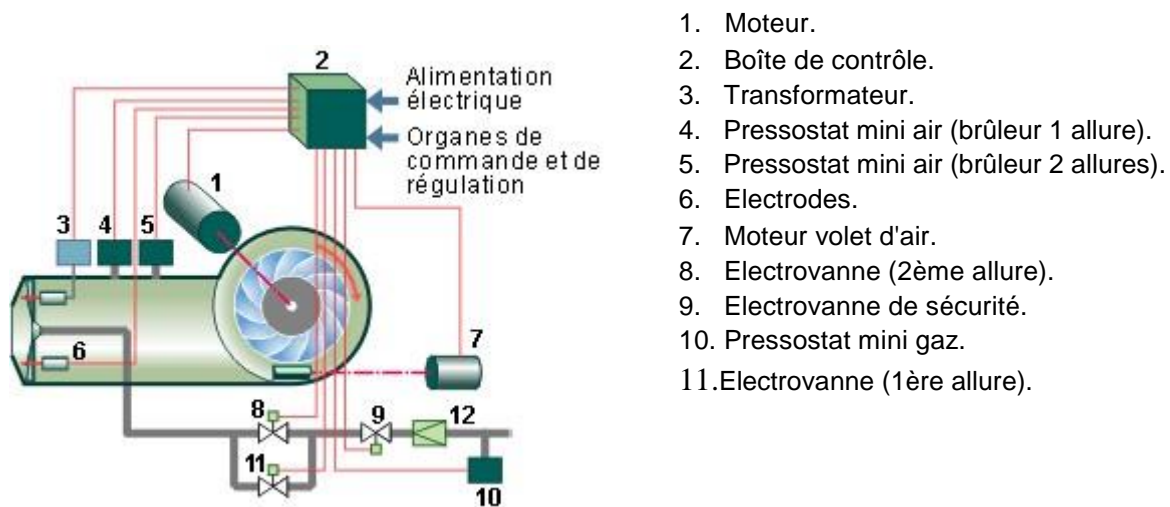


Fig.II-11 : Brûleur gaz à air pulsé

La tête de combustion du brûleur est constituée d'un embout qui guide la flamme, d'électrodes haute tension qui allument celle-ci et du déflecteur qui la maintient en place. Le réglage de la distance entre l'embout et le déflecteur est essentiel au bon fonctionnement du brûleur en répartissant les flux d'air primaire (dans le brûleur) et secondaire (autour).

Un brûleur à air pulsé permet de bien refroidir la flamme, ce qui réduit les émissions de NOx.

Il existe 4 modes de fonctionnement des brûleurs à air pulsé, du plus simple (et moins efficace) au plus sophistiqué (et plus efficace) :

- **Brûleur tout ou rien** : pour toute demande de chaleur, le brûleur démarre à pleine puissance, et s'arrête lorsque les besoins sont satisfaits.
- **Brûleur deux allures** : lors d'une demande de chaleur, le brûleur est enclenché en première allure (40 à 60% de la puissance totale) puis passe en deuxième allure après un délai déterminé si nécessaire. Durant le fonctionnement, le passage d'une allure à l'autre se fait automatiquement selon les besoins.
- **Brûleur deux allures progressif** : semblable au brûleur précédent, mais le passage d'une allure à l'autre se fait de façon progressive.
- **Brûleur modulant** : toutes les allures de fonctionnement sont possibles, entre un minimum de puissance qui varie selon les constructeurs (12 à 30%) et la puissance

totale. Les débits d'air et de combustible sont réglés en continu en fonction de la puissance de chauffage requise, ce qui permet un fonctionnement en continu.

Les brûleurs à air pulsé sont les plus courants, dans le secteur résidentiel comme dans l'industrie, car ils permettent de réguler les conditions de combustion facilement.

Ils représentent environ 80% du marché des brûleurs en France. [10]

➤ Brûleurs atmosphériques

Dans les brûleurs atmosphériques, l'alimentation en air ne se fait pas par un ventilateur mais par entraînement du jet de gaz dans une venturi, au niveau des injecteurs. Le gaz et l'air passent ensuite dans une chambre de pré mélange, puis le mélange est allumé par une étincelle provenant d'un système électrique. La proportion d'air primaire (mêlé au gaz dans le diffuseur) est d'environ 40-50%.

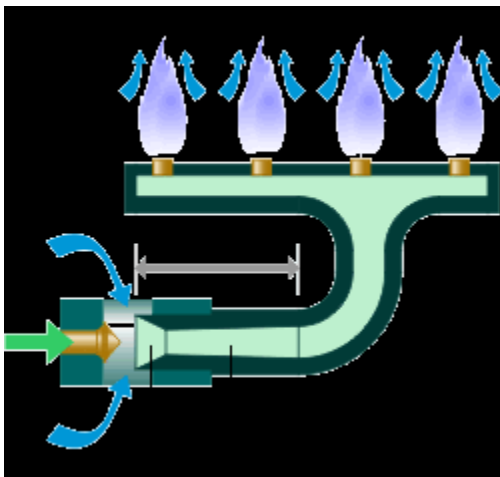


Fig.II.12 : Brûleur gaz atmosphérique [3]

Les différentes parties du brûleur sont ajustées pour obtenir une combustion stable, ce qui réduit les possibilités de réglage du brûleur. En général, on se situe toujours en excès d'air important, le rendement de combustion est donc moins bon.

Le système, entièrement mécanique, ne comprend pas de fermeture automatique à l'arrêt, ce qui entraîne des pertes à l'arrêt plus importantes.

C'est un système simple, que l'on trouve uniquement sur les chaudières peu puissantes ($P_n < 20 \text{ kW}$) ou anciennes, et qui représente moins de 20% du marché des brûleurs, avec une tendance à la baisse.

Les brûleurs atmosphériques peuvent être « à prémélange » si l'air est mélangé au gaz dans une chambre de prémélange, puis est ensuite réparti sur une surface d'accrochage où se développe la flamme. Le prémélange est total si tout l'air de combustion est fourni durant le pré mélange, il est partiel si une fraction doit être fournie plus tard.

Cette technique permet de mieux doser le mélange air-gaz et donc de diminuer l'excès d'air et améliorer le rendement de combustion. [10]

➤ **Brûleurs bas NOx**

Les brûleurs "low NOx" permettent de recalculer une partie des gaz de combustion produite au niveau de la tête du brûleur afin de refroidir la flamme.

On mélange une partie des fumées avec l'air comburant, ce qui a pour effet de diminuer la température de la flamme, ainsi que la concentration d'O₂, et modifie favorablement les conditions de combustion.

Dans le secteur résidentiel, la recirculation est plutôt interne, c'est-à-dire que les gaz recirculés proviennent de l'intérieur de la chaudière. Dans l'industrie, il existe également des systèmes à recirculation externe dans lesquels on prélève les fumées en sortie de la chaudière.

La recirculation interne des gaz est due à la forme spécifique du brûleur, dont il existe plusieurs modèles différents. [10]

➤ **Brûleurs radiants ou rayonnants**

Le but des brûleurs radiants est de réduire au maximum la température de la flamme. La surface d'accrochage est constituée d'un matériau réfractaire (céramique ou acier inoxydable) qui absorbe une partie de la chaleur de réaction et la restitue au foyer par rayonnement. La température de combustion est abaissée sous 1200°C, ce qui réduit fortement la production de NOx.[10]

II.2.2 Calculs sur les performances des chaudières

Les performances des chaudières sont évaluées à l'aide du paramètre rendement. Il existe différents types de rendements, qui correspondent à différentes situations d'évaluation de la chaudière :

- **Le rendement nominal (ou utile)** qui est une valeur instantanée dépendant principalement des conditions de combustion dans la chaudière.
- **Le rendement saisonnier (ou global annuel)** qui est une valeur globale dépendant des pertes à l'arrêt de la chaudière.

Le rendement des chaudières à condensation se calcule à l'aide d'une formule spécifique qui dépend du coefficient de condensation. [10]

II.2.2.1 Rendement nominal ou rendement utile

Le rendement nominal est le rapport entre la puissance utile P_u fournie à l'eau de chauffage (ou puissance de la chaudière) et le produit du débit de combustible consommé par son PCI,

$$P_a = Q_{\text{gaz}} \times \text{PCI}$$

$$\eta_{\text{utile}} = P_u / P_a$$

C'est une valeur instantanée, qui varie en fonction des conditions d'exploitation de la chaudière. Le fabricant fournit cette donnée dans des conditions de combustion idéales, qui correspondent au rendement maximal atteignable. La différence entre P_a et P_u se retrouve dans les différentes pertes de la chaudière : dans la cheminée (fumées), vers l'ambiance de la chaufferie (selon l'isolation de la chaudière), et par parois sèches.

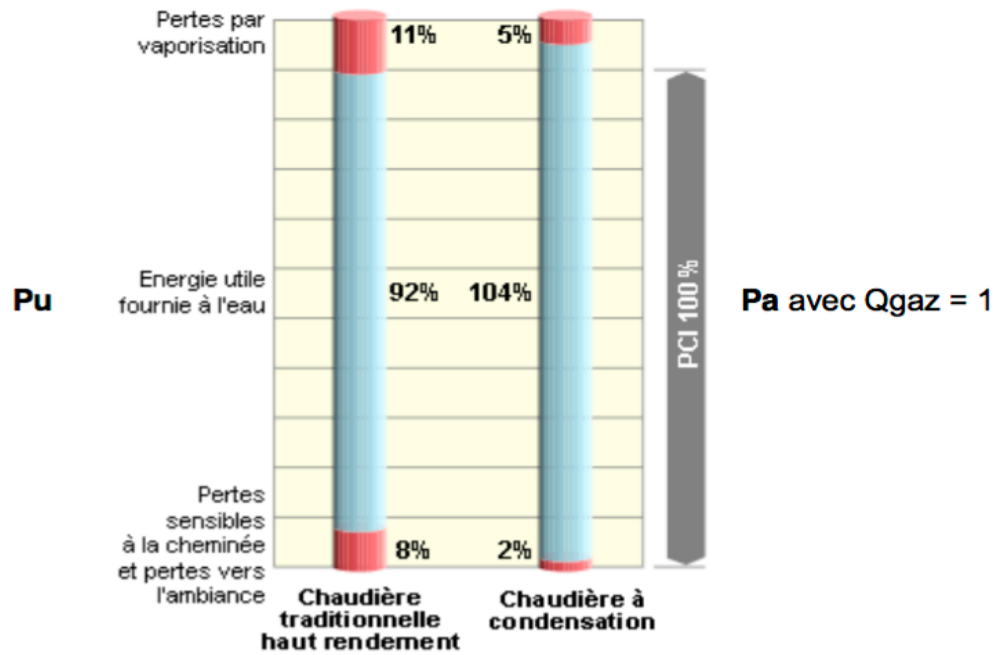


Fig.II.13 : Rendements et pertes des chaudières traditionnelles et à condensation

Le rendement nominal est calculé par rapport au PCI du gaz, ce qui donne des rendements supérieurs à l'unité pour les chaudières à condensation. [10]

II.2.2.2 Rendement de combustion

Le rendement de combustion rend compte des pertes de chaleur dans les fumées, il est défini comme :

$$\eta_{\text{comb}} = (\text{Pa} - \text{Pertes fumées}) / \text{Pa}$$

En pratique, il est calculé grâce à la formule de Siegert :

$$\eta_{\text{comb}} = 100 - f \times (T_{\text{fumées}} - T_{\text{amb}}) / \% \text{CO}_2$$

$T_{\text{fumées}}$ = la température des fumées à la sortie de la chaudière [°C]

T_{amb} = température ambiante de la chaufferie [°C]

% CO₂ = la teneur en CO₂ sur sec des fumées [%] que l'on mesure directement dans le conduit d'évacuation de la chaudière

f = facteur dépendant principalement du type de combustible (fioul: f=0,57; gaz naturel: f=0,47)

Le rendement utile est lié au rendement de combustion par la formule suivante :

$$\eta_{\text{utile}} = \eta_{\text{comb}} - \% q_r$$

q_r = coefficient de réduction de rendement due aux pertes vers l'ambiance, donnée fournie par le fabricant de la chaudière
La valeur de ce coefficient oscille entre 0,1 à 0,4% pour les chaudières à bruleur pulsé et 0,6 à 0,8 % pour les atmosphériques.

II.2.2.3 Rendement saisonnier ou rendement global annuel

Le rendement saisonnier est une valeur globale, calculée sur l'ensemble de la saison de chauffe et qui prend en compte les performances de la chaudière à la fois durant les périodes de fonctionnement et les périodes d'arrêt.
Il s'agit du rapport entre E_u , l'énergie totale transmise à l'eau de chauffage, et E_a , l'énergie totale contenue dans le combustible consommé durant la saison de chauffe:

$$\eta_{\text{sais}} = E_u / E_a$$

On exprime souvent le rendement saisonnier d'une chaudière par la formule de Dietrich :

$$\eta_{\text{sais}} = \eta_{\text{utile}} / (1 + q_E x (n_T / n_B - 1))$$

q_E est le coefficient d'entretien de la chaudière (voir paragraphe suivant)

n_T est le nombre total d'heures de la saison de chauffe (environ 5800 h)

n_B est le nombre total d'heures de fonctionnement du brûleur

n_T / n_B est donc le facteur de charge de la chaudière

➤ Pertes à l'arrêt

Lorsque le bruleur est à l'arrêt, la chaudière continue d'échanger de la chaleur avec l'extérieur par deux mécanismes :

- **Par rayonnement (ou convection)** avec l'ambiance de la chaufferie. La chaudière fonctionne comme un gros radiateur.
- **Par balayage, ou convection interne vers la cheminée.** Si l'arrivée d'air reste ouverte à l'arrêt, l'intérieur chaud de la chaudière est parcouru par un courant d'air qui évacue la chaleur vers la cheminée par tirage naturel.

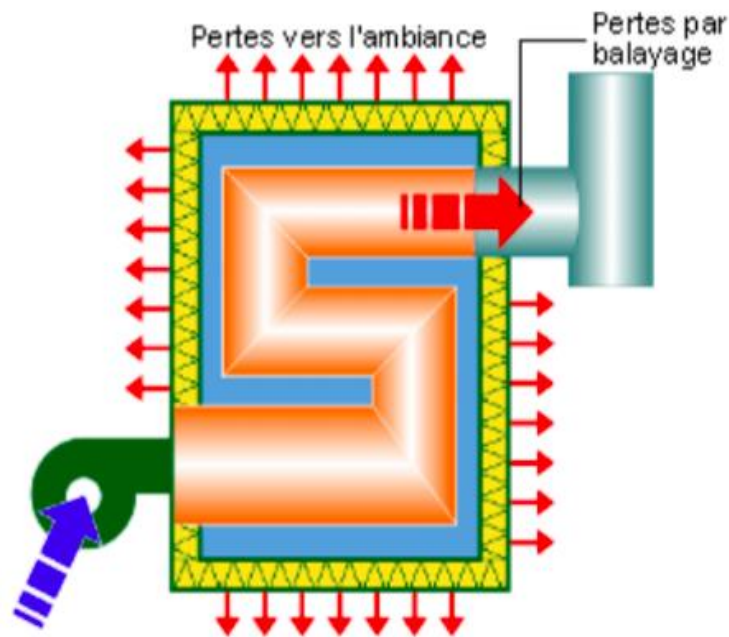


Figure3.14 : Pertes de la chaudière par rayonnement et par balayage. [10]

Les pertes à l'arrêt s'expriment grâce au coefficient d'entretien (q_E) de la chaudière :

$$\text{Pertes à l'arrêt [kW]} = q_E \times \text{Puissance nominale chaudière [kW]}$$

Le coefficient q_E est donné dans la documentation technique de la chaudière et varie en fonction de sa température de fonctionnement :

$$q_{E2} = q_{E1} \times ((T_{\text{chau 2}} - T_{\text{amb}}) / (T_{\text{chau 1}} - T_{\text{amb}}))^{1,25}$$

où : q_{E2} , q_{E1} = les coefficients de perte à l'arrêt pour une température d'eau de chaudière respectivement de $T_{\text{chau 2}}$ et $T_{\text{chau 1}}$ et une température de chaufferie de T_{amb}

II.4.2.4 Mesure du rendement global annuel

La norme allemande DIN 4702-8 définit une procédure d'essais normalisée permettant de mesurer les rendements de la chaudière à des charges partielles définies. Ce qui permet de disposer d'un critère précis de comparaison des rendements annuels des différents types de chaudières.

Pour une région donnée, on définit par rapport à un travail annuel de chauffage cinq niveaux de charge représentés sur la figure suivante. Chaque niveau de charge représente le même travail de chauffage (surface sur le graphique).

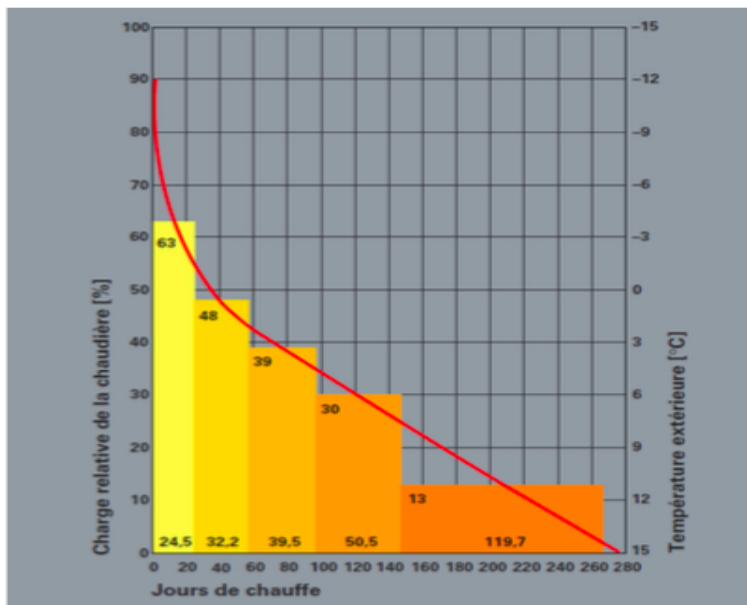
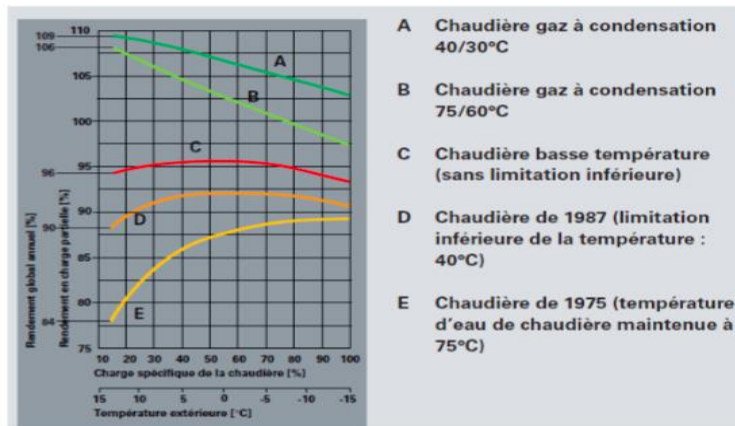


Fig.II.15 : Détermination du rendement global annuel selon la norme DIN 4702-8. [11]

Le rendement global annuel est ensuite déterminé en faisant la moyenne des rendements à charge partielle mesurés.

L'avantage de la condensation apparaît nettement pour des charges faibles, comme le montre le graphique suivant, résultat de cette méthode de mesure du rendement global annuel.



FigII.16 : Rendements globaux annuels pour différents types de chaudières [11]

II.2.2.5 Influence du surdimensionnement sur le rendement

Lorsqu'une chaudière est surdimensionnée, on observe une diminution de son rendement due à deux phénomènes :

Augmentation des pertes à l'arrêt. En effet, celles-ci sont proportionnelles à la puissance installée. Toutefois, l'augmentation du niveau d'isolation des chaudières et la présence de brûleurs avec clapet d'air se refermant à l'arrêt ont fortement diminué les pertes et donc l'influence du surdimensionnement. C'est également le cas si on divise la puissance à installé en plusieurs chaudières et que celles-ci sont régulées correctement en cascade.

Augmentation des cycles de marche/arrêt du brûleur. Pour les chaudières modernes, c'est principalement ici que se situe le problème. Un brûleur trop puissant a des temps de fonctionnement plus courts et démarre plus souvent. Il y a augmentation des pertes par préventilation et des imbrûlés (les premières et les dernières gouttes de combustible injectées brûlent dans des mauvaises conditions). Cela conduit donc à une diminution du rendement et à une accélération de l'encrassement.

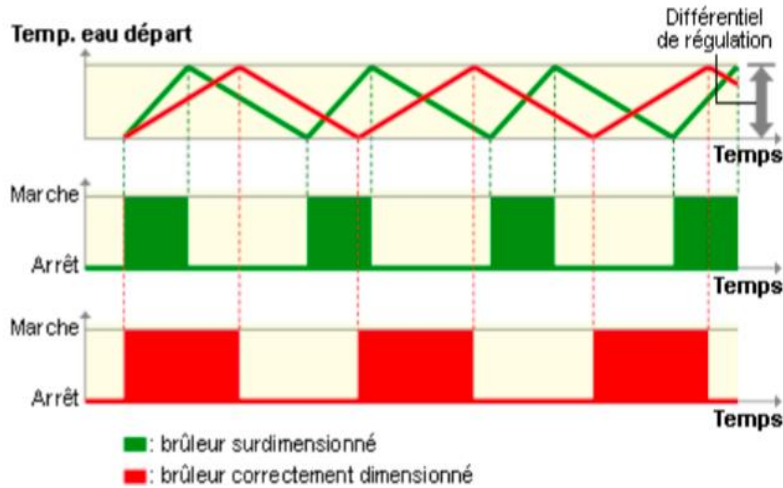


Fig.II.17 : Cycle de fonctionnement d'un brûleur en fonction de son surdimensionnement [11]

Conclusion

L'étude des chaudières nous a permis de comprendre le principe de leur fonctionnement ainsi que la mode de leur classification. Effectivement, nous avons pu voir l'évolution de leur rendement et on remarque aisément que le rendement de la chaudière à condensation dépasse de large les 100% du fait de son principe de fonctionnement qui un peu diffère de celui des autres chaudières.

CHAIPTRE III

Optimisation de la combustion et réduction des NO_x

III. Optimisation de la combustion et réduction des NOx

Introduction

Le procédé reburning gaz est une technique secondaire de réduction des oxydes d'azote (NOx) qui peut être appliquée à de grandes installations industrielles telles que les chaudières, les centrales thermiques, les fours de verrerie ou les Usines d'Incinération d'Ordures Ménagères.

Le principe a été découvert dans les années 70 et a commencé à être appliqué à des centrales électriques au Japon au cours des années 80. Ce sont ensuite les Américains qui ont développé le procédé et l'ont utilisé sur des centrales thermiques au charbon afin de répondre aux exigences du Clean Air Act. En France, GDF et l'IFP conduisent des études et expérimentations sur le sujet et les applications potentielles concernent les grosses chaudières industrielles.

III.1 Le procédé REBURNING

Le reburning gaz ou recombustion gaz consiste à injecter du gaz naturel en aval du foyer principal afin de créer une zone en léger défaut d'air permettant un craquage du gaz naturel sous l'effet des hautes températures. Ce craquage produit des radicaux hydrocarbonés qui vont transformer, au travers d'un mécanisme complexe, les molécules de NO en azote moléculaire (N₂) non polluant. L'injection de 10 à 20 % de gaz naturel (en % de la puissance primaire) va permettre une réduction de 40 à 70% des émissions de NOx suivant les applications. Ici le gaz naturel est utilisé comme réactif pour dépolluer et non plus seulement comme combustible.

Le principe du procédé reburning est rappelé sur la figure 1. Il consiste en la réalisation, dans le foyer de la chaudière, de trois zones séparées :

- ❖ **Une zone primaire**, où s'effectue la combustion de combustible primaire (dans le cas présent, il s'agit d'un combustible gazeux : CH₄) et la production de NO. Cette zone est en faible excès d'air ;
- ❖ **Une zone secondaire, ou zone reburning**, à l'entrée de laquelle est injecté du gaz naturel comme agent dénitrificateur. Sous l'effet de ce combustible, la zone ainsi créée est en défaut d'air. Le gaz naturel se décompose en radicaux CH, sous l'effet de la température et de l'atmosphère réductrice de la zone. Ces radicaux transforment les

molécules de NO en diazote N₂ et en composés azotés intermédiaires. Cette zone produit également du CO ;

❖ **Une zone tertiaire, ou zone de postcombustion**, également dénommée zone OFA (*Over-fire air*) dans laquelle les imbrûlés (CO) et les composés intermédiaires sont éliminés par l'injection d'air de postcombustion. [12]

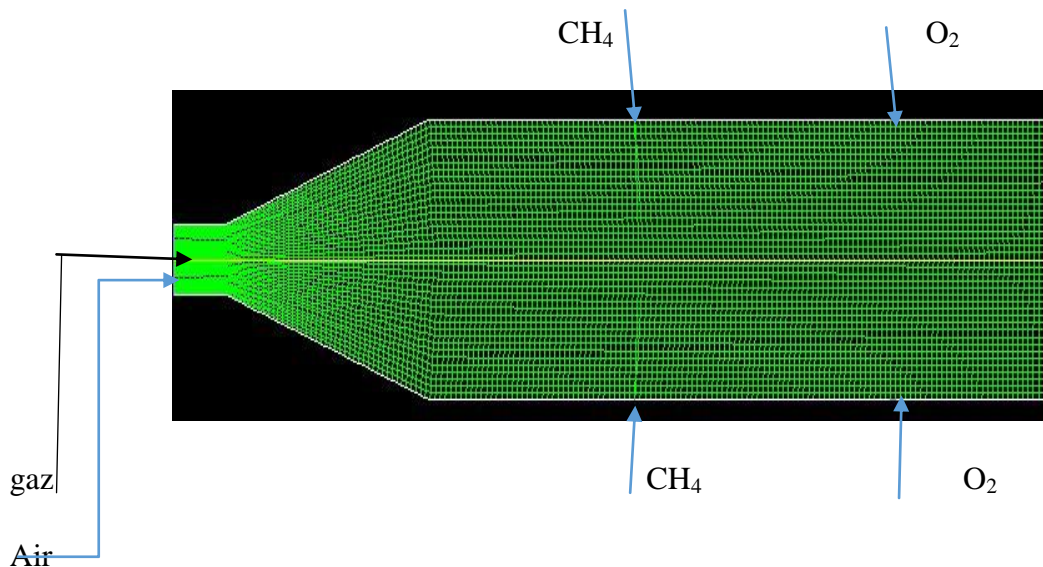


Fig.III.1 : chaudière utilisée

III.2 Etude Comparative

I.2.1 Hypothèse et domaine de calcul

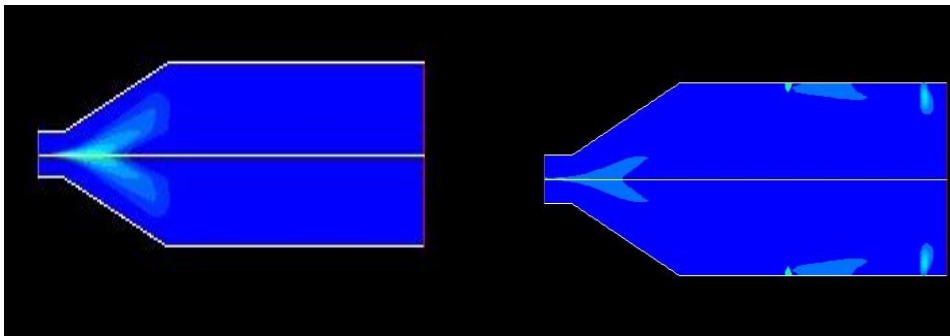
III.2.1.1 Méthodes numériques

La version FLUENT 6.3.26 a été utilisée pour simuler cette réalisation. Le champ d'écoulement a été modélisé par l'application des équations Reynolds et Navier Stokes (RANS) avec le semi-implicite procédé pour l'algorithme lié à des équations (SIMPLE). RANS a été largement utilisé pour étudier les comportements de flamme de combustible pulvérisé. Dans des simulations de combustion turbulente, la modélisation de la turbulence est considérée le plus important, le modèle utilisé est le (k-ε). L'interaction entre la chimie et de la turbulence est modélisée en utilisant le modèle de dissipation de vitesse finie / Foucault dans lequel la réaction taux est défini en prenant le minimum de la réaction chimique et la vitesse de mélange turbulent. Les propriétés chimiques de l'espèce matière volatils approchée à partir des analyses finales et à proximité.

III.2.1.2 Les hypothèses géométriques utilisées sont les suivantes :

Le domaine étudié débute au niveau de la paroi à l'intérieur de la chaudière, de qu'on fait le mélange de (combustible et l'air). L'entrée de combustible se fait par un trou de diamètre égal à 0.02 m, et celui de l'air est de 0.98 m ; largeur total de la chaudière est 4 m et la longueur est 14.9 m ;

- **Dans le cas avec reburning on a :** les mêmes dimensions, mais on ajoute les injecteurs des Gaz Naturel et oxygène pur qui ont des diamètres respectifs 0.01 m et 0.1 m. La sortie de l'écoulement se fait par un diamètre 4 m limite étudiée.



FigIII.1 Chaudière normal

figIII.2 chaudière avec reburning

III.2.1.3 Etude de la Température

Ce travail a été réalisé en deux étapes :

- cas de référence : représentation de la combustion dans la chaudière en fonctionnement normal, c'est à dire avec les brûleurs normaux et sans reburning, image (a) ;
- cas optimisé : suite à l'observation de ces résultats, une optimisation du fonctionnement des brûleurs a été envisagée afin de favoriser le procédé reburning, image (b).

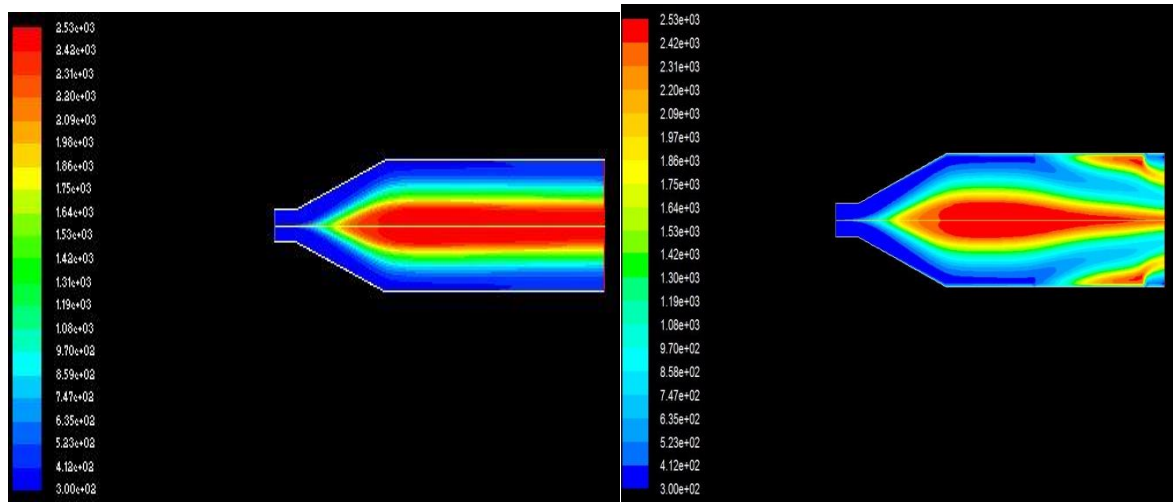


fig (a) : cas de référence

fig (b) : cas optimisé

On remarque que dans l'image (a) on a une flamme presque constante et justement la même Température jusqu'à la sortie, mais sur l'image (b) on a une diminution de la flamme causée par l'injection de Gaz Naturel.

Mais dans les deux cas on a presque la même température maximale car elle est la raison de mélange de combustible et d'air dans la première zone.

III.2.1.4 Réduction des émissions Nox

L'appellation NOx désigne de manière symbolique les oxydes d'azote qui sont émis lors de la combustion.

Il existe plusieurs oxydes d'azote, dont les plus courants sont :

- Le protoxyde d'azote ou "gaz hilarant" : N₂O ;
- Le monoxyde d'azote : NO ;
- Le dioxyde d'azote : NO₂.

On voit que le "niveau" d'oxydation de l'azote est de :

- ½ O pour 1 N dans le N₂O ;
- 1 O pour 1 N dans le NO ;
- 2 O pour 1 N dans le NO₂.

En réalité, la combustion produit principalement du NO et accessoirement du NO₂. Le N₂O n'est pas produit par la combustion mais est important dans la mesure où il constitue l'un des principaux gaz à effet de serre.

Le NO est instable dans l'atmosphère c'est-à-dire qu'il s'oxyde rapidement au contact de l'oxygène de l'air pour former du NO₂. Tout comme les oxydes de soufre, le NO et le NO₂ sont responsables des pluies acides.

La formation des oxydes d'azote résulte principalement de la réaction à haute température entre l'azote et l'oxygène de l'air ("NOx thermique"). Les combustibles liquides et solides contenant de l'azote d'origine végétal, ce dernier contribue aussi à la formation des NOx ("fuel NOx"). Dans le cas du gaz naturel (principalement du méthane CH₄), il n'y a évidemment pas de "fuel NOx". On notera également que les radicaux libres CH présent dans la flamme contribuent à rompre les molécules d'azote N₂ et, par-là, à former les NOx ("prompt NOX").

De ces trois processus de formation du NOx, la voie du "NOx thermique" est la plus importante. Il s'agit là du fait qu'à haute température, l'azote de l'air a simplement tendance à s'oxyder "un peu" avec l'oxygène de l'air. Une manière concrète d'observer ce phénomène, est d'examiner des enregistrements d'émissions de NOx d'un four à gaz à haute température lorsque celui-ci déclenche. En effet, si en cours de fonctionnement les émissions sont maintenues par exemple entre 200 et 300 mg/Nm³, on verra qu'immédiatement après le déclenchement, les émissions dépassent 500 ... 600 mg/Nm³. Tant que le four est allumé, la majeure partie de l'oxygène de l'air réagit avec le combustible et il n'en reste que très peu pour former du NOx et, de plus, la pression dans le four étant maintenue, il n'y a que très peu d'entrées d'air parasite. Par contre, après déclenchement, la haute température des parois du four persiste quelques temps tandis que la pression dans la chambre du four n'est plus maintenue. L'air parasite, qui s'engouffre dans le four par tirage naturel, entre alors en contact avec des parois très chaudes et un pic de NOx survient pendant quelques minutes, le temps que la surface des parois refroidisse.

Les processus thermiques produisent donc du NO et du NO₂ que l'on dénomme les "NOx". On notera que dans les fumées la concentration en NO₂ représente généralement moins de 5% de celle en NO et que l'on peut donc souvent se contenter de mesurer la concentration en NO. Inversement, le NO s'oxyde rapidement en NO₂, ce qui peut induire une erreur de mesure significative.

Comme le NO s'oxyde rapidement dans l'atmosphère pour former du NO₂, il est convenu de chiffrer le NOx en mg de NO₂ par Nm³ (m³ "normal" soit 0°C et 1 atm.) et donc de convertir la concentration de NO mesurée en NO₂ équivalent après oxydation totale. Le coefficient de conversion de la masse de NO en masse NO₂ équivalent étant de 1.53 (le rapport des masses molaires), on peut donc écrire symboliquement :

$\text{NO}_x \text{ en mg/Nm}^3 = (1.53 \times \text{mesure NO en mg/Nm}^3) + (\text{mesure NO}_2 \text{ en mg/Nm}^3)$.

Ainsi, une valeur limite d'émission ("VLE") exprimée, par exemple, comme ceci :

$$\text{NO}_x < 250 \text{ mg/Nm}^3 \text{ [13]}$$

D'une manière générale, la formation du NOx est d'autant plus importante que l'azote et l'oxygène se rencontrent à plus haute température dans la flamme, et qu'il y a plus d'oxygène et d'azote en présence. Ainsi, toutes les techniques de réduction des NOx à la source (techniques dites "primaires") consistent à réduire la température de la flamme par :

- L'adaptation de l'excès d'air ;
- L'augmentation de la recirculation (diluer la flamme par les fumées) ;
- L'étagement l'injection de l'air et/ou du combustible dans le brûleur.

Dans notre cas d'étude on a choisi la troisième technique « l'injection de l'air et du combustible dans le brûleur intermédiaires », les figures suivantes nous montre la diminution des NOx au milieu de la chaudière après avoir injecte le combustible et l'air :

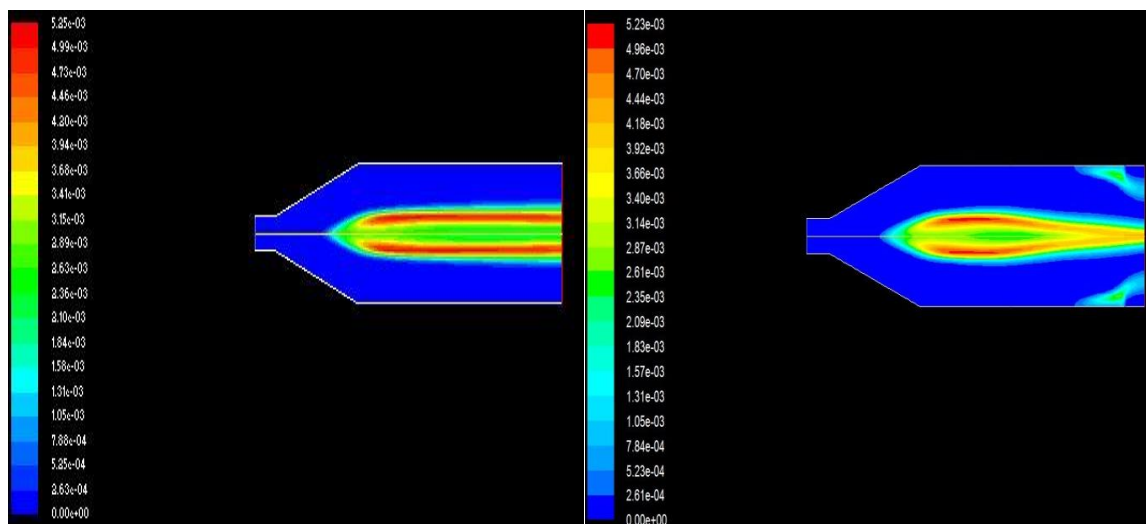
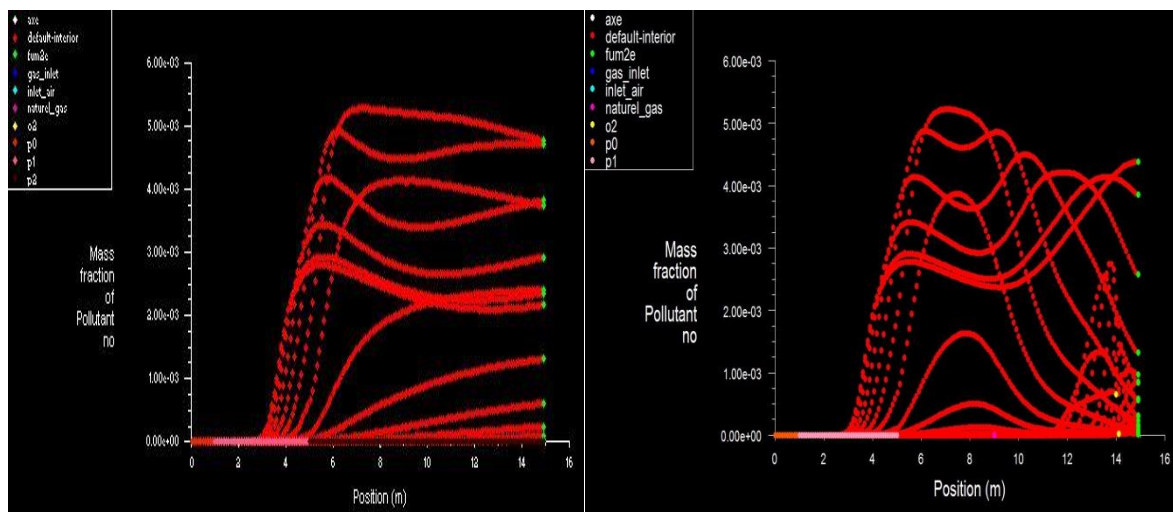


fig (c) : cas de référence - production des NOx

fig (d) cas optimisé - réduction des NOx

On remarque que dans l'image (c) cas de référence on a une masse élevée des NOx et qui reste presque constante jusqu'à la sortie, et dans l'image (d) cas optimisé on remarque une brusque diminution des NOx cause par l'injection de l'air.

On a bien noté aussi que la masse totale des NOx dans les deux cas n'est pas égal, malgré qui c'est le même débit d'air et du gaz dans les deux cas. La forte turbulence du processus reburning, entraine une importante réaction chimique qui est la raison de diminution de la masse des NOx d'où les résultats obtenus sur les courbes suivantes :



fig(e) cas de référence : courbes des NOx

fig (f) cas optimisé : courbe des NOx

III.3 Avantages et limites du reburning

La recombustion présente de nombreux avantages :

- Elle peut être réalisée avec tout type de combustible standard gazeux, liquide et même éventuellement solide (charbon pulvérisé) et le rendement de NOx peut atteindre 80% ;
- * Elle ne réclame que des moyens techniques classiques et relativement simples (injecteurs traversant, panoplies de combustible et d'air avec leur régulation, circuit d'air secondaire, éventuellement circuit de recirculation des fumées) ;
- * Elle est complémentaire d'autres techniques. Elle peut par exemple être combinée à des brûleurs bas-NOx (la performance obtenue n'est pas la somme des deux performances mais elle en est proche). Elle peut aussi être complétée par un traitement SNCR (sélectif non catalytique Réduction), permettant alors d'atteindre des performances aussi élevées qu'avec un traitement SCR (Sélectif Catalytique Réduction) et en tout cas de maintenir les émissions des UIOM (unité d'incinération d'ordures ménagères) en dessous de la limite des 200 mg/Nm³ ;
- * Son rapport "coût/performance" est un des plus bas de tous les procédés de traitement des oxydes d'azote ;
- * Elle peut être appliquée aussi bien à des installations neuves qu'existantes.

Elle connaît cependant quelques limites techniques : une surconsommation de combustible dans le cas où la teneur résiduelle en oxygène des fumées est importante, ce qui est notamment le cas des UIOM, des problèmes d'imbrûlés et d'encrassement si elle est pratiquée sans précautions avec du fuel lourd ou des résidus, d'éventuel problèmes de corrosion si le

mélange et les écoulements dans la zone de recombustion ne sont pas réalisés de façon appropriée.

Conclusion

Le procédé ruberning nous non seulement permis d'optimiser la combustion mais aussi et également la réduction des NOx et grâce à l'utilisation de l'oxygène pur dans les zone tertiaire on arrive à oxydé les monoxydes de carbone qui se sont formés dans la zone secondaire. D'où l'avant de ce procédé ruberning qui réduit jusqu'à 40 à 70% des polluant issu de la combustion.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La généralité sur les énergies fossiles nous a permis de comprendre le mode d'exploitation ainsi que production et de traitement des combustions fossile. Cela nous a également permis de savoir sans nul doute que ses combustibles sont des stocks d'énergie limité dans le monde mais aussi leurs utilisations abusives entraînent une dégradation croissant de l'environnement à travers la pollution, d'où dans notre cas de travail qui a consisté à optimiser la combustion d'une chaudière à partir d'un système de reburning ou recombustion.

Les principaux impacts de ce travail permettent d'obtenir des gains ergonomiques, économiques et environnementaux dans l'utilisation de chaudière à gaz. En effet, l'optimisation de la combustion apportée à l'issue de cette étude a des conséquences directes sur les émissions de monoxyde de carbone rejetées dans l'atmosphère, soit un gain environnemental. La réduction des imbrûlés induit quelques économies de combustible. Enfin, un fonctionnement optimal quelles que soient les conditions d'emploi de la chaudière engendre un confort d'utilisation supplémentaire.

L'étude bibliographique nous a enfin permis de faire le point sur les méthodes d'optimisation de la combustion en chaudière automatique. Une étude menée sur une chaudière à gaz industrielle indique alors que le reburning provoque davantage la diminution de monoxyde de carbone. Une réduction de 70 % des oxydes d'azote a été obtenue, avec une consommation de gaz inférieure à 25 % de la puissance combustible totale. Nous avons également constaté un bon comportement global de la chaudière puisque l'apport de puissance lié au reburning compense en totalité la baisse de puissance au niveau de la combustion primaire.

L'approche scientifique de ce matériel industriel a nécessité de l'instrumenter par de multiples sondes de température, de capteurs d'impulsions, de mesures de vitesse des gaz et d'analyse de la composition des fumées.

La simulation de cette loi de régulation qui lie la consigne d'oxygène à la charge demandée à la chaudière montre que d'importantes quantités de monoxyde de carbone rejetées dans l'atmosphère pourraient être économisées par simple optimisation de la régulation, sans aucune modification physique des chaudières existantes.

IV : Conclusion générale

La comparaison des prédictions de cette optimisation à des données expérimentales semble être difficile et qui demande des équipements pour la réalisation d'un banc d'essai toutefois l'approche de la simulation présente un grand intérêt.

Bibliographie

[1] G. PRUDHON, F. JACQUESSON, J. LETE et S. PARIS Combustibles solides. Caractéristique. Propriétés. Analyse. Paru en 1996.

[2] G. MONNOT ; A. FEUGIER, F. LE BOUC, F. MAUSS, C. MEYER, E. PERTHUIS et G. DE SOETE : La combustion dans les fours et les chaudières. Editions TECHNIP 27, RUE GINOUX 75737 PARIS CEDEX 15, année 1978.

[3] F. MEUNIER Aide-mémoire Thermodynamique de l'ingénieur. (Energétique et Changement climatique). 2^e édition ; DUNOD, Paris, 2004, 2009 ISBN 978-2-10-054177-5.

[4] 990110 – Date de mise à jour : 20/01/07 (Propriétés et caractéristique des gaz).

[5] Chaudière un article de WIKIPEDIA.

[6] ARNAUD Mythone, « application de Chaudière dans le domaine industriel » édition épitech le manuel de l'électrotechnicien 1987.

[7] Roberto SANCHEZ, Application des bonds graph à la modélisation et à La commande de réseaux électriques, Université Des Sciences Et Technologies De Lille École Centrale De Lille, Doctorat France 2010.

[8] MM. Alexandre LALEYE et Cheick o. SANOU “Bond Modelisation Et Regulation D'une Turbine A Vapeur Dans Une Centrale Thermique”. École national polytechnique Sénégal, projet fin d'étude ingénieur 2005

[9] Explications sur la chambre de combustion des chaudières et chauffe-eau au gaz, Écrit le 01 octobre 2005 En savoir plus sur :

<https://www.plombiers-reunis.com/blog/explications-sur-la-chambre-de-combustion-des-chaudieres-et-chauffe-eau-au-gaz.html#S2KwGAm16OFSElww.99>.

[10] Technologies des chaudières et brûleurs Energie plus, conception et rénovation des bâtiments tertiaires,

www.energieplus-lesite.be

[11] Brochure technique Viessman.

Les chaudières à condensation.

[12] MAUILLON, L., Rodary, J. M. et Rolland, J. Y (1999). Mesures des émissions de Nox de la chaudière C5 sur le site de Chalampé. Rapport interne Gaz de France, M.DU.IND.1999.00418.

[13] J. MICHOTTE et JBVERBEKE, Février 2013.

Résumé

Le présent travail rentre dans le cadre de la tendance actuelle, qui vise l'économie de l'énergie et la sauvegarde de l'environnement.

L'objectif à atteindre, c'est de réduire les oxydes d'azote produits lors de la combustion au sein d'une chaudière à gaz pour un développement durable, appliquant le processus « Reburning » de gaz naturel et de l'air.

Un diagnostic d'une chaudière nous a permis de déterminer la quantité des NOx produits lors de la combustion, ainsi que les paramètres nécessaires à la réalisation de l'installation proposée.

Un dimensionnement rigoureux des injecteurs auxiliaires de gaz Naturel et de l'air ont été fait au cours de ce travail.

Mots clés : Chaudière, Dimensionnement, Reburning, Combustion, Injecteurs, Brûleur, NOx ;

Abstract

This work is part of the current trend, which is the economy of energy and conservation of the environment. The goal, is to reduce the nitrogen oxides produced during combustion in a gas boiler for a sustainable development, applying a process "Reburning" natural gas and air. A diagnosis of a boiler enabled us to determine the amount of NOx produced during combustion, as well as the parameters required for the realization of the proposed facility. A rigorous design of auxiliary natural gas injectors and air was done during this work.

Keywords : boiler, sizing, Combustion, Reburning injectors, burner, NOx

ملخص

البيئة وحماية الطاقة على الحفاظ إلى يهدف الذي الحالي الاتجاه إطار في العمل هذا يندرج وتطبيق المستدامة، التنمية لتحقيق الغاز المراحل في الاحتراق أثناء تنتج التي النيتروجين أكاسيد من الحد هو والهدف والهواء الطبيعي الغاز "REBURNING" عملية المرفق لتنفيذ اللازمة والمعلومات الاحتراق، أثناء تنتج التي النيتروجين أكاسيد من كمية لتحديد لنا سمح مرجل تشخيص المقترح.

العمل هذا خلال والهواء الطبيعي الغاز المساعدة الحقن طريق عن دقيق تصميم وقدم النيتروجين وأكاسيد الشعلات، محقن، الاحتراق، REBURNING أبعاد، التدفئة، البحث كلمات