

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT MÉCANIQUE
N° :



DOMAINE : Sciences et Technologie
FILIÈRE : MÉCANIQUE
OPTION : ENERGITIQUE

THESE

Présentée pour l'obtention du grade Master académique

**Par: - BOUBAAYA Hassen
- KHAREF Hocine**

Thème

*Caractérisation des paramètres de
combustion d'un four industriel : cas de
cimenterie de Hammam Dhalaa à M'sila*

Soutenue publiquement, le 31 / 05 /2017/, devant le jury composé de :

Mr. BOUAOUINA L	Université de M'sila	Président
Mr. ROUABHI Youcef	Université de M'sila	Directeur de Thèse
Mr. BERKACHE	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2016 /2017

Remerciements

Le travail présenté dans ce manuscrit a été effectué dans le cadre du stage au niveau de la Cimenterie de Hammam Dhalaa, pour l'obtention du grade master en option énergétique, sous la direction du Monsieur ROUABHI Youcef, à qui je tiens à adresser mes plus vifs remerciements pour avoir dirigé cette étude et pour ses consignes qui nous ont été d'un grand soutien.

Nous lui exprimons également nos sincères gratitude pour la confiance qu'il nous a témoignée tout au long de ce travail.

Nous remercions les membres du jury qui nous font l'honneur de juger ce modeste travail.

Enfin, à tous ceux et celles qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail, nous disons merci.

A toute notre grande et petite famille...

A tous nos amis ...

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I Étude bibliographique	
I.1 introduction	3
I.2 Description des fours industriels	
I.2.1 Introduction	4
I.2.2 Bref aperçu historique sur l'évolution de four	5
I.2.3 Classification des fours	6
I.2.4 Les différents types de four industriels	
I.2.4.1 Four à chaleur tournante	7
I.2.4.2 Les fours à calcination	7
I.2.5 Le principe de fonctionnement du four	8
I.3 Les différents types de combustibles et comburants dans l'industrie	9
I.4 Avantages et inconvénients des fours industriels	11
I.4.1 Avantages et inconvénients du four à chaleur tournante	11
Chapitre II Cas cimenterie de M'sila	
II introduction	
II.1 Définition de la société Lafarge	12
II.2 Bref historique de la société	12
II.2.1 Fusion avec Holcim	14
II.2.2 Position de Lafarge de Hammam Dalaa à M'sila	15
II.3 Production	
II.3.1 Définition du ciment	15
II.3.2 Organigramme du procédé	16
II.3.3 Types du ciment de la cimenterie de hammam dalaa	16

II.4 Présentation des fours rotatifs de cimenterie	17
II.4.1 Les charges mécaniques mises en œuvre ou appliquées	18
II.4.2 On peut citer comme défauts de géométrie	18
II.4.3 Les sollicitations dues à la charge thermique sont.....	18
II.5 Le brûleur	19
II.5.1 Gaz naturel	19
II.6 Notions sur les jets et les flammes diffusion	
II.6.1 La calcification des flammes	22
II.6.2 Le mélange stœchiométrique	24
II.7 Notion sur les jets	
II.7.1 Développement d'un jet turbulent en atmosphère calme (jet libre)	25
II.7.2 Ecoulement d'un jet horizontal dans une enceinte confinée.....	27
II.7.3 Fluctuations instantanées de l'écoulement.....	31
II.8 Notion sur les échelles de turbulence.....	33
II.8.1 Les échelles de la turbulence	35
II.8.2 L'échelle de Kolmogorov.....	39
II.8.3 Jets excités	41
Chapitre III Analyse chimique des gaz de combustion	
III. 1 Introduction.....	44
III.2 L'air atmosphérique.....	44
III.3 Constituants de l'air atmosphérique.....	45
III.4 Le gaz de ville.....	46
III.5 Formation des oxydes d'azote.....	47
III.5.1 Mécanisme du NO thermique.....	47
III.5.2 Mécanisme du NO précoce.....	49
III.5.3 Calcul de la production de NO_x	50

III.5.4 vitesses de formation du NO thermique.....	51
III.6 Monoxyde de carbone.....	52
III.6.1 Formation du monoxyde de carbone.....	52
III.6.2 Gaz carbonique	52
III.6.3 Formation du gaz carbonique	52
III.7 Les émissions naturelles de CO ₂	52
 Chapitre IV Traitement des déchets industriels dans les fours à ciment	
IV.1 Introduction.....	54
IV.2 Types de déchets industriels	54
IV.3 Utilisation des déchets pour produire du ciment.....	55
IV.4 Incinération des déchets industriels.....	56
IV.4.1 Incinérateur à four rotatif	56
IV.4.2 Incinérateur à lit fluidisé.....	56
IV.5 Impacts sur l'environnement.....	57
IV.6 Traitement le moins nocif pour l'environnement.....	58
IV.7 Conclusion.....	60
Conclusion générale.....	61
Référence	62
Annexe	66

Chapitre I

Etude Bibliographique

Introduction générale

La production mondiale de ciment s'élevait, en 2001, à 1692 millions de tonnes. En Afrique (5 % de la production mondiale), les principaux producteurs sont localisés en Afrique du Nord (65 %). En Asie (62 % de la production mondiale), la Chine domine le marché mondial de production [1].

En fait, l'évolution du marché est liée notamment au niveau d'industrialisation du pays. Ainsi, le niveau de production de ciment dans les pays industrialisés s'est globalement stabilisé depuis une dizaine d'années, et les fluctuations observées dépendent seulement d'aléas conjoncturels [2].

En revanche, la production de ciment dans les pays en développement s'est accrue particulièrement en Algérie avec le programme d'état de développement de l'habitat, et continue à progresser en fonction de leur évolution économique [3].

Plusieurs facteurs appuient la nécessité de réaliser des diagnostics énergétiques dans l'industrie cimentière pour identifier les économies d'énergie potentielles et mettre en œuvre des mesures d'économies d'énergie [4].

L'industrie cimentière est fortement consommatrice en énergie calorifique et électrique. De fait, environ 40 % de ses coûts de production sont attribuables à cette dernière.

Les besoins mondiaux en énergie pour la fabrication du ciment sont estimés à environ 6×10^9 GJ/an pour les combustibles et 200 TWh/an pour l'électricité. Par ailleurs, l'énergie représente 30 à 40% du prix de revient du ciment (hors frais d'amortissement) [5].

- L'industrie cimentière est également fortement capitalistique, puisqu'une usine dont la capacité de production s'élève à 1 million de tonnes par an de ciment représente un investissement de l'ordre de 150 millions de US \$. Ceci incite à rechercher des solutions d'amélioration des unités de production existantes plutôt que de créer une nouvelle ligne [6].

- Par ailleurs, les consommations spécifiques varient beaucoup d'une usine à l'autre et selon les pays considérés (entre 3000 et 8000 kJ/tonne de clinker pour la consommation calorifique, et entre 70 et 160 kWh/tonne de ciment pour la consommation d'électricité).
- L'industrie cimentière est aussi fortement émettrice de gaz à effet de serre, dioxyde de carbone – CO₂, provenant des besoins en énergie calorifique, mais aussi du procédé de fabrication du ciment.

La problématique des changements climatiques incite à rechercher tous les moyens de réduction des émissions de CO₂ [7]:

L'amélioration des consommations énergétiques spécifiques doit se doubler d'une démarche nouvelle de substitution des produits traditionnellement fabriqués (clinker) par des produits présentant des caractéristiques voisines (laitier), etc.

Traditionnellement, les sources d'énergie impliquées dans la production de ciment sont les combustibles fossiles non renouvelables comme le charbon et le coke de pétrole.

Cependant, toute une série de matières résiduelles qui ne sont pas valorisées en ALGERIE représentent d'autres sources d'énergie dont on peut tirer parti en les utilisant comme combustibles alternatifs dans les fours à ciment :

Vieux pneus, huile à moteur usagée, solvants, bardeaux bitumés, encre d'imprimerie, caoutchouc, bois de rebut, boues d'usine d'épuration, essence à détacher et les matières de la biomasse comme les copeaux de bois, la boue, le bois traité, le papier et le carton.

Auparavant, ces matières prenaient le chemin des sites d'enfouissement ou des incinérateurs où elles produisaient des gaz à effet de serre (GES) sans récupération d'énergie alors que maintenant elles sont valorisées dans les fours à cimenterie [8].

I.1 Introduction

La combustion est aujourd'hui un des principaux moyens de conversion de l'énergie. Elle est utilisée dans de nombreux systèmes pratiques aussi bien pour produire de l'énergie thermique (chaudières ou fours domestiques et industriels) ou de l'électricité (centrales thermiques), que pour le transport (moteurs automobiles et aéronautiques, moteurs fusée,...) ou encore la destruction de déchets (incinérateurs) [9].

La combustion peut être caractérisée comme une (ou des) réaction(s) irréversible(s) fortement exothermique(s) entre un combustible (ou réducteur) et un comburant (ou oxydant) voir la figure I.1 et selon le schéma global [10]:



Les phénomènes de combustion se composent de nombreux processus physico-chimiques qui présentent un large spectre d'échelles de longueurs et de temps à déterminer, ainsi une description des installations pour réaliser cette combustion n'est toujours triviale [11].

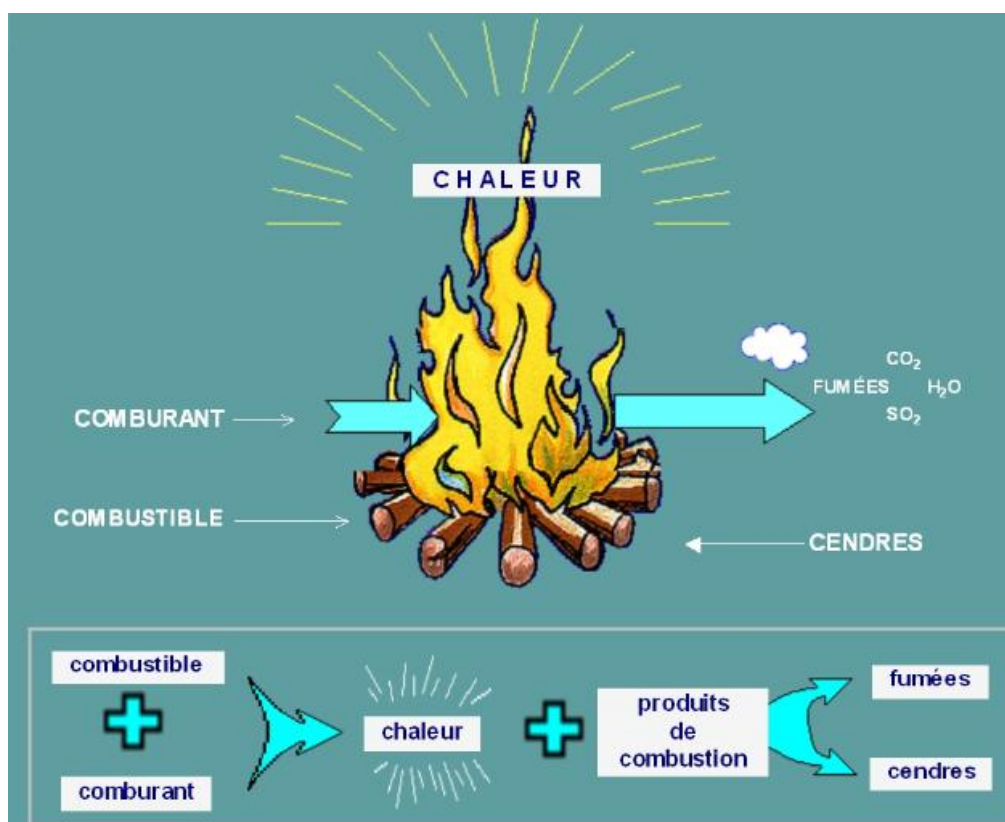


Fig. I.1 Représentation générale de la combustion

Plus précisément, pour une combustion optimisée dans le domaine de la fabrication des ciments demandent une description particulière des installations appropriées.

I.2 Description des fours industriels

I.2.1 Introduction

Un four est une enceinte maçonnée ou un appareil, mené d'un système de chauffage puissant, qui transforme, par la chaleur, les produits et les objets [12]. En cuisine, il permet de cuire des aliments. Dans un processus de production d'objet, le four permet de réaliser le traitement d'objets par la chaleur : poteries, céramiques, verres, métaux...

Un four est un outil utilisé pour élever la température à une limite déterminée, afin de transformer un produit. Il peut être :

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

Il s'intègre généralement dans une ligne de production complexe. On trouve des fours dans un très grand nombre d'activités industrielles, ce qui les rend une approche globale assez délicate. La présence des fours spécifiques dans l'industrie notamment [13]:

- Les fours de l'industrie sidérurgique.
- Les fours de traitement thermique des métaux.
- Les fours de raffinage et de l'industrie chimique.
- Les fours de cimenterie.
- Les fours de l'industrie verrière.
- Les fours des industries céramiques et des produits réfractaires.

I.2.2 Bref aperçu historique sur l'évolution de four

Depuis la plus haute antiquité, l'homme a cuit la pierre calcaire ou le gypse pour l'utiliser ensuite comme liant dans les constructions. Cette cuisson s'est faite dans des fours qui étaient de simples cuves.

Les Romains perfectionnent le procédé en remplaçant le calcaire, contenant de l'argile donnait après cuisson un liant hydraulique. L'année 1756 où Laucien SMEATION [14] démontre que l'hydraulicité provient de l'argile dans le mélange qu'il cuisait à feu modéré dans des fours "BOUTEILLE" voir la figure I.2.



Fig. I.2 Four de bouteille.

Plus tard ASPDIN en 1824 [15] et JOHNSON en 1844 [16] perfectionnèrent la technique de leur confrère "SMEATION" ; il créa des fours où il s'efforça de rattraper une partie de la chaleur qui s'échappait dans les fumées pour sécher et préchauffer la matière à cuire et a fait passer les fumées sous des plateaux contenant la pâte à sécher, mais ces fours ont un inconvénient de production discontinue et de faible production et consommaient beaucoup d'énergie.

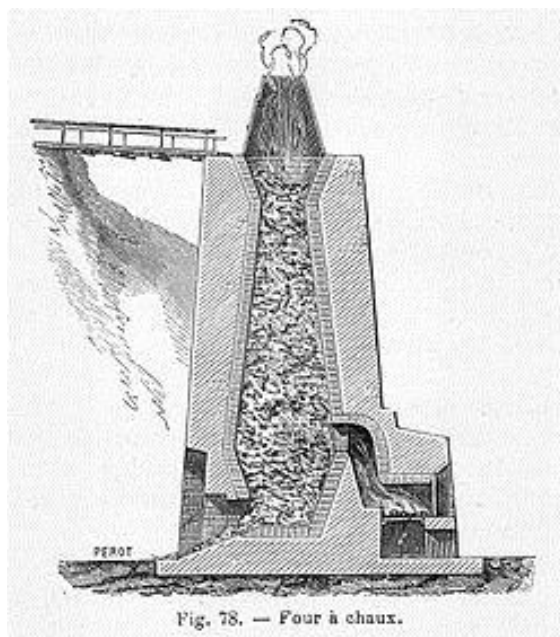


Fig. I.3 Four à chaux de 1906

En 1885 l'anglais RANSOME [17] construit le premier four rotatif, sa longueur était de 05 mètres avec un diamètre de 0.45 m, chauffé au gaz, mais il ne put jamais le faire marcher, fusion très poussée, et le collage formait un bouchon sur le revêtement.

Et c'est en 1953 qu'une nouvelle invention a vu le jour pour réduire la consommation thermique des fours. Il s'agit des fours HUMBILDT [18] avec préchauffeurs à suspension gazeuse.

Dans ce type de four, les gaz chauds provenant de l'aval du four transmettent leur chaleur à une farine qui descend dans une série de cyclones disposés l'un au-dessus de l'autre à l'amont du four appelé four à 04 étages.

I.2.3 Classification des fours

Toute classification est arbitraire, elle est toutefois utile dans la mesure où elle permet de retrouver des caractéristiques communes à des équipements, à la première vue, très différents.

Nous proposons ici quatre classifications, en fonction [19] :

- ✓ De la manutention du produit : fours continus ou discontinus.
- ✓ Du procédé de chauffage : direct ou indirect.
- ✓ Du niveau de température.
- ✓ Du combustible.

I.2.4 Les différents types de four industriels

I.2.4.1 Four à chaleur tournante

Le four à chaleur tournante est constitué d'un petit ventilateur placé sur la paroi du fond. On parle ici de convection non pas naturelle, mais forcée puisque la chaleur est diffusée dans le four grâce à ce petit ventilateur.

Le four à chaleur tournante [20] existe au gaz ou à l'électricité. Il peut être de deux types :

- A chaleur brassée lorsque les résistances électriques ou les brûleurs à gaz sont placés dans la partie haute, la voûte, et dans la partie basse du four, la sole, comme sur un four traditionnel.
- A chaleur pulsée lorsqu'en plus des résistances ou des brûleurs placés dans la voûte et dans la sole, une résistance circulaire est placée sur la paroi du fond, qui permet une cuisson plus rapide des aliments.

I.2.4.2 Les fours à calcination

Les fours à calcination [21] sont des fours industriels employés dans la fabrication de la chaux, du ciment ou du plâtre. C'est aussi un appareil de laboratoire visant à réaliser les opérations de calcination.

La cuisson des différents liants (chaux, ciment ou plâtre) se fait en continu dans :

- Des fours verticaux à chauffage direct : ce sont des fours à calcination par stratification dans lesquels les matières premières et le combustible sont placés par couches alternatives. La méthode a comme désavantage que la matière première est éventuellement corrompue par le contact du combustible.
- Des fours verticaux à chauffage indirect : ce sont des fours à calcination dans lesquels les matières premières sont dans un compartiment séparé du combustible. La méthode est énergivore et tend à être remplacée.

- Les fours rotatifs à chauffage direct, plus efficaces, sont des cylindres en acier légèrement inclinés dans lesquels les matières premières vont subir plusieurs transformations physiques : dessiccation, décarbonatation et calcination, clinkerisation.
- La matière quitte le cylindre sous forme de gros grains arrondis, les clinkers. Le charbon est insufflé sous forme pulvérulente et chemine en sens inverse de la matière première.



Fig. I.4 Four rotatif long: ligne sèche

- Les fours rotatifs à chauffage indirect, le même que le précédent, mais le foyer est placé à l'extérieur et la chaleur insufflée dans le cylindre.
- Les fours électriques sont employés pour certains ciments comme le ciment alumineux.

Le laitier employé dans certains ciments est un sous-produit de la transformation de la fonte et est produit dans les hauts fourneaux.

I.2.5 Le principe de fonctionnement du four

Le principe de fonctionnement du four est simple [22] : l'objet à traiter y est enfermé pour être soumis à une source de chaleur provenant de l'intérieur ou de l'extérieur du four voir la figure I.5. La chaleur à l'intérieur du four peut être répartie par circulation forcée de l'air,

par convection naturelle, par conduction thermique ou par rayonnement (infrarouge, micro-ondes, etc.).

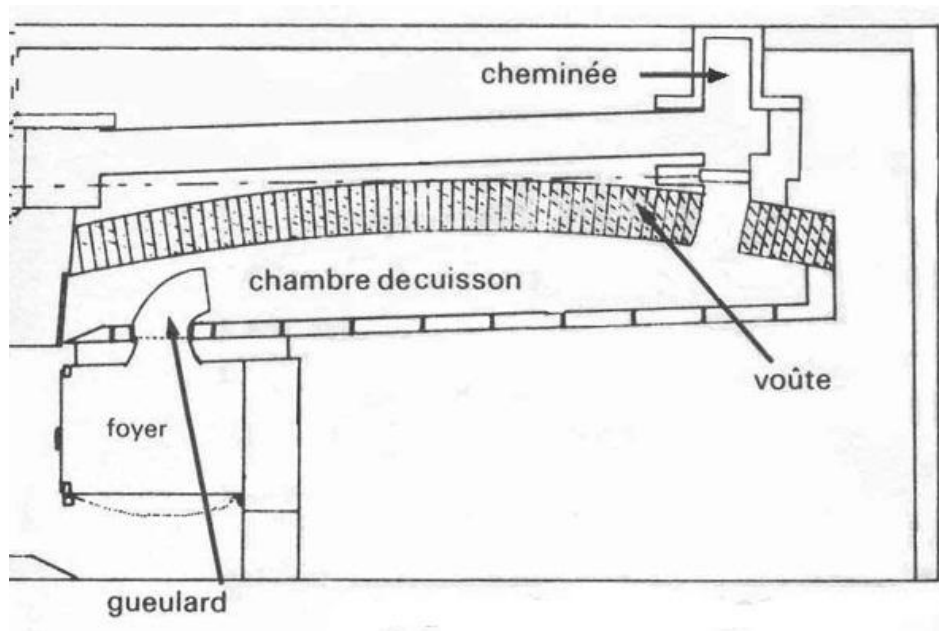


Fig. I.5 Principe de four à gueulard

La source d'énergie pour fournir la chaleur du four peut être :

- Un combustible (bois, gaz naturel...).
- L'électricité dans des résistances.
- Des micro-ondes, avec l'électricité.
- Le rayonnement solaire (four solaire).

I.3 Les différents types de combustibles et comburants dans l'industrie

Les combustibles sont nombreux et bien connus : ce sont pratiquement tous les composés hydrocarbonés de la chimie organique. Une place spéciale doit être faite aux hydrocarbures, depuis le méthane (gaz naturel) jusqu'aux paraffines solides. La plupart des produits organiques naturels, tels le bois, les graisses, etc., sont aussi des combustibles [23].

Tous ces corps sont essentiellement des porteurs d'hydrogène et la combustion de leur carbone ne doit être considérée qu'en second lieu au point de vue énergétique. On connaît d'ailleurs d'autres porteurs d'hydrogène susceptibles de brûler :

L'ammoniac, les hydrures de bore, de nombreux hydrures métalliques, etc. Une autre catégorie de combustibles est constituée par les éléments à l'état non combiné, notamment le carbone et sa forme commune, le charbon.

La combustion de l'hydrogène tend à prendre une grande importance dans la propulsion des fusées. La combustion du soufre permet de préparer l'anhydride sulfureux et tous les produits qui en découlent. La plupart des métaux brûlent quand ils se trouvent dans un état suffisamment divisé [24].

Cette propriété est utilisée pour la propulsion de certaines fusées où l'on mélange différentes poudres métalliques aux propergols pour renforcer leur caractère énergétique.

Il existe trois catégories de combustible (combustible liquide, combustible gazeux, combustible solide) [25] :

- Combustible liquide : Les combustibles liquides, voire gazeux, proviennent généralement du pétrole, qui est un mélange d'hydrocarbures, c'est-à-dire de composés à base de carbone C et d'hydrogène H, auxquels s'ajoutent essentiellement du soufre S, de l'oxygène O et de l'azote N.

Exemples de combustibles liquides: mazout, fuel, hydrocarbures saturés C_nH_m , S, N, O, autres...

- Combustible solide : Tous les combustibles solides sont d'origine végétale à l'exception des propergols (carburants pour fusées). L'uranium et les autres corps radioactifs, qui produisent de l'énergie par fission nucléaire, ne sont pas des combustibles au sens précis du terme, car, lors de leur utilisation, ils ne participent à aucune réaction de combustion.

Exemples de combustibles solides : Bois, Charbon (composition C, H, O, N, S variable), Anthracite (92 à 94% de carbone), Houille (75 à 85% de carbone), Lignite (67 à 74% de carbone), Tourbe (55 à 65% de carbone), autres...

- Combustible gazeux : Exemples de combustibles gazeux: méthane CH_4 , propane C_3H_8 , butane C_4H_{10} , gaz de Lacq (CH_4 95.4%, C_2H_6 3.4%, autres 0.8%, N_2 0.4%), autres...

Les comburants [26] constituent une catégorie beaucoup plus restreinte de composés, mais leur nombre s'accroît régulièrement. À côté de l'oxygène, on trouve, à l'état élémentaire ou combiné, d'autres atomes électro-négatifs :

Les halogènes [27] (fluor, chlore, brome, iode), l'ozone, des acides très oxygénés (acides nitrique et perchlorique), les perchlorates, l'oxyde de fluor, enfin d'autres composés oxygénés plus inattendus tels que l'anhydride carbonique et la vapeur d'eau.

Certains métaux comme le magnésium brûlent en effet dans la vapeur d'eau ou l'anhydride carbonique et ce mode de production d'énergie peut être envisagé sur les planètes dont l'atmosphère est riche en anhydride carbonique.

I.4 Avantages et inconvénients des fours industriels

- Technologie capable de traiter simultanément une grande diversité de déchets spéciaux solides, liquides ou pâteux.
- Destruction complète des déchets dangereux par procédé thermique à haute température.
- Souplesse de fonctionnement par rapport au « mix » de déchets traités.
- Fiabilité et longévité des installations (plus de 20 ans).
- Possibilité de production de vapeur pour besoins industriels ou production électrique.

I.4.1 Avantages et inconvénients du four à chaleur tournante

Le principal inconvénient du four à chaleur tournante [28] est qu'il est bruyant. Bruit relatif au ventilateur. Cependant, le four à chaleur tournante offre de nombreux avantages. Avant tout, et contrairement au four traditionnel, il permet une cuisson sur différents niveaux, et donc de plusieurs plats en même temps. Autre chose : le temps de préchauffe est bien inférieur au temps de préchauffe d'un four traditionnel.

Pour allier les avantages de l'un avec les avantages de l'autre, sachez qu'il existe aujourd'hui des fours traditionnels qui intègrent en plus un mode de cuisson à chaleur tournante.

Chapitre II

Cas de la Cimenterie de M'sila

II Introduction

II.1 Définition de la société Lafarge

Lafarge c'est une société française privée, elle est l'unique actionnaire de la cimenterie algérienne, cette société est considérée comme l'un des premiers groupes mondiaux dans le secteur de la production de matériaux de construction, actuellement elle se trouve dans 150 pays et elle possède trois usines de ciment en Algérie [29].

L'investissement de la société en Algérie dans la première phase était d'installer une ligne de production avec une capacité équivalente de 2 millions de tonnes de ciment annuellement estimé à 260 millions d'euros.

Ultérieurement arriva la deuxième phase, axée sur la mise en place de la deuxième ligne de production de 2 millions de tonnes pour atteindre l'objectif d'une capacité de production équivalente de 4 millions de tonnes par an avec un coût d'investissement estimé à 190 millions d'euros [30].



Fig. II.1 Usine Lafarge de Hammam Dalaa à M'sila.

II.2 Bref historique de la société

C'est en Ardèche, en 1833, que naît l'activité du cimentier Lafarge, après la reprise par son fondateur, Joseph-Auguste Pavin de Lafarge, du Pavin de Lafarge, une activité familiale lancée en 1749, dont l'usine de fours à chaux exploite une carrière de pierre à chaux dans la montagne Saint-Victor, dominant le Rhône entre Le Teil et Viviers [31].

Dès 1864, le site livre 110 000 tonnes de chaux pour le canal de Suez. C'est le premier chantier d'envergure internationale pour l'entreprise [31].

En 1919, l'activité est transformée en société anonyme sous le nom de « Société anonyme des chaux et ciments de Lafarge et du Teil » et, dès 1939, Lafarge devient le premier cimentier français et progressivement l'un des leaders mondiaux.

Lafarge étend son réseau sur trois territoires (dix usines en France, une implantation en Afrique du Nord et une filiale en Angleterre, la « Lafarge Aluminous Cément » en 1926. La société y pratique un « paternalisme théocratique ».

Pendant la Seconde Guerre mondiale, les usines dans la zone occupée pratiquent une collaboration neutre ou tactique alors que certains dirigeants d'usines dans la zone libre (où Lafarge a replié son siège social à Viviers) collaborent avec zèle pour la construction du Mur de l'Atlantique. À la libération, le Comité départemental de libération de l'Ardèche préconise sa mise sous séquestre, qui est effective de septembre 1944 à avril 1947 et va de pair avec une autogestion ouvrière.

Robert Lacoste, ministre à la Production industrielle dans le gouvernement provisoire du général de Gaulle, appuie le recours en Conseil d'État contre le séquestre. L'arrêt du 28 mars 1947 lève la séquestration, et des projets de loi de nationalisation n'aboutissent pas.

En 1980, la fusion avec l'entreprise belge Coppée donne naissance au Groupe Lafarge Coppée et en 1997, elle acquiert le Britannique Redland ce qui permet à Lafarge d'entrer dans le marché des tuiles.

Le 12 juillet 2001, l'acquisition du groupe britannique Blue Circle Industries Plc (BCI) permet à Lafarge de devenir le premier producteur mondial de ciment. Pour financer cet achat, Lafarge revend sous forme de LBO l'essentiel de sa branche de matériaux de spécialités, rebaptisée Materis, ainsi que la totalité de ses actifs chaux (Lafarge Chaux), basées aux États-Unis et en Europe.

Le 29 juin 2004, Lafarge décide de doubler la capacité de sa cimenterie de Dujiangyan, en Chine, pour la porter à 2,4 millions de tonnes, et signe un accord de partenariat avec Shui on Construction Materials Limited (SOCAM), cimentier chinois coté à la bourse de Hong Kong [32].

En 2007, Lafarge SA annonce le rachat de Orascom Cement, la division-ciment du groupe égyptien Orascom, pour 8,8 milliards d'euros, mais est condamné, la même année, avec la

société Vicat pour entente illégale et abus de position dominante collective sur le marché de gros de l'approvisionnement de la Corse en ciment.

Le 2 juillet 2008, Lafarge Couverture devient Monier après la cession de l'activité Toiture à PAI partners et le 19 août 2008, dans le cadre du plan de nationalisation de l'industrie du ciment, du président vénézuélien, Hugo Chávez, Lafarge conclut un accord de cession de ses filiales vénézuéliennes.

Le 28 juillet 2009, dans le cadre du plan global de désinvestissements du Groupe, Lafarge annonce la cession de ses actifs-Ciments et Granulat & Béton au Chili (Lafarge Chile SA et Immobiliaria San Patricio ainsi que la cimenterie de la calera) au groupe péruvien Brescia, pour une valeur de 555 millions de dollars US.

En 2010, Lafarge renforce ses positions au Brésil (accord avec Votorantim) et en Europe centrale (avec STRABAG).

En 2011, le groupe inaugure trois usines en Hongrie, Syrie et Nigeria et crée une coentreprise avec Anglo American au Royaume-Uni. Il cède la majorité de ses activités plâtre en Europe, en Amérique du Sud, en Asie et en Australie. Il possédait plus de soixante-dix sites de production dans trente pays.

Fin 2011, pour accélérer son développement, Lafarge présente un projet de nouvelle organisation tournée vers ses marchés et ses clients.

II.2.1 Fusion avec Holcim

Le 7 avril 2014, Lafarge et le groupe suisse Holcim annoncent un projet de fusion entre les n° 1 et 2 du ciment. La nouvelle entité sera basée en Suisse.

En février 2015, Cément Road stone Holdings (CRH) acquiert les actifs de Lafarge et de Holcim dans le cadre de leur fusion, pour un total de 7,34 milliards de dollars.

En mars 2015, Lafarge annonce l'acquisition des 45 % qu'il ne détient pas dans Lafarge Shui on Cément pour 294 millions d'euros. Cette offre de rachat est conditionnée au succès de sa fusion avec Holcim. En juin 2015, Lafarge acquiert les 14 % de participations qu'il ne détenait pas dans Lafarge India, pour 304 millions de dollars [33].

Le 10 juillet 2015 a lieu la fusion de Lafarge et Holcim. Le nouveau groupe est lancé officiellement le 15 juillet 2015 et prend le nom de Lafarge Holcim.

En août 2016, suite à la restructuration de la cimenterie de Saint Victor d'Ymonville, 111 licenciements économiques sont annoncés.

II.2.2 Position de Lafarge de Hammam Dalaa à M'sila

La société Lafarge de hammam dalaa situé à M'sila reliée à l'ouest de la route nationale n° 60, et à l'est de la route nationale n° 45 reliant à Bordj Bou Arreridj et environ 260 km de la capitale, et à 120 kilomètres de la province de Bejaïa, ce positionnement donne à l'usine une bonne position géographique par apport au trafic commerciale.

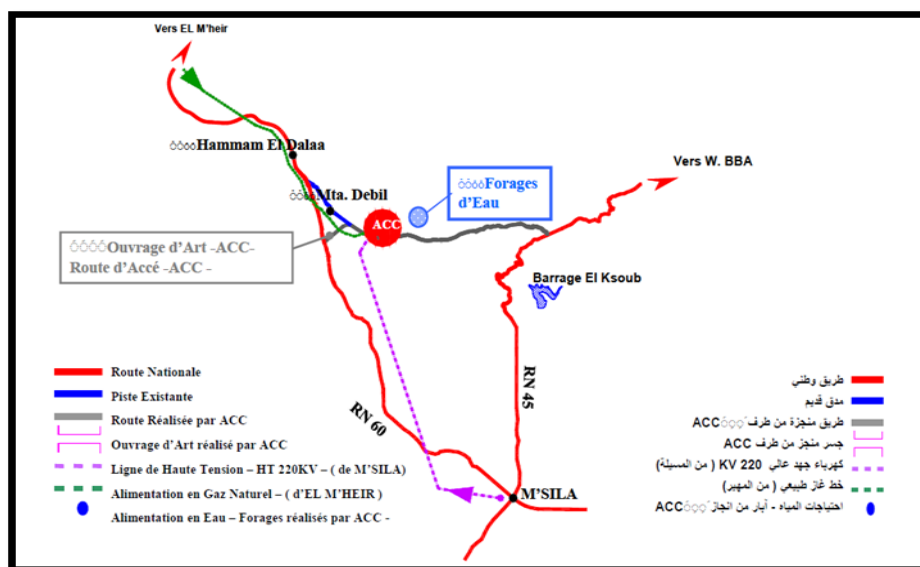


Fig. II.2 Position géographique de LAFARGE M'sila

II.3 Production

II.3.1 Définition du ciment

Le ciment est un liant hydraulique obtenu par cuisson à très haute température d'un mélange de calcaire et d'argile, suivi d'une phase de broyage. La plupart des ciments sont à base de clinker et d'ajouts. Il s'emploie le plus souvent sous forme de poudre : mélangé avec de l'eau, il fait prise et permet d'agglomérer entre eux des sables et des granulats (sable ou graviers), pour constituer de véritables roches artificielles, bétons ou mortiers. [34]

II.3.2 Organigramme du procédé

Il existe deux lignes de productions du ciment à LAFARGE-CIMENT Usine de M'sila, qui sont presque identiques. Le type de procédé qui est utilisé à l'usine est la voie sèche dont on

fabrique un cru en sec (poudre) qui est introduit dans une tour de préchauffage.

De la carrière à l'ensachage, la matière première du ciment suit des étapes différentes qui sont des transformations physique et chimique [35].

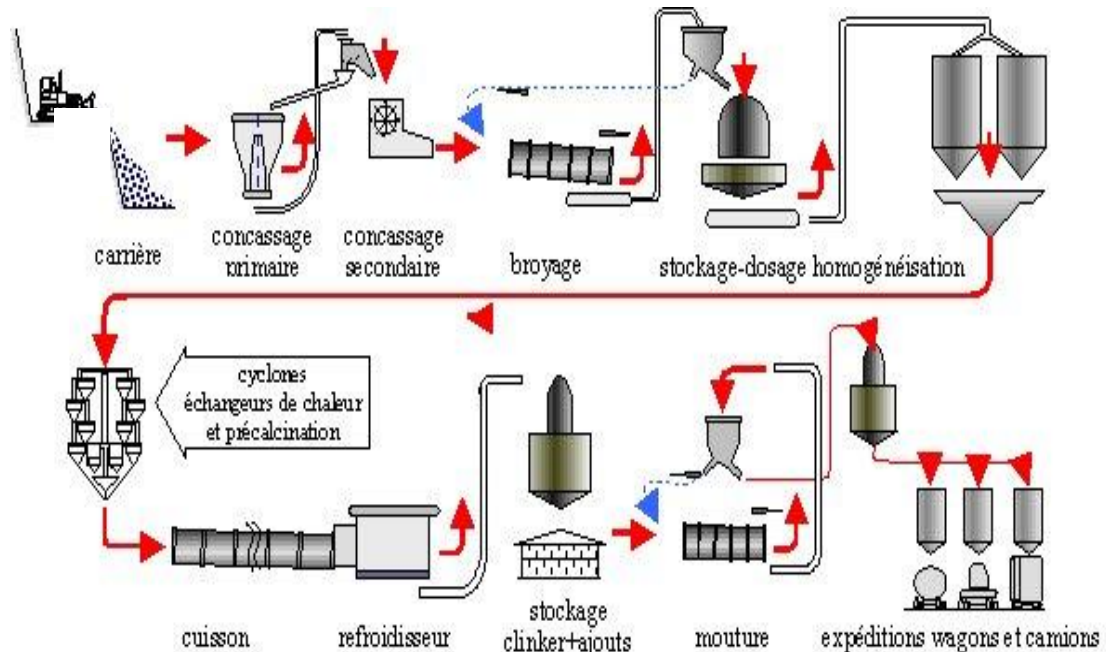


Fig. II.3 Circuit de fabrication de ciment.

La Figure II.3 ci-dessous résume les différentes étapes pour les deux lignes de production à l'usine M'sila.

II.3.3 Types du ciment de la cimenterie de hammam dalaa

L'industrie cimentière commercialise de nombreux types de ciments comme :

- **MATINE** : Ciment pour béton exigeant CEM II/B 42,5 RNA 442
- **CHAMIL** : La Qualité pour ma maison CPJ – CEM II/B 32, 5 R NA 442
- **MOKAOUEM** : Ciment pour béton en milieux agressifs CPJ – CEM III/B 42, 5 –ESNA 443

Toute cette variété est mise au marché national, afin de répondre aux différents problèmes rencontrés lors de la construction des ouvrages :

- Résistances mécaniques.
- Résistance à une attaque physique ou chimique.
- Mise en œuvre particulière.

II.4 Présentation des fours rotatifs de cimenterie

D'un point de vue conception, il existe des invariants quelle que soit la dimension du four. Le four est un tube en appui sur des stations de roulement (deux, trois, ... huit) ayant une inclinaison de l'ordre de 3.5 % par rapport à l'horizontale, imprimé par une translation axiale assurée par une butée mobile entraînée par un poussoir hydraulique.

Le four tourne à des vitesses de rotation comprises entre 1.8 et 3.5 tr/min, sa mise en rotation du four peut être assurée de deux façons :

- Sur le four à trois appuis et plus, elle est effectuée par un ou deux groupes de commande ; 1 ou 2 pignons une couronne dentée fixée sur la virole. Ceux de l'ECDE sont portés sur quatre stations avec un seul groupe de commande, chacun.
- Avec la nouvelle technologie du four sur deux appuis, la rotation du four peut être obtenue directement par un ou deux galets d'une station de roulement eux-mêmes entraînés par deux ou quatre moteurs électro-hydraulique ou électromécaniques [36].



Fig. II.4 Four rotatif

A l'intérieur du four à clinker, la température des fumées évolue de 2000 – 2350 C⁰ à 1050 C⁰, tandis que la matière passe de 850 – 900 C⁰ à 1420 C⁰, figure. Un revêtement réfractaire, principalement du type briquetage, protège la virole et réduit les pertes de chaleur.

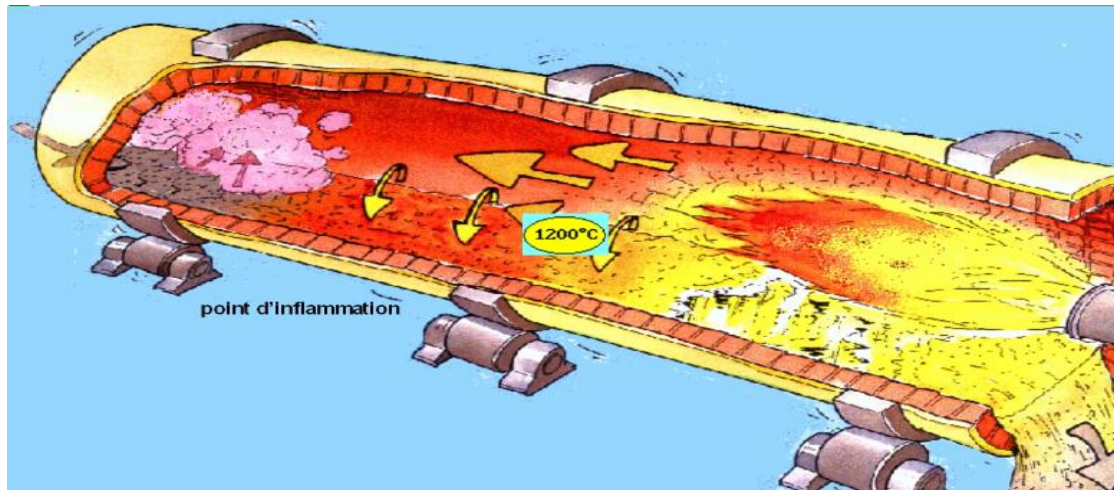


Fig. II.5 A l'intérieur du four à clinker

Le four est soumis à des sollicitations ayant pour origine les charges mécaniques mises en œuvre ou appliquées, la charge thermique où des défauts de géométrie.

II.4.1 Les charges mécaniques mises en œuvre ou appliquées

- Uniformément réparties : poids de la virole, poids du réfractaire, poids de la matière ;
- Concentrées : poids de la couronne (bandage), poids sur les extrémités du four (joints, satellites), force et couple d'entraînement.
- Evolutives : croûtage, anneaux, concrétions.

II.4.2 On peut citer comme défauts de géométrie

- Les alignements imparfaits des supports (station de galets, bandages) horizontal et vertical ;
- La construction défectueuse au montage (axe de virole non rectiligne) ;
- Les déformations permanentes créées par des surchauffes.

II.4.3 Les sollicitations dues à la charge thermique sont

La variation de température sur la longueur du four. Une distribution de température non homogène dans une section transversale. Ces sollicitations engendrent des contraintes et des déformations qui sont évaluées par le calcul lors de la conception, de manière à rester des limites acceptables.

Elle fait l'objet d'un suivi et d'un contrôle quotidien et rigoureux en cas d'instabilité (vibration) vu les détériorations qu'elles peuvent engendrer.

II.5 Le brûleur

L'énergie représente 30 à 40% du revient du ciment. Un système qui permet une utilisation efficace de plusieurs type de combustible donne un résultat encourageant [37].

Une utilisation efficace (maitrise) des brûleurs demande que le combustible ne précarise pas la qualité du clinker, non polluant et ne crée pas des problèmes de fonctionnement dans le four, mise à part le type de combustible utilisé. Il existe plusieurs types de brûleur, selon que la combustible est de type prémélangée ou non prémélangée.

Dans la cimenterie de Hammam Dalaa ils utilisent un brûleur de type Novaflam Gaz naturel.

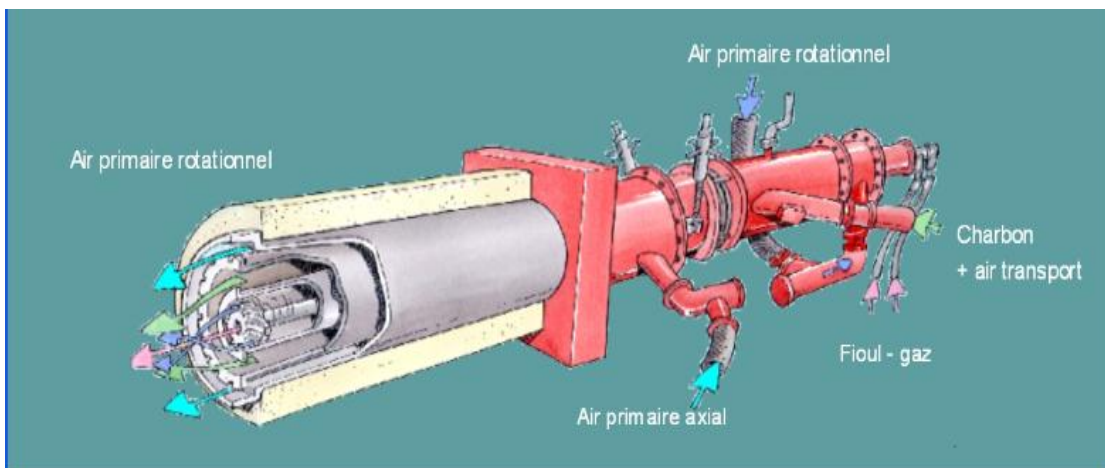


Fig. II.6 Un brûleur à Gaz naturel.

Le brûleur dans un four rotatif fonctionne comme un injecteur, figure II.10. L'air secondaire est aspiré du refroidisseur dans le four de telle façon que la flamme dégagée se concentre autour de ligne centrale du four.

II.5.1 Gaz naturel [38]

Dans l'industrie cimentière algérienne le carburant est le gaz naturel. Presque toutes les cimenteries utilisent des brûleurs (possibilité d'utiliser des carburants solides, liquide et même des déchets énergétique traités).

La constitution essentielle des gaz naturels est le méthane, le plus simple et le plus léger de tous les hydrocarbures il constitue 81% du gaz brut d'Hassi R'Mel. Le gaz naturel contient également d'autres hydrocarbures (éthane, propane, butane) et même des gaz inertes tels que l'azote ou le gaz carbonique. Compte tenu de sa forte teneur en méthane, les gaz naturels possèdent généralement des propriétés physique et chimiques voisines de celles du méthane. Le tableau ci-dessous rappelle quelques-unes des propriétés du méthane.

Masse volumique (g/dm ³)	0.7186
Densité par rapport à l'air	0.554
PCS pouvoir calorifique supérieure (Kcal/m ³)	9510
PCI pouvoir calorifique inférieure (Kcal/m ³)	8570
Volume d'air de combustion à richesse 1	9.52
Vitesse de combustion laminaire à richesse 1 dans l'air à 25 C ⁰ (cm/s)	43.4
Vitesse de combustion adaib. à richesse 1 dans l'air à température initiale de 25 C ⁰	1952
Limites d'inflammabilité (concentration en méthane dans l'air) :	
Limite inférieure = (%)	5
Limites supérieure = (%)	15
Température d'auto inflammation (C ⁰)	580

Tableau. II.1 caractéristique de gaz naturel.

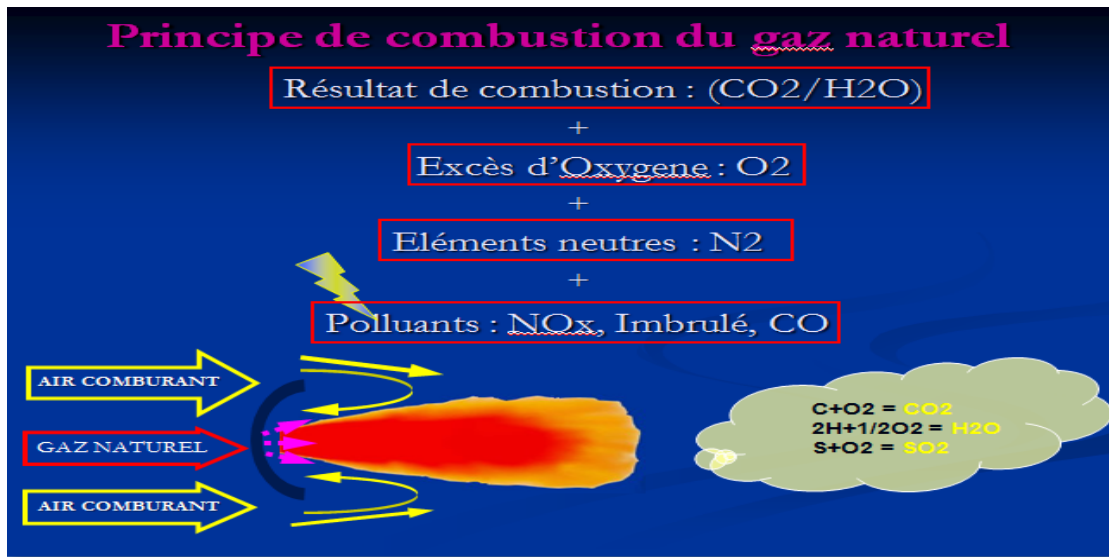


Fig. II.8 Principe de combustion du gaz naturel.

Le graphe de la figure montre la variation du volume des gaz brûlés en fonction du PCI du gaz naturel, c'est –à-dire de la teneur en hydrocarbures. Pour le gaz naturel algérien avec un PCI variant de 8400 à 8450 Kcal/m³, le volume des gaz brûlés se situe aux alentours de 12.4 Nm³/m³ de gaz naturel.

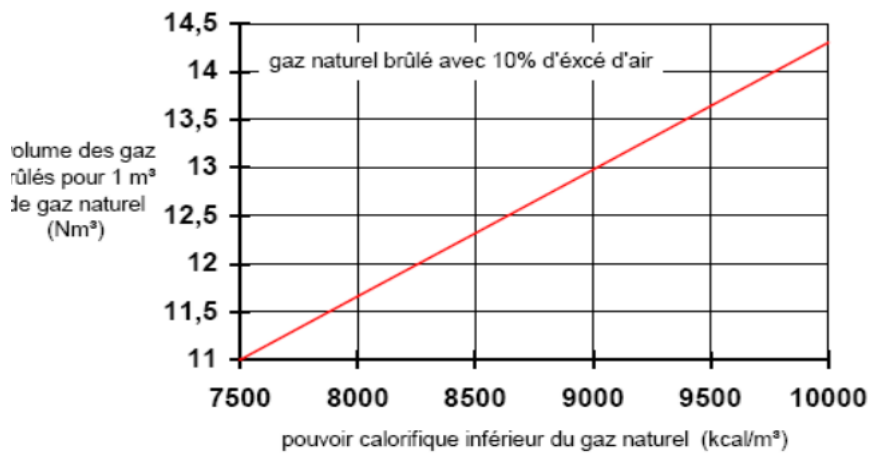


Fig. II.9 Variation du volume des gaz brûlés en fonction de PCI du gaz naturel [39].

II.6 Notions sur les jets et les flammes diffusion

II.6.1 La classification des flammes

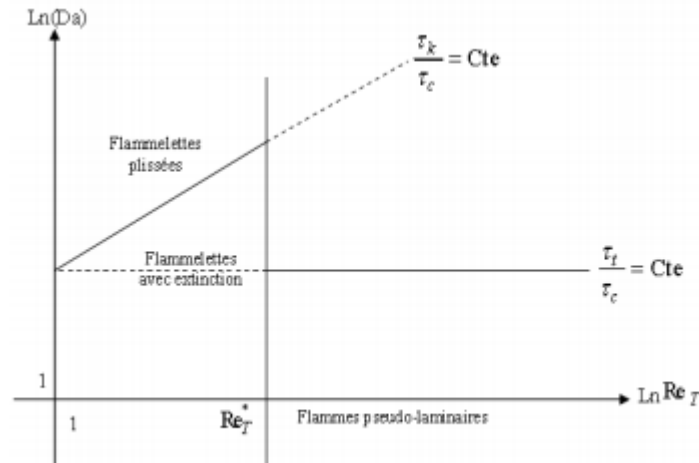


Fig. II.10 les différents structures d'une flamme de diffusion [39].

On peut résumer les classifications pour la combustion turbulente non-prémélangée disponibles dans la littérature en deux groupes : celles qui utilisent les nombres de Reynolds et de Damkohler (Libby et Williams 1994) et celles qui utilisent les fluctuations, la fraction de mélange et le nombre de Damkohler (Bray et Peter 1994). Nous proposons une classification Reynolds, Damkohler en figure II.10.

- Lorsque la turbulence n'est pas trop forte, la structure de diffusion est celle d'une flamme plissée. Elle est constituée donc d'une longue flammelette continuellement plissée, étirée et comprimée alternativement par les mouvements turbulents, figure II.11.
- Lorsque la turbulence devient assez forte, deux phénomènes peuvent se produire :
 - ❖ D'une part la turbulence peut étirer la flammelette de telle façon que celle-ci s'éteigne à l'endroit où elle est suffisamment étirée. On rencontrera plusieurs flammelette séparé par la zone d'extinction et celle-ci apparait lorsque $\frac{\tau_c}{\tau_k} > 1$.
 - ❖ D'autre part, une turbulence trop forte va provoquer aussi des interactions entre deux portions de flammelette. Les grandes échelles feront interagir deux portions assez éloignées et cela formera des boucles de flammelette.
 - ❖ Les petites échelles spatiales proches de l'épaisseur de la flammelette entraineront un épaissement local de celle-ci. La zone de réaction renferme sur elle-même les petites

échelles de taille l_k (échelle Kolmogorov), semblables à l'épaisseur de la flammelette de diffusion.

- ❖ Lorsque ces interactions deviennent trop nombreuses, on ne peut considérer la flamme comme composée d'une ou de plusieurs flammelettes plissées; ces dernières sont modifiées par turbulence et l'estimation proposée est telle que l'épaisseur de la zone de réaction est inférieure à l'échelle Kolmogorov.

Le diagramme de la figure II.10 montre les différents domaines de flammes de diffusion :

- $Re_t=1$: on ne s'intéresse qu'au domaine vraiment turbulent pour lequel $Re_t > 1$. Avec Re_t^* limite du domaine des flammelettes.
- $Re_t > 1$: est le domaine des flammelettes à extinction locales (propre à la flammelette).
- $Re_t > Re_t^*$: est domaine où il n'est plus possible de distinguer des flammes lettres au sens propres du terme, c'est-à-dire qui ne soient pas modifiées intérieurement par la turbulence, figure II.18-b. Si $\tau_k < \tau_c$ on a lieu à une extinction et si $\tau_k > \tau_c$ on a lieu à une combustion sans extinction [39].
- $\tau_c \gg \tau_t$ si l'on considère de maintenant le domaine où la petitesse de τ_t implique que les fluctuations turbulentes de concentration et de température, dans la flamme sont très petites. Cela veut dire qu'elles ont le temps de se dissiper avant qu'aucun phénomène chimique notable ne se produise (bien sur, cela n'implique pas que les fluctuations de vitesse soient faibles, puisqu'elles sont constamment renouvelées, par hypothèse). Si de plus Re_t est élevé, la diffusion est assurée de façon très efficace puisque le coefficient effectif de diffusion turbulente est justement, par définition proportionnel à Re_t . On est alors en présence d'une flamme turbulente qu'on pourrait appelé pseudo-laminaire. Les fluctuations turbulentes sont très fortes mais à très petite échelle et elles produisent une flamme de diffusion qui ne fluctue presque pas, avec de larges zones de diffusion-convection qui entourent une zone de réaction, comme dans la situation d'une flamme laminaire usuelle.

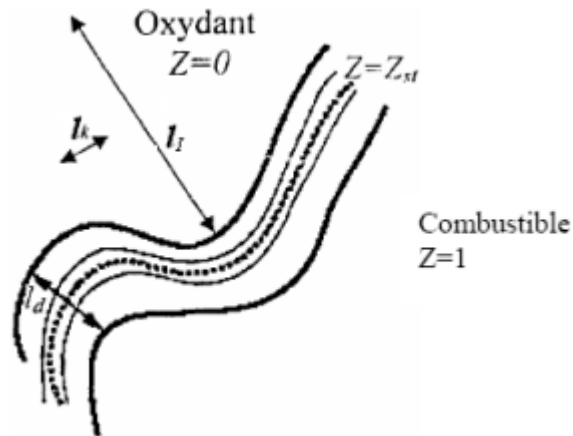
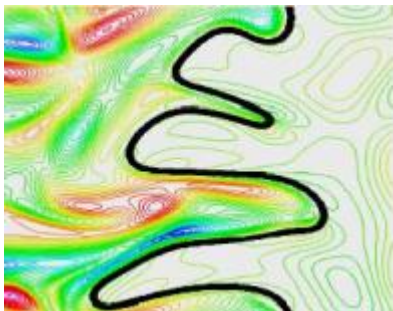


Fig. II.11 Echelle d'une flamme turbulente non prémélangée [39].



a. flamme plissée.



b. flamme épaisse.

Fig. II.12 Simulation numérique directe de l'interaction flamme/turbulence [40].

II.6.2 Le mélange stœchiométrique

D'une façon générale, la formation du mélange consiste à mettre en contact le combustible et le comburant sous des formes propices à l'initialisation et à la propagation de la combustion ainsi qu'à l'évacuation des produits de la réaction.

Le mélange homogène à la stœchiométrie, entre le combustible et le comburant (généralement de l'air) constitue le cas idéal pour une combustion complète.

A titre d'exemple nous allons dans notre cas d'application (four de cimenterie) adopter une réaction d'une étape du méthane, où une mole de méthane de formule CH_4 requiert deux moles d'exogène pour que la combustion complète soit réalisée [41] :



En substituant par les masses atomiques de chaque réactif, on définit le rapport stœchiométrique air/carburant noté encore AFR (Air/Fuel Ratio) dans la littérature anglo-saxonne ; pour le méthane, ce rapport vaut 17.4.

Pour une valeur inférieure à 17.4, c'est-à-dire plus basse que la valeur à la stœchiométrie, il y a une insuffisance en oxygène. Par ailleurs, il est utile de définir la richesse Φ du mélange qui correspond au rapport fuel/air effectif divisé par le rapport fuel/air à la stœchiométrie, tandis que $\Phi < 1$ et $\Phi > 1$ désignent respectivement des mélanges pauvre et riche en carburant. En pratique, dans une chambre de combustion, ce rapport air/fuel est, d'un point de vue local, loin d'être stœchiométrique et la combustion complète reste une opération délicate voire impossible.

L'amélioration du mélange s'opère alors par différentes techniques (fonctionnement en mélange pauvre, contrôle des mouvements brassage de l'écoulement,...).

II.7 Notion sur les jets

II.7.1 Développement d'un jet turbulent en atmosphère calme (jet libre)

Avant d'aborder le problème des écoulements dans une enceinte, nous rappellerons qualitativement les caractéristiques d'un jet turbulent d'air, débouchant dans une atmosphère infinie au repos.

La pénétration de ce jet dans l'atmosphère calme donne lieu, à sa frontière, à des échanges turbulents de quantité de mouvement.

Du point de vue aérodynamique, un noyau de forme conique ayant pour base la section de sortie de l'injecteur (injecteur cylindrique) et une hauteur L_C égale à 5 fois le diamètre "d" de la dite section constitue un domaine où le fluide conserve sa vitesse initiale u_0 .

La longueur du cône potentiel est approximée entre autre par la relation suivante :

$$L_C/d = 4 \text{ à } 5 \text{ pour } M < 1 \text{ et } L_C/d = 3.45(1 + 0.38M^2) \text{ pour } M > 1 \quad (II.2)$$

M : Nombre de Mach

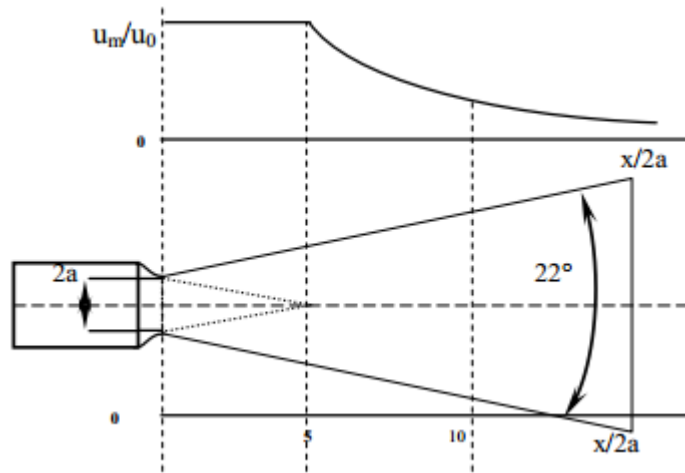


Fig. II.13 Développement d'un jet libre [38].

A la périphérie du jet l'atmosphère ambiante est entraînée dans le jet par frottement turbulent. Cet apport de matière nourrit le jet dont la frontière extérieure présente une forme conique. L'expérience montre que l'angle d'ouverture de ce cône est constant et égale à 22° pour les jets gaz-gaz, figure II.14.

Toutes les vitesses axiales sont inférieures à la vitesse initiale telles que :

$$\frac{u_m}{u_0} = A \frac{2a}{x} \quad (II.3)$$

Et dans le plan transversal et fonction de la vitesse axiale nous avons :

$$\frac{u_m}{u_0} = \exp(-b \left(\frac{r}{x}\right)) \quad (II.4)$$

Avec : u_r : La vitesse à la distance "r" de

L'axe

u_m : La vitesse sur l'axe

A, b : constantes

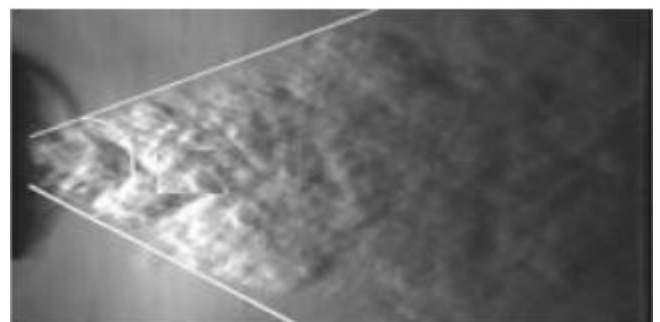


Fig. II.14 Angle d'ouverture du jet libre observé par Strioscopie [42].

C'est après une distance de 10 fois le diamètre de la tuyère que l'écoulement du jet soit établi.

II.7.2 Ecoulement d'un jet horizontal dans une enceinte confinée

Après ce bref rappel des propriétés essentielles sur les jets libre et coaxiaux, considérons le cas d'une chambre de section circulaire où circule un fluide.

Dans la section d'entrée est placé un injecteur par lequel débouche le même fluide. Cette configuration correspond à celle d'un four de cimenterie sauf que les parois sont fixes.

On appelle fluide primaire le fluide traversant l'injecteur, et fluide secondaire celui qui alimente à l'entrée la section totale de la veine expérimentale. Si on maintient la vitesse primaire constante (ce qui revient au même pour une géométrie donnée, le débit primaire q_0) en faisant le débit secondaire q_a , on constate que pour un débit inférieur à une valeur critique q_c , il apparaît une zone tourbillonnaire entre la frontière du jet et la paroi, figure II.15.b.

L'étendue de ce tourbillon augmente au fur et à mesure que le débit secondaire diminue, en montant vers l'entrée de la veine d'essai. Le débit critique relatif $\frac{q_c}{q_0}$ d'apparition des tourbillons est d'autant plus grand que le diamètre de l'injecteur (bruleur) est plus petit, pour un diamètre de veine (diamètre du four) donné.

Dans la zone où le mélange a lieu sans tourbillons. Comme le montre la courbe de la vitesse se présentée en figure II.15-a. On distingue trois parties essentielles [38] :

- La zone 1 est caractérisé par un maximum de vitesse sur l'axe, un gradient élevé des vitesses dans la partie moyenne, puis un raccordement à la limite du jet vers la région 2 ;
- Un palier à vitesse constante en zone 2 correspond à la région non perturbée de l'écoulement ;
- La couche limite présente un gradient élevé de vitesses au voisinage de la paroi.

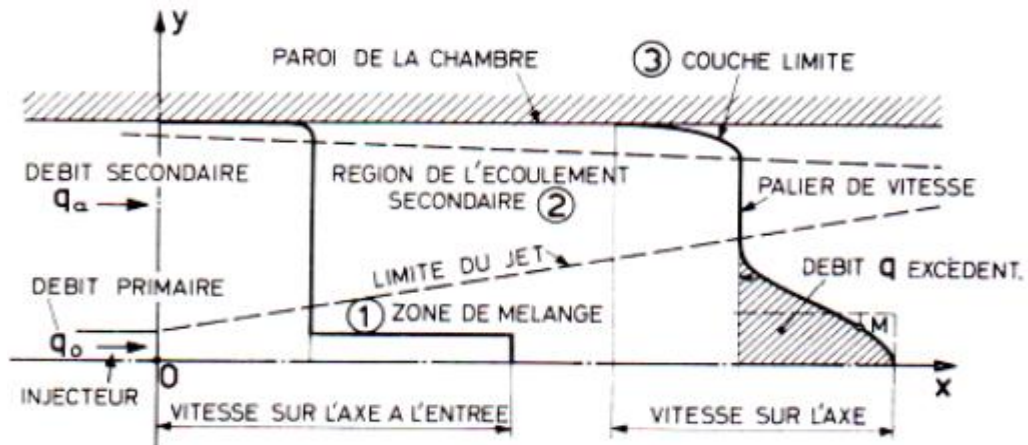


Fig. II.15-a Evolution du profil de vitesse des écoulements primaire et secondaire [38].

Effet du confinement sur le rattachement à la paroi et sur la zone recirculée :

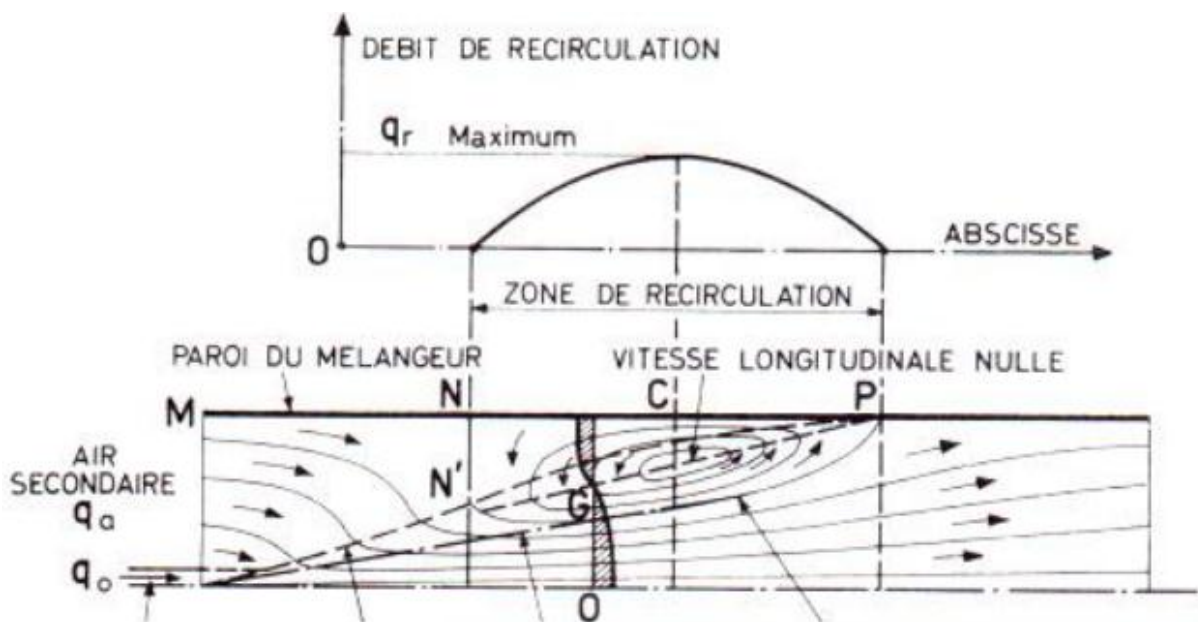


Fig. II.15-b Schéma théorique de l'écoulement et zone de recirculation [38].

La figure II.15-b correspond au cas où le four est alimenté en air secondaire à travers toute sa façade avant.

Le brûleur fournit un seul jet central à grande vitesse. La vitesse de l'air secondaire étant faible, sa quantité de mouvement sera négligeable.

Une première région de l'écoulement correspondra à l'établissement du profil de vitesse de Gauss dans le jet et au mélange avec l'air frais extérieur.

Une seconde zone correspond au développement du jet et au mélange entre l'air secondaire et les produits de combustion recyclés ; ce mélange servant à alimenter le jet. Enfin on retrouve une troisième zone dans laquelle on obtient le maximum de débit recirculé, puis un accroissement de la pression statique. Enfin une quatrième zone où éventuellement il y a un écoulement à basse vitesse axiale [38].

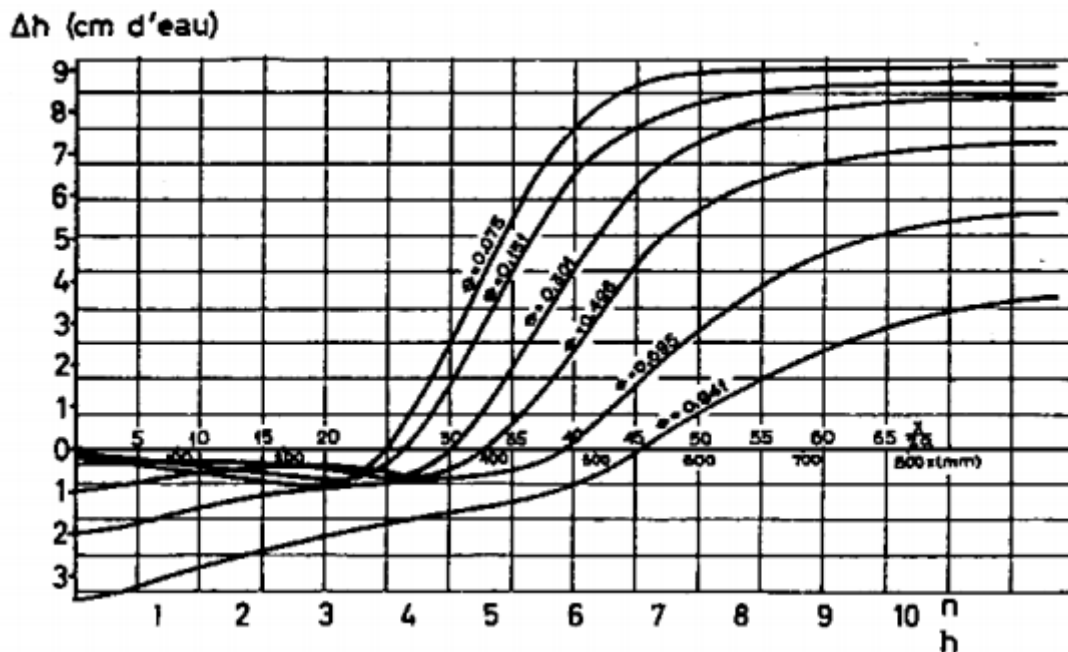
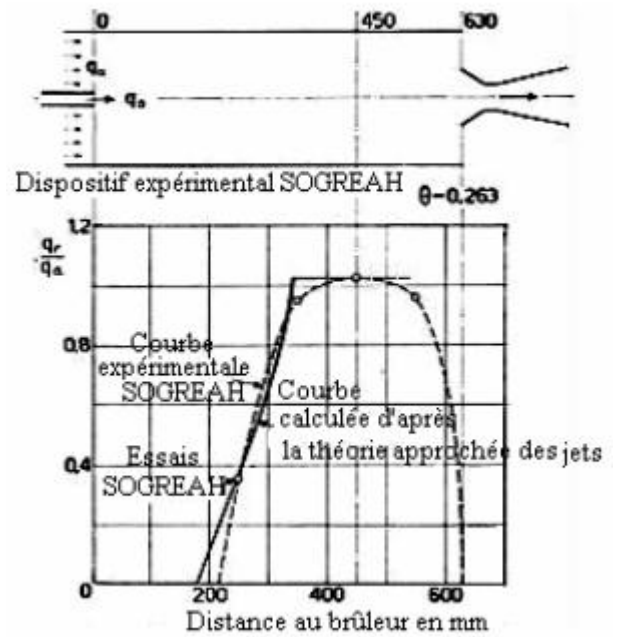


Fig. II.16 variation de la pression statique à la paroi pour les valeurs de $\theta = 0.075, 0.151, 0.301, 0.895$ et 0.941 [43].

Les résultats obtenus par SOGREAH (Société Grenobloise de Recherches Aérodynamiques et Hydrauliques) sur modèle froid avec alimentation uniforme de la face amont de la chambre ont été comparés à la théorie par Curtet [38].

Cette comparaison est donnée par la figure II.16, et concerne l'évolution du débit recirculé en fonction de la distance à l'injecteur. On constate que la branche ascendante expérimentale se situe voisine de la courbe théorique : la valeur calculée du débit maximal est bien conforme à la valeur expérimentale.

Fig. II.17 Variation du débit de recirculation en fonction de la distance au brûleur. Comparaison des essais SOGREAH à la théorie approchée des jets pour $\theta= 0.263$ [43].



Par ailleurs, la figure II.17 compare avec la théorie de Craya-Curtet [38] les valeurs des débits recirculés obtenus expérimentalement avec différentes configurations pour l'alimentation en air primaire et en air secondaire, sur modèle froid et sur four.

On constate que les résultats expérimentaux se regroupent pour "m" supérieur à 4, sensiblement autour d'une droite d'équation ;

$$\frac{q_r}{q_0+q_a} = 0.430(\sqrt{m} - 1.65) \tag{II.5}$$

Avec :

$$m + \frac{1}{2} = \frac{G_0}{G} + \frac{G_a}{G} - \frac{1}{2} \frac{G_0}{G} \frac{h^2}{h^2-a^2} \tag{II.6}$$

m : paramètre de similitude ; et $\theta = \frac{a}{h}$

Quantité de mouvement primaire

$$G_0 = \rho u_0^2 \pi a^2 = \rho \frac{q_0^2}{\pi a^2} \tag{II.7}$$

Quantité de mouvement secondaire

$$G_a = \rho u_a^2 \pi (h^2 - a^2) = \rho \frac{q_a^2}{\pi (h^2 - a^2)} \tag{II.8}$$

Quantité de mouvement après mélange

$$G = \rho u^2 \pi h^2 = \rho \frac{(q_0 + q_a)^2}{\pi h^2} \quad (\text{II.9})$$

Si on augmente encore la valeur de m (par exemple en faisant varier la dimension de l'orifice de l'injecteur) on constate que la longueur du four peut intervenir sur la valeur de q_r (point extrême de la figure II.17).

Ceci veut dire que, dans une chambre courte, le noyau de recirculation n'ayant pu se développer librement, se trouve tronqué vers l'aval, et par suite les débits de recirculation sont diminués.

L'expérience montre que, en pratique, l'abscisse à laquelle a lieu le maximum de recirculation se rapproche vers l'amont quand θ diminue, mais reste sensiblement comprise entre 3.5 et 4 fois le rayon de la chambre. Cette valeur est plus élevée que celle donnée par la théorie de Craya-Curtet, elle varie peu, soit x/h compris entre 2.7 et 3 pour " m " variant entre 10 et 100. [38]

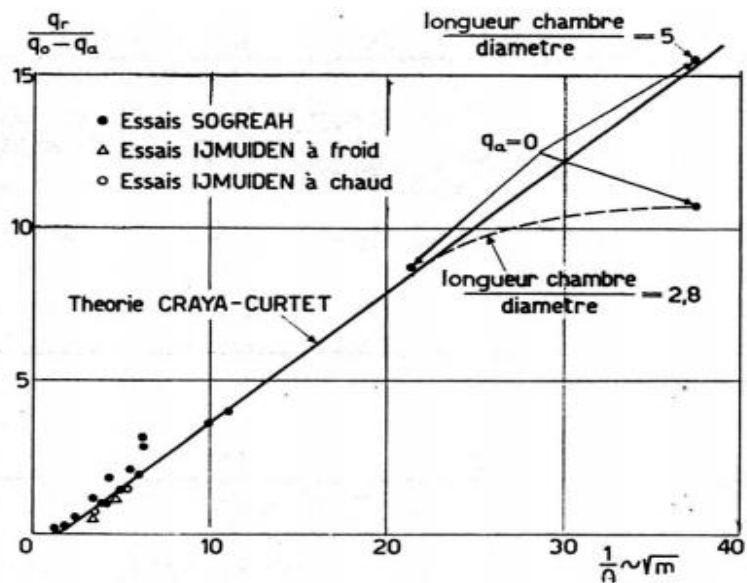


Fig. II.18 Evolution du débit maximal recirculé [43].

II.7.3 Fluctuations instantanées de l'écoulement

Les lignes de courants dessinées sur la figure II.15-b représentent les lignes de courants moyennes sur un temps relativement long (de l'ordre de la minute).

A une échelle de temps beaucoup plus faible (de l'ordre de 1/10 ou 1/20 de seconde), apparaît en réalité une famille de tourbillons.

Les clichés de la figure II.18 pris au 1/20 de seconde, montrent que la recirculation s'effectue sous la forme d'un ensemble de tourbillons élémentaires disposés alternativement autour du jet.

Le long de la paroi par contre, un courant de retour s'établit de façon permanente. Dans le cas $\theta = 0.075$, les lignes reviennent jusqu'à la section d'abscisse zéro ($q_a=0$, correspondant au décrochement brusque).

L'intensité de turbulence est analogue à celle mesurée dans un jet libre (intensité de turbulence supérieure de 10% à 15% pour le jet confiné), en amont du noyau de recirculation. Au delà, l'intensité de turbulence augmente considérablement et croît rapidement jusqu'à 80%.

Ses résultats ont montré par ailleurs qu'au voisinage du point de vitesse nulle amont, la recirculation s'effectue par bouffées de fluide recirculée qui vient se mélanger au fluide ambiant peu turbulent, avec une périodicité de l'ordre de quelques cycles par seconde.

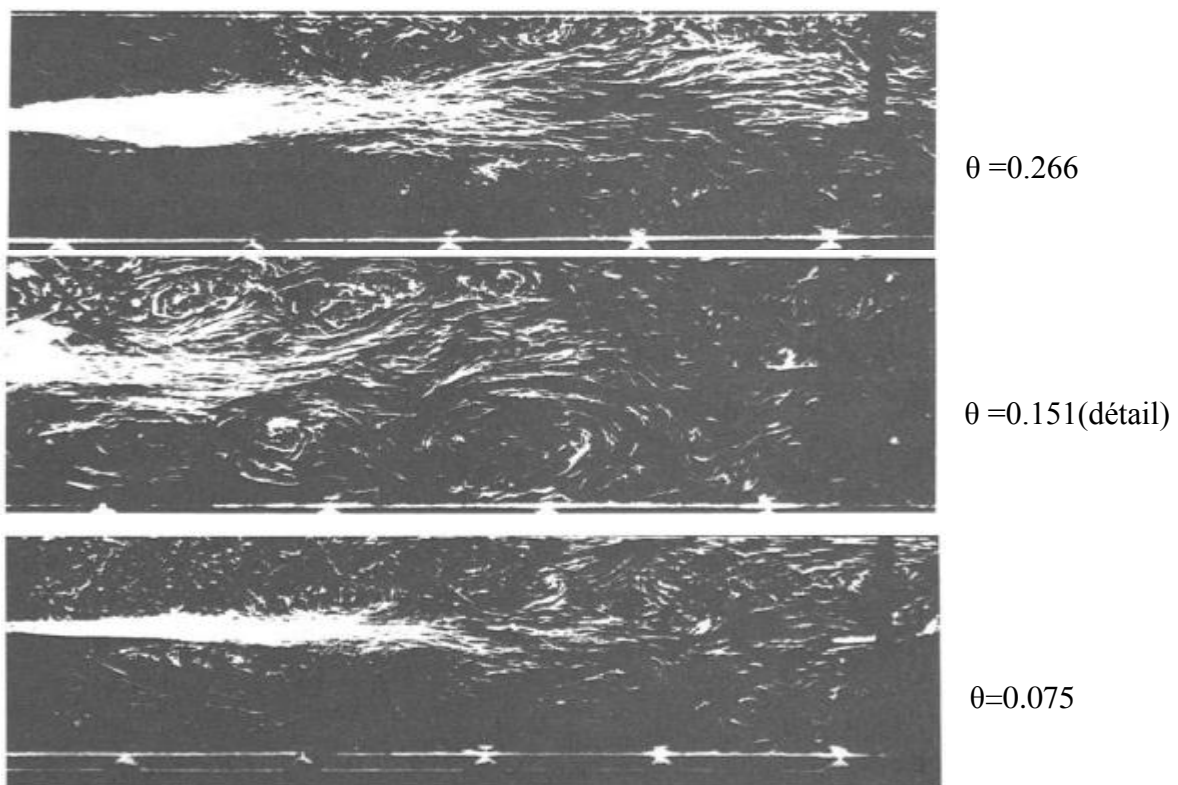


Fig. II.19 Schéma réel des écoulements froids avec différentes valeurs de θ [43].

II.8 Notion sur les échelles de turbulence

Lorsque le nombre de Reynolds d'un écoulement augmente, celui-ci développe des instabilités dont le résultat ultime est la turbulence.

On peut dire aussi que la turbulence apparaît lorsque la source d'énergie qui met le fluide en mouvement est intense devant les effets visqueux que le fluide oppose pour se déplacer.

L'importance relative des termes visqueux (linéaires) décroît au profit des termes convectifs, non-linéaires puisque quadratiques.

Le caractère la plus remarquable de la turbulence est son imprédictibilité qui fait que, à un instant et en un point donné, il est impossible de prévoir la valeur exacte du champ de vitesse ou même de pression ou de température.

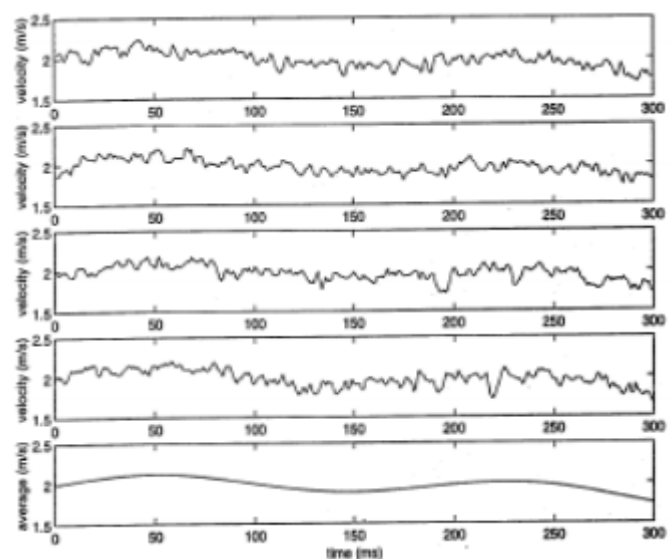
Ceci est donc bien différent du régime laminaire décrit par les équations de Navier-Stokes qui sont parfaitement déterministes et permettent donc de prévoir la solution avec précision.

Dans les cas d'un écoulement turbulent, l'importance des conditions aux limites devient telle que la moindre différence entre deux expériences a priori identiques fait que la solution sera en fait différent. La figure II.19 montre comment les enregistrements de vitesse en un point donné, différent d'une expérience à l'autre.

Fig. II.20 Enregistrement de quatre différents écoulements $U(x, t)$ [44] ;

$$U = \bar{U} + u'$$

Écoulement moyen $\bar{U}(x, t)$



Il est donc intéressant de définir la vitesse par sa valeur moyenne \bar{U} et sa partie fluctuante u' dont la moyenne temporelle sera nulle. Lorsque l'on retranche la valeur moyenne \bar{U} des enregistrements de la figure II.19 on obtient les fluctuations de u' représentée sur la figure II.21. Le problème de la turbulence consiste à comprendre et modéliser l'effet de ces fluctuations sur l'écoulement moyen.

En effet, l'allure des enregistrements de la figure II.21 laisse penser que l'écoulement est organisé en une multitude de tourbillons dont la taille maximum est pour l'instant inconnue.

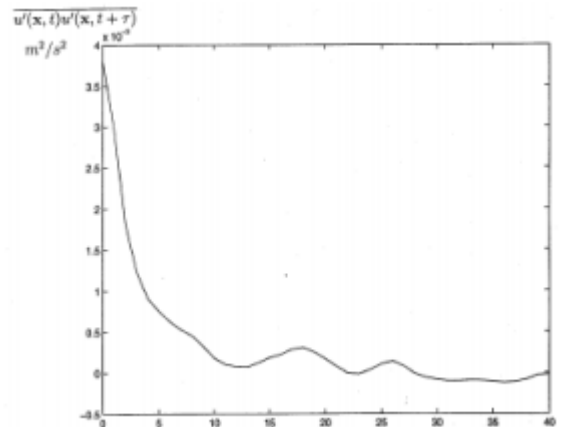
Une façon de mesurer cette taille maximum est de chercher en un point donné X_0 la corrélation qui existe entre l'enregistrement de vitesse au temps t et celui au temps $t + \tau$. Mathématiquement ceci se fait en formant la valeur moyenne :

$$\overline{u'(x_0, t)u'(x_0, t + \tau)}$$

Un exemple de résultat est montré sur la figure II.20 ou l'on voit qu'au delà de 10 ms environ, l'écoulement a été renouvelé totalement.

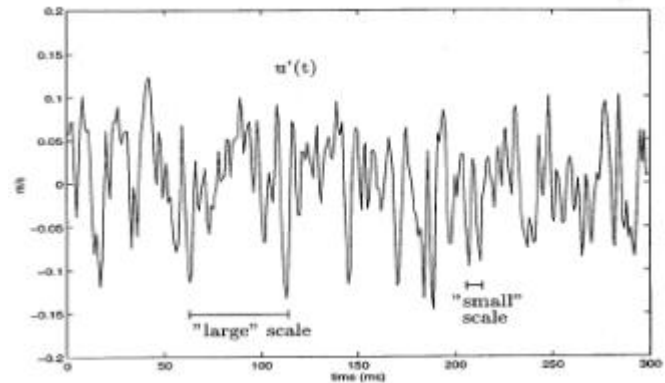
La connaissance de ce temps typique d'extinction " τ " et de la valeur moyenne \bar{U} de la vitesse, donne une idée de la taille $l = U \cdot \tau$ des plus grosses structures contenues dans l'écoulement.

Fig. II.21 corrélation temporelle des fluctuations de vitesse en fonction du retard τ en milli sec



II.8.1 Les échelles de la turbulence

Fig. II.22 Signal d'un écoulement turbulent [44].



Les grands tourbillons sont soumis à des instabilités hydrodynamiques qui les transforment en plus petites structures.

L'entretien des grandes structures se fait par l'écoulement principal.

On désigne parfois cet entretien par le nom de forçage. Le nombre de Reynolds de ces gros tourbillons est d'ailleurs grand et cela explique leur perte de stabilité.

Lorsqu'ils transfèrent leur énergie à de plus petites structures, on parle de cascade d'énergie.

Cette cascade communique de l'énergie à des échelles de plus en plus petites et le phénomène cesse lorsque la taille des dernières petites structures est devenue si faible que la consommation visqueuse l'emporte et fait disparaître toute l'énergie cédée. On rappelle que la contrainte visqueuse :

$$\tau = \mu \cdot \text{grad}U, \text{ est de l'ordre de } \tau \approx \mu \cdot \frac{U}{l} \quad (\text{II.10})$$

τ : prend de l'importance au fur et à mesure que " l " diminue.

Remarque 3 : Cette idée de l'augmentation des frottements visqueux vis-à-vis de la diminution de la taille des tourbillons, permettra d'expliquer l'érosion et la fissuration de la brique dans les endroits où il y a une intense dissipation de l'énergie cinétique.

La figure II.21 qui représente l'évolution temporelle d'une composante de vitesse turbulente laisse bien pressentir la coexistence, au sien de l'écoulement, de tourbillons de tailles diverses, couvrant une large gamme d'échelles.

On doit à Kolmogorov d'avoir proposé une loi reliant l'énergie de la turbulence à la taille des tourbillons. Définissons d'abord quelques notions :

a- Les structures cohérentes

Les structures cohérentes sont des condensations du champ de 'verticité', c'est -à-dire le rotationnel du champ de vitesse, qui confinent en leur sien la majeure partie de l'énergie et de l'exstrophie des écoulements turbulents.

Qu'est-ce qu'une structure cohérente ? Nous ne disposons pas actuellement de théorie pour caractériser celles-ci de façon précise, aussi doit-on se contenter d'une description qualitative.

Nous pouvons, en première approximation, caractériser les structures cohérentes de la façon suivante :

- Ce sont des structures tourbillonnaires, c'est-à-dire des régions de l'écoulement pour lesquelles la rotation l'emporte sur la déformation.
- Elles confinent en leur sien l'essentiel de l'énergie et de l'enstrophie de l'écoulement.
- Elles se forment spontanément par une condensation du champ de verticalité sous l'effet de la dynamique turbulente.
- Elles se rencontrent sur une large gamme d'échelles, en fait tout le long de la zone inertielle.
- Elles survivent sur des échelles de temps bien supérieures au temps moyen de retournement des tourbillons choisis par la théorie statistique comme temps caractéristique des transferts turbulents.

b- Nombre d'onde

Bien qu'on n'y ait pas accès expérimentalement, on imagine qu'il soit possible de faire une transformée de Fourier de chaque composante du champ de vitesse dans une direction donnée. A chaque longueur d'onde λ du spectre obtenu, on associe le nombre d'onde

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad (\text{II.11}) \quad k \text{ s'exprime en } (\text{m}^{-1}).$$

Un grand nombre d'onde caractérise ainsi un petit tourbillon et réciproquement.

A titre d'exemple, un écoulement turbulent dans un réacteur chimique de taille L et brassé par une hélice contiendra des échelles turbulentes dont le plus grand nombre d'onde vaudra L^{-1} (à 2π près) et dont le plus petit est pour l'instant inconnu.

c- Energie de la turbulence

Aux fluctuations turbulentes est associée une énergie cinétique turbulente. On la note k et elle vaut :

$$k = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (\text{II.12})$$

K s'exprime en J/kg et est définie en chaque point de l'écoulement.

d- Densité spectrale d'énergie

L'énergie cinétique K représente la contribution de tous les tourbillons de différentes tailles. Une analyse spectrale de type Fourier permet de spécifier la contribution énergétique de chaque échelle, selon la taille du tourbillon.

On définit ainsi la densité d'énergie $E(k)$ qui, intégrée sur toutes les longueurs d'onde doit restituer l'énergie cinétique turbulente K de l'écoulement en un point donné, soit :

$$K = \int_0^{\infty} E(k)dk \quad (\text{II.13})$$

où K s'exprime en J/Kg et donc $E(k)$ en J.m/Kg.

Comme on a l'intuition que les gros tourbillons portent plus d'énergie que les petits, on peut s'attendre en traçant $E(k)$ en fonction de k à une courbe décroissante. La figure II.23-a illustre cette distribution.

e- Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente

Cette quantité notée ε représente la vitesse de consommation (ou encore de disparition) de l'énergie turbulente. Ainsi on a :

$$\varepsilon = \frac{dK}{dt} \quad \text{en J/(kg.s) où en W/kg.} \quad (\text{II.14})$$

Si la turbulence est en "moyenne" stationnaire (c.à.d. entretenue), la quantité ε , multipliée par la masse du fluide sera égale à la puissance injectée dans l'écoulement pour le maintenir (exemple : la puissance de l'hélice dans le cas réacteur chimique cité plus haut).

Les deux idées de base qui président à la théorie de Kolmogorov sont :

✓ La densité d'énergie contenue à une échelle inférieure à l'échelle intégral (échelle d'injection de l'énergie) ne dépend que du taux $\varepsilon = \frac{dK}{dt}$ (II.15)

Avec lequel l'énergie cinétique turbulente est dissipée (et donc amenée puisqu'on suppose qu'on est en régime globalement stationnaire).

✓ La viscosité ne joue aucun rôle dans la mécanique qu'on appelle ce fait inertiel. On peut ainsi écrire : $E(k)=f(k, \varepsilon, \rho)$ (II.16)

Des considérations dimensionnelles permettent de déterminer la valeur des exposants de chaque variable. On trouve :

$$E(k)=\rho^{1/3}\varepsilon^{1/3}k^{-5/3} \quad (II.17) \text{ cette loi porte le nom de loi de Kolmogorov.}$$

La figure II.23-a ne montre pas la dépendance de E(k) avec ε et ρ. Il faudrait plusieurs expériences différentes pour voir cet effet.

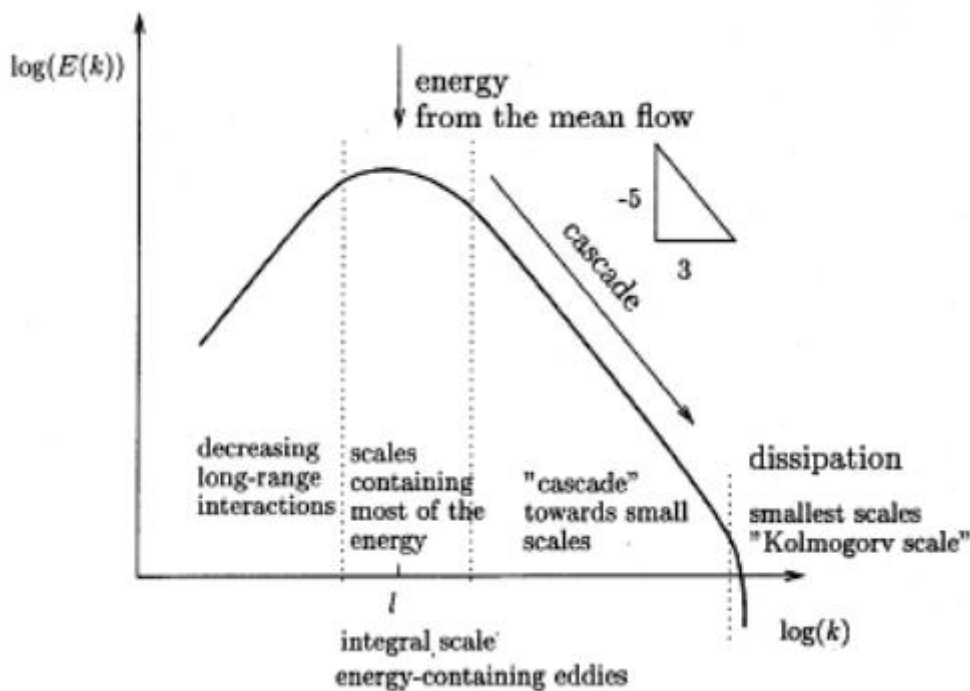


Fig. II.23.a spectre turbulent issu de mesures expérimentales [36].

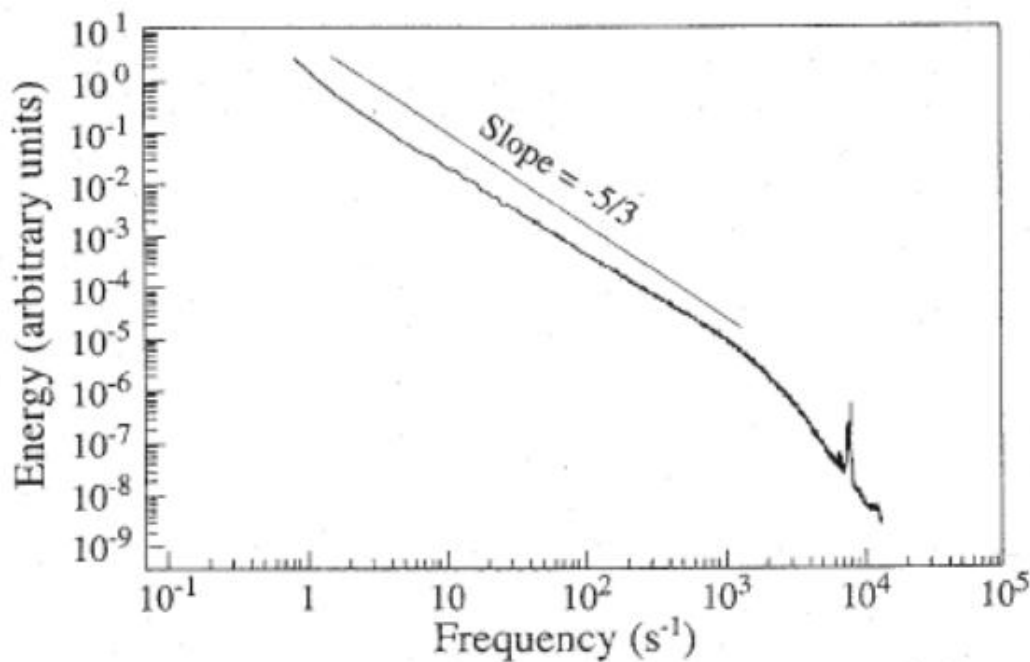


Fig. II.23.b spectre turbulent issu de mesures expérimentales [44].

II.8.2 L'échelle de Kolmogorov

On peut borner les échelles du spectre d'énergie turbulent par deux longueurs caractéristiques L_I , dite échelle intégrale et l_k dite échelle de Kolmogorov, L'échelle intégrale caractérise les plus grosses structures de l'écoulement qui sont pour les écoulements internes de l'ordre de la taille du système.

A cette échelle, le mouvement de ces structures n'est quasiment pas affecté par les effets visqueux puisque le nombre de Reynolds $Re_I = \frac{u_0 L_I}{\nu}$ (II.18) associé au mouvement turbulent à l'échelle intégrale est de l'ordre de 1000.

L'échelle de Kolmogorov quant à elle donne l'ordre de grandeur des plus petites structures tourbillonnaires existantes.

Leurs nombre de Reynolds $Re_k = \frac{u_0 l_k}{\nu}$ (II.19) associé est de l'ordre de l'unité.

Ces tourbillons sont alors dissipés par la viscosité moléculaire. Dans la figure II.23.b le spectre d'énergie cinétique turbulent rend compte de la fragmentation des grands tourbillons en de plus petits.

Ce phénomène appelé cascade de Kolmogorov, comporte un transfert d'énergie des grandes structures, qui contiennent la plus grande partie de l'énergie turbulente, vers les plus petites qui sont elles mêmes alors dissipées par effet visqueux.

L'analyse de Kolmogorov donne une estimation de l'étendue du spectre turbulent:

$$\frac{L_I}{l_k} = Re_I^{3/4} \quad (\text{II.20})$$

Cette échelle l_k doit être telle qu'elle doit dissiper par viscosité et en un seul temps de retournement, toute l'énergie cinétique turbulente qu'elle reçoit. On trouve :

$$l_k = \frac{V^{3/4} \rho^{1/4}}{\varepsilon^{1/4}} \quad (\text{II.21})$$

De plus, on montre que le nombre de Reynolds Re_k associé à l'échelle de Kolmogorov vaut :

$$Re_k = \frac{u'(k)l_k}{\nu} \approx 1 \quad (\text{II.22})$$

Ceci n'est pas surprenant et traduit le fait que l'échelle de Kolmogorov est bien à la frontière d'une zone dominée par l'inertie et d'une zone dominée par la viscosité.

NB : En remplaçant dans l'équation de l_k, ε par $\frac{\rho \cdot u'^3}{L_I}$ ou L_I désigne l'échelle caractéristique de la turbulence, on obtient :

$$l_k = L_I \cdot Re_I^{-3/4} \text{ et } Re_I = \frac{u' \cdot L_I}{\nu} \quad (\text{II.23})$$

Il ne faut pas confondre le nombre de Reynolds macroscopique Re_L et le nombre de Reynolds des grosses structures Re_I , même si :

$$Re_L = \frac{U \cdot L}{\nu} \approx Re_I = \frac{u' \cdot L}{\nu} \quad (\text{II.24})$$

Conclusion : On voit bien que la taille de l_k des plus petits tourbillons diminue quand le nombre de Reynolds augmente, la figure II.24 ci-dessous montre une expérience avec deux nombres de Reynolds [44].

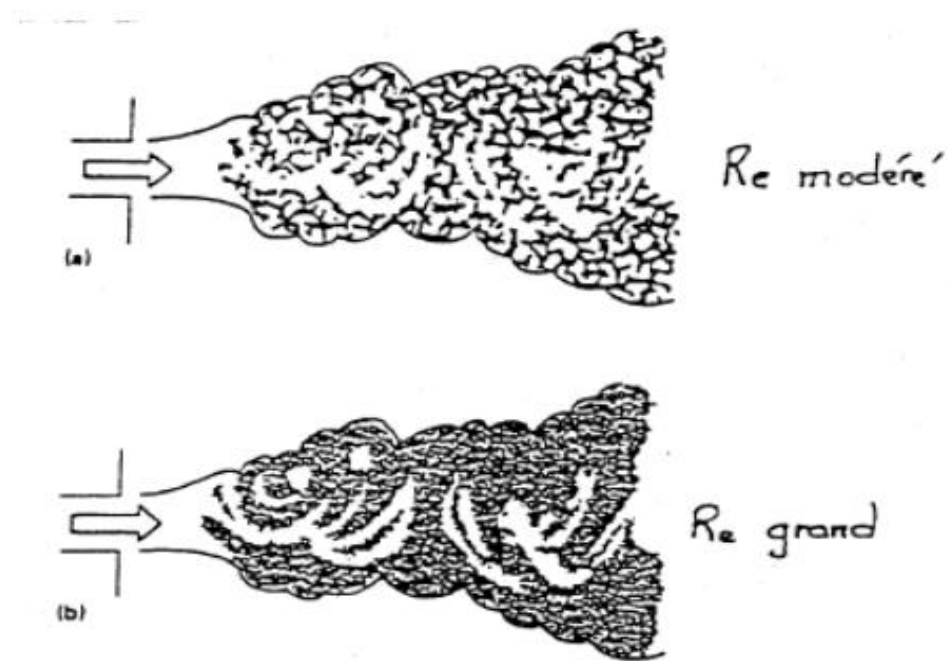


Fig. II.24 Evolution d'un jet turbulent pour deux nombres de Reynolds [44].

II.8.3 Jets excités

Certaines conditions d'excitations (pulsation, excitation acoustique ...) favorisent la pénétration du jet. En outre, un accroissement du taux d'ouverture associé à une formation plus importante des structures de vorticité est observé.

La conséquence directe de cette optimisation est une amélioration du processus de mélange.

La figure II.25 présente des visualisations issues des expériences de M'Closkey et al. [41] d'un jet transverse pulsé.

Ils observent des différences très distinctes sur la pénétration et le taux d'ouverture de jet pour une excitation proche des sous-harmoniques de la fréquence naturelle (ou caractéristique) f_n d'enroulement de la couche cisailée (figure II.25-a).

Le jet n'est pas pulsé tandis qu'en figure II.25-(b & c), les sous-harmoniques de la pulsation sont respectivement de l'ordre de un tiers (85Hz) et un demi (110Hz) de f_n .

La formation des anneaux de vorticité est elle aussi clairement mise en évidence lorsque la fréquence d'excitation baisse. Schuller et al. [41] imposent une excitation inférieure à l'excitation

caractéristique (7.1Hz) d'enroulement de la couche cisillée et montrent une meilleure pénétration du jet ainsi qu'un taux d'ouverture du jet plus grand.

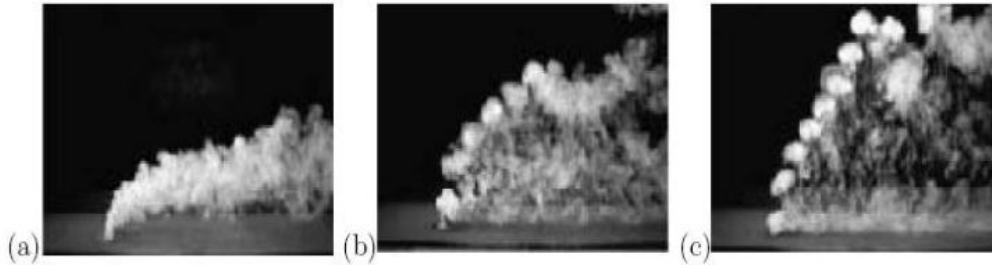


Fig. II.25 Expériences de M'Closky et Al. Des jets transverses excités ($R=2.58$, $U_1=1.2$ m/s ; avec R : rapport des vitesses et U_1 : vitesse d'injection du jet). (a) : jet non forcé (fréquence naturelle de 220Hz), (b) : excitation à 85Hz, (c) : excitation à 110Hz. [41]

La figure II.25-b montre la relation de « S_t » en fonction du régime d'écoulement. En définissant le nombre de Strouhal.

$$S_t = \frac{\omega d}{2\pi U} \quad (\text{II.25})$$

La pulsation du détachement tourbillonnaire « ω » est adimensionnée par rapport au temps d'advection du fluide le long de la structure.

L'action de sillage proche sur la structure est habituellement considérée comme une portance fluctuante. Une conséquence directe du processus VIV (vortex induced vibration) se manifeste quand les échelles de temps caractéristiques du fluide et de la structure sont du même ordre de grandeur [45].

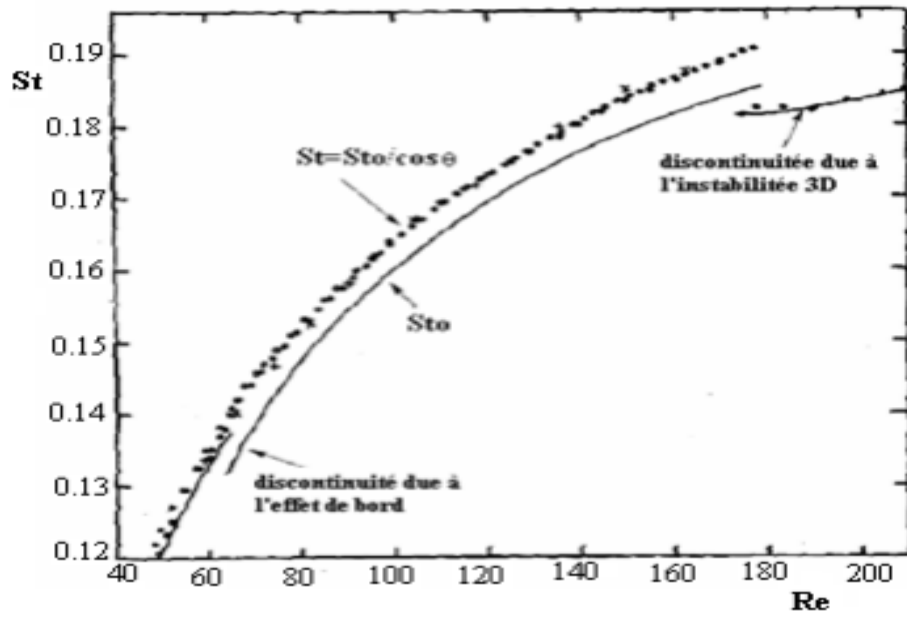


Fig. II.26 .Evolution du nombre de Strouhal en fonction de Reynolds d'un sillage créer par un Corp. non profilé $S_t = f(Re)$ [40].

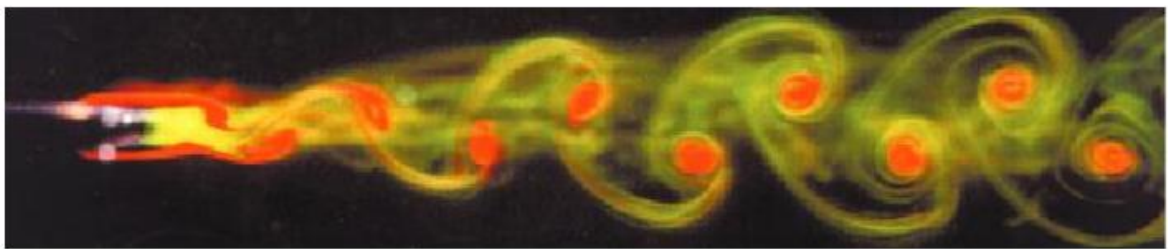


Fig. II.27 sillage créer par un corps non profilé ; un véritable oscillateur d'écoulement [40].

Chapitre III

Analyse chimique des gaz de combustion

III. 1 Introduction

Les Phénomènes de combustion se composent de nombreux processus physiques et chimiques qui présentent un large spectre d'échelles de longueurs et de temps à déterminer.

Une description mathématique de la combustion n'est toujours triviale, bien que certaines solutions analytiques des situations simples des flammes laminaires existent. Ces modèles analytiques sont généralement limités à des problèmes de zéro ou une dimension de l'espace [9].

La combustion est aujourd'hui un des principaux moyens de conversion de l'énergie. Elle est utilisée dans de nombreux systèmes pratiques aussi bien pour produire de l'énergie thermique (chaudières ou fours domestiques et industriels) ou de l'électricité (centrales thermiques), que pour le transport (moteurs automobiles et aéronautiques, moteurs fusée,...) ou encore la destruction de déchets (incinérateurs).

La combustion peut être caractérisée comme une (ou des) réaction(s) irréversible(s) fortement exothermique(s) entre un combustible (ou réducteur) et un comburant (ou oxydant) selon le schéma global [11] :



III.2 L'air atmosphérique

La composition chimique de l'atmosphère comprend pour l'essentiel, de l'azote (78.09%), de l'oxygène (20.95%), des gaz rares (Argon, Néon, Hélium...) et dans les basses couches, de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone.

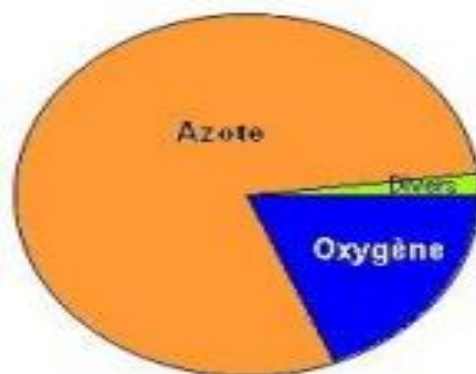


Fig. III.1 Pourcentage des éléments de l'air atmosphérique.

III.3 Constituants de l'air atmosphérique

Les constituants de l'air atmosphérique peuvent être classés en deux catégories [46] :

- Les constituants comme, l'azote, les gaz rares; dont la concentration est constante, tout au moins dans les basses couches de l'atmosphère.
- Les constituants dont la teneur varie dans l'atmosphère, comme le dioxyde de carbone et surtout la vapeur d'eau.

L'ensemble des gaz, dont les proportions restent constantes, forme l'air sec considéré comme un gaz parfait.

Diazote 78,09 %	Dioxygène 20,95 %
CO ₂ 0,03 %	Argon 0,93 %
Néon 0,0018 %	Hélium 0,0005 %
Hydrogène 0,00005 %	Krypton 0,0001 %
Ozone 0,000001 %	Xénon 0,000008 %

Tableau III.1 Composition de l'air atmosphérique

La composition de l'air sec ainsi que sa masse molaire ont été, pour les besoins de la météorologie, arrêtées internationalement aux valeurs indiquées dans le tableau III.1 ci-dessous.

Le dioxyde de carbone, l'ozone et la vapeur d'eau sont des constituants pouvant subir quelques variations selon le lieu et le temps, le tableau III.2 représentant l'air atmosphérique sec au niveau de la mer.

\	Gaz	Symbole	Proportion (%)	F
1	Azote	N ₂	78,084	
2	Oxygène	O ₂	20,946	
3	Argon	Ar	0,934	
4	Dioxyde de Carbone	CO ₂	0,035	
5	Autres gaz rares	He,Xe,CO...	< 0,003	

Tableau III.2 Composition de l'air atmosphérique sec au niveau de la mer.

III.4 Le gaz de ville

Le gaz de ville est un gaz manufacturé. Cela signifie qu'il est fabriqué dans une usine à gaz, soit par distillation de houille, soit par craquage thermique de produits pétroliers.

Découvert aux alentours de 1800, le gaz de ville doit son nom au fait qu'il servait à l'origine à l'éclairage des rues et qu'il était distribué essentiellement dans les villes via un réseau local de canalisations [47].

Le gaz de ville est donc un combustible fiable. Il constitue aujourd'hui l'une des sources d'énergies les plus utilisées au monde. Il est aussi plus propre et plus sûr.

Composé chimique majoritaire est méthane CH₄, caractéristique olfactive le gaz de ville est rendu odorant par l'ajout de "THT"

- T°C ébullition / liquéfaction -160°C
- Densité phase gazeuse plus léger que l'air
- Pouvoir calorifique inférieur (=PCI) (= énergie dégagée par la combustion d'1kg de gaz) est de 13.8 kWh/kg (49,6 MJ/kg)
- Dégagement de CO₂ à la combustion 205 gCO₂/kWh (PCI)

III.5 Formation des oxydes d'azote

Le terme oxydes d'azote [48], désigné par NO_x , regroupe le monoxyde d'azote (NO), le dioxyde d'azote (NO_2) et le protoxyde d'azote (N_2O) formés au cours des réactions de combustion.

Dans les conditions de fonctionnement industrielles, le NO est généralement l'espèce majoritaire, le N_2O étant émis en quantités infimes et le NO_2 étant un intermédiaire, formé à partir du NO et rapidement réduit en celui-ci.

Les mécanismes significatifs en termes de pollution industrielle sont donc ceux qui conduisent à la formation du NO . On en distingue actuellement cinq ; le mécanisme du NO thermique (ou mécanisme de Zeldovich), le mécanisme du NO précoce (ou mécanisme du Fenimore), le mécanisme du N_2O intermédiaire, celui du NNH et enfin le mécanisme du NO de la combustion [49].

Ce dernier impliquant l'azote lié chimiquement dans la molécule de combustible, il concerne donc principalement les combustibles liquides et solides et n'est pas significatif dans le cas de la combustion du gaz naturel qui ne contient pas généralement d'azote lié.

Seuls les deux premiers mécanismes sont donc décrits dans les paragraphes qui suivent.

Le principal défi dans le calcul de la production de NO_x dans le cas des flammes diffusion réside dans la difficulté de trouver un mécanisme valable pour la diversité des richesses (ou d'excès d'air) rencontrées dans les différentes zones de flammes [50].

Tomeczek et Gardo [51] ont récemment proposé une combinaison de quatre mécanismes décrits ci-après avec une adaptation des constantes de vitesse permettant de manière satisfaisante la production de NO dans les flammes industrielles de méthane-air. Ce modèle n'est toutefois pas encore implémenté dans les codes commerciaux.

III.5.1 Mécanisme du NO thermique

Élaboré par Zeldovich en 1947 [52], le premier mécanisme de formation du NO comprend la réaction suivante :





Ce mécanisme est désigné dans la littérature sous le nom de "mécanisme de Zeldovich simplifié". Dans les années 1970, une troisième réaction a été ajoutée au mécanisme original, particulièrement dans les conditions près de la stœchiométrie et les mélanges riches :



Conduisant aussi au mécanisme de Zeldovich étendu.

L'ensemble des auteurs utilise les constantes de vitesse k_i déterminées par Hanson et Salimian (reprises par exemple de [53]) pour les réactions (III.1),...(III.3), pour calculer la vitesse de formation nette de NO s'exprime par :

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1[N_2][O] \frac{\left(1 - \frac{k_{-1}k_{-2}[NO]^2}{k_1[N_2]k_2[O_2]}\right)}{\left(1 + \frac{k_{-1}[NO]}{k_2[O_2]}\right)} \quad (\text{III.4})$$

Où $\frac{d[NO]}{dt}$ est exprimé en mol/ (m³s), par exemple. Si on pose l'hypothèse supplémentaire que la concentration en NO reste suffisamment faible pour négliger sa vitesse de destruction par rapport à vitesse de formation (ce qui est généralement le cas), l'équation (III.4) se simplifie alors en :

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1[N_2][O] \quad (\text{III.5})$$

Où

$$K_1 = 1,8 \times 10^8 e^{-38370/T} (\text{m}^3/\text{mol.s}) \quad (\text{III.6})$$

Et où les concentrations sont exprimées en mol/m³.

Dans l'équation (III.3) la concentration en [O] est nécessaire pour déterminer la vitesse de formation du NO. L'hypothèse de l'équilibre partiel du radical [O] permet d'aboutir à sa concentration molaire par le biais de la réaction du troisième corps :



D'où :

$$[O] = 36,64T^{1/2} [O_2]^{1/2} e^{-27123/T} \quad \text{gmol/m}^3 \quad (\text{III.8})$$

Ce qui conduit généralement à une concentration partielle plus élevée en atome d'Oxygène.

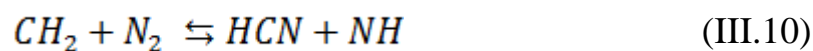
On désigne le NO formé par ce mécanisme par l'expression "NO thermique" en raison de la dépendance importante de la vitesse de formation du NO à la température.

Celle-ci est due à la température d'activation très élevée de la réaction (III.1) (38000 K), ceci rend la formation de NO par ce mécanisme significatif lorsque la température du milieu dépasse 1800 K [54,55], ce qui en fait le mécanisme le prédominant dans les fours de procédés industriels à haute température, tels que les fours de cimenteries.

III.5.2 Mécanisme du NO précoce

En 1970, Fenimore [56] découvre un nouveau mécanisme, qui conduit à une formation plus rapide de NO que le mécanisme de Zeldovich, qu'il baptise mécanisme du NO précoce ou prompt NO, ce dernier est lié à la présence de radicaux CH_i résultant de la décomposition de la molécule de combustible dans la zone d'oxydation de la flamme [57].

Ces radicaux sont capables de briser la liaison de la molécule d'azote par des réactions caractérisées par des températures d'activation moins élevées que celle de la réaction (III.1) et donc plus rapides ; parmi celles-ci, les principales sont :



Les radicaux HCN et N sont ensuite transformés en NO par les réactions suivantes :





et



La formation du NO précoce augmente lorsque la concentration en radicaux CH_i augmente, c'est-à-dire lorsque l'excès d'air diminue ; elle passe par un maximum puis diminue lorsque l'excès d'air diminue encore, en raison d'un manque d'oxygène nécessaire pour les réactions (III.12) et (III.13).

Miller et Bowman [58] ont montrés que pour un défaut d'air de 17% et au-delà, ce schéma réactionnel cesse d'être rapide et que le NO formé est reconverti en HCN . En outre, les réactions du mécanisme de Zeldovich, en compétition avec celle de Fenimore, détruisent le NO formé (via $N + NO \rightarrow N_2 + O$, d'après [58]).

L'ensemble de ces voies réactionnelles forme donc un mécanisme très complexe. On considère toutefois généralement que la contribution du NO précoce au NO formé au total est significative surtout dans les flammes riches dans la température reste suffisamment faible pour que le mécanisme de Zeldovich ne soit pas prédominant.

C'est le cas notamment des brûleurs prémélangés à combustion de surface, des brûleurs à combustion étagée et des turbines à gaz par exemple [54,57]. La contribution du NO précoce dans les installations de combustion stationnaire classique (c'est-à-dire sans technique particulière de réduction des émissions de NO thermique) reste négligeable [57].

Le calcul de la formation du NO par ce mécanisme nécessite de disposer de concentrations en radicaux CH_i notamment. Généralement, celles-ci sont obtenues par des modèles semi-empiriques qui les relient à la fraction de carbone du combustible et à l'excès d'air global [57].

III.5.3 Calcul de la production de NO_x

Pour calculer la teneur des produits de combustion en NO_x , Fluent résout une équation de transport pour la fraction massique de NO , Y_{NO} , du même type que les équations du bilan moyen :

$$\frac{\partial \rho Y_{NO}}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j Y_{NO}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho D_{eff} \frac{\partial Y_{NO}}{\partial x_j} \right] + \omega_{NO} \quad (\text{III.14})$$

Cette équation supplémentaire est toutefois résolue en supposant connus l'écoulement et les champs des variables scalaires ; elle intervient en post-traitement du calcul de la simulation en combustion, en supposant que les teneurs en NO , très faibles par rapport aux autres espèces stables

de la combustion, n'influence pas le reste de la réaction, ni l'équilibre chimique, le terme source de l'équation de transport de Y_{NO} est calculé comme :

$$\omega_{NO} = M_{w,NO} \left(\frac{d[NO]_{th}}{dt} + \frac{d[NO]_{pr}}{dt} \right) \quad (\text{III.15})$$

Où $M_{w,NO}$ est poids moléculaire de NO et $\frac{d[NO]_{th}}{dt}$ et $\frac{d[NO]_{pr}}{dt}$ sont, respectivement, les vitesses de formation nette du NO thermique et précoce.

III.5.4 vitesses de formation du NO thermique

Le mécanisme de formation du NO thermique est décrit au paragraphe 5.1 ; la vitesse de formation nette est calculée suivant la relation (III.4), dans laquelle les constantes de vitesse sont fournies par Hanson et Salimian [53].

Si le modèle de combustion utilisé dans le calcul principal est suffisamment détaillé pour inclure les radicaux O et OH , les concentrations locales nécessaires dans la relation (III.4) sont connues. En revanche, si la réaction de combustion ne contient pas ces espèces, leur concentration est calculée à partir d'une hypothèse supplémentaire :

- Pour les radicaux O : leur concentration peut être calculée en supposant l'équilibre atteint avec O_2 : $[O] = k_p [O_2]^{1/2}$ où la constante k_p est tirée de [54] ; cependant, on observe généralement que les concentrations en radicaux O peuvent être localement significativement plus élevées que leur valeur d'équilibre, ce qui conduit à sous-estimer la concentration en NO calculée de cette manière [54]. Fluent propose donc également une expression modifiée pour k_p conduisant à des concentrations en O plus élevée, intitulée approche par équilibre partiel (Partiel Equilibrium approach).
- Pour les radicaux OH : l'approche consiste à négliger la réaction (III.3) du mécanisme thermique en partant du principe que $k_2 [O_2]_{eq} \gg k_3 [OH]_{eq}$; ceci est supposé réaliste en conditions de combustions pauvres (c'est-à-dire avec excès d'air) [40], ce qui est pratiquement notre cas.

III.6 Monoxyde de carbone

Le monoxyde de carbone CO est un gaz incolore, inodore, sans vapeur, inflammable, formant avec l'air un mélange explosif, peu soluble. Effet toxique à partir d'une concentration de volume à 0,1 % d'exposition prolongée [55].

III.6.1 Formation du monoxyde de carbone

Le mécanisme de formation du CO peut résulter [55] :

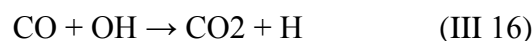
- De la combustion à faibles températures des flammes froides.
- De l'oxydation à haute température des hydrocarbures présents dans le combustible.
- De la décomposition des aldéhydes.
- De la dissociation du gaz carbonique à haute température.

III.6.2 Gaz carbonique

Le gaz carbonique CO₂ n'est pas toxique, mais en proportion élevée dans l'atmosphère risque de provoquer un effet de « serre » et donc un réchauffement de l'atmosphère terrestre avec pour conséquence une fusion des glaces polaires et de ce fait une remontée des niveaux des océans submergeant les côtes à basse altitude [56].

III.6.3 Formation du gaz carbonique

La formation du gaz CO₂ carbonique résulte de la combustion complète de tout composé carboné avec parfois l'étape intermédiaire de la formation de l'oxyde de carbone puis de sa combustion selon les deux réactions suivantes dont la seconde est très lente et ne joue aucun rôle dans le mécanisme de la formation du CO₂ [57] :



III.7 Les émissions naturelles de CO₂

Elles peuvent être d'origine volcanique ou liées aux incendies de forêt, et plus largement sont dues à la respiration animale et végétale et à celle des organismes du sol (bactéries, protozoaires, etc.). Ce CO₂ ne pose normalement pas de problème majeur de toxicité, hormis dans quelques cas très particuliers : accumulation de poche de CO₂ dans des creux, par exemple lors

d'émissions brutales de CO₂ d'origine géologique, issus d'un dégazage brutal de gaz piégé sous les sédiments de fonds de lacs africains ; dans ce cas des centaines de milliers d'animaux et des centaines d'humains peuvent mourir asphyxiés dans les vallées périphériques [58].

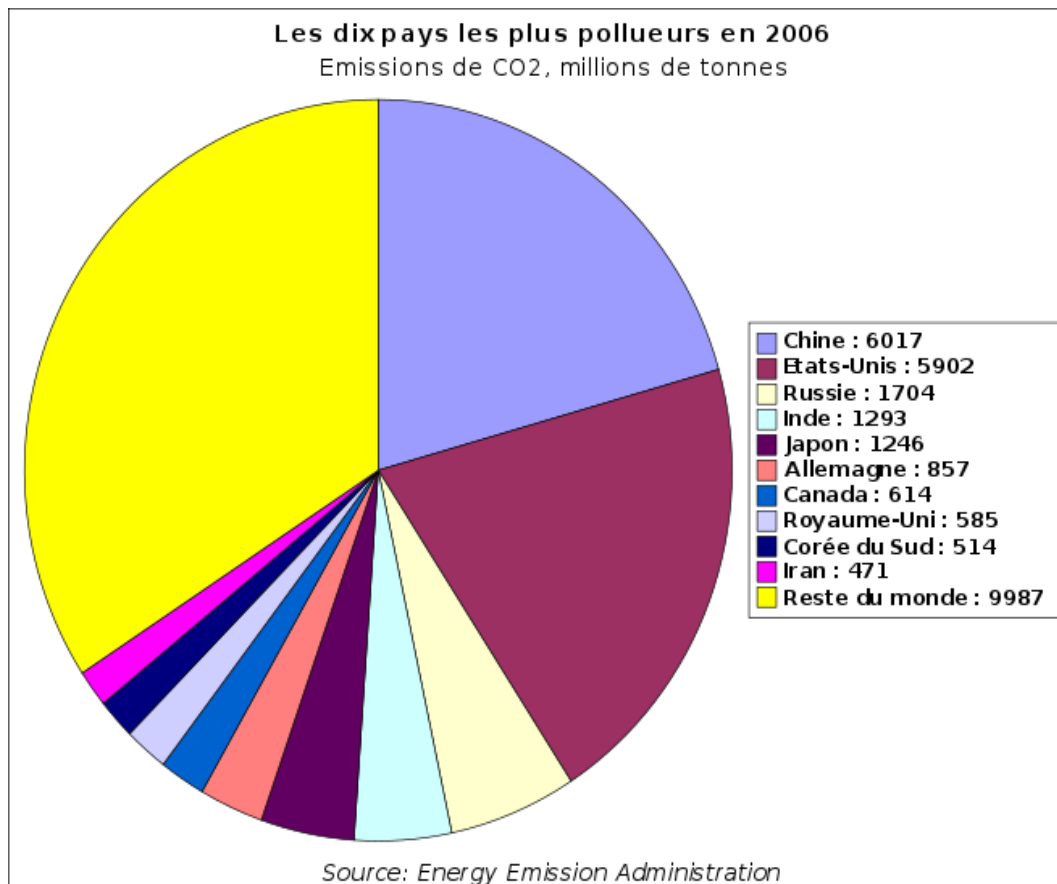


Fig. III.2 Les dix pays les plus pollueurs (2006)

CHAPITRE IV

Traitement des déchets industriels dans les fours à ciment

IV.1 Introduction

Depuis 1975, l'Union européenne a développé un système législatif très complet en matière de gestion des déchets. La directive-cadre relative aux déchets (directive 2006/12/CE) prescrit ainsi aux États membres les principes généraux qui doivent prévaloir dans les politiques nationales de gestion des déchets [59].

Ce cadre européen repose sur une hiérarchisation des modes de traitement de déchets selon laquelle la priorité doit être donnée aux actions de prévention des déchets et de réduction de leur caractère nocif ou dangereux.

L'objectif de la hiérarchisation des modes de traitement de déchets est de donner la priorité aux opérations qui présentent le moins de risque pour l'environnement et la santé humaine et permettent d'économiser des ressources naturelles. Si les États membres restent maîtres de la manière de traduire cette hiérarchie dans leur législation nationale (principe de subsidiarité), ils restent tenus de respecter ses principes.

IV.2 Types de déchets industriels

Cinq types de déchets industriels sont pris en considération [60] :

- les solvants et les huiles usagées
- les résidus de peinture et d'encre
- les boues d'épuration issues du traitement des eaux usées
- les gâteaux de filtration issus du traitement des eaux usées
- le fluff (mélange de matières textiles, de matières plastiques et d'autres matériaux)

Ces types de déchets servent à l'heure actuelle de combustibles de substitution dans les fours à ciment. mais peuvent également être traités dans des incinérateurs de déchets. Ils sont concernés par la modification de la taxe sur l'utilisation des déchets comme combustible de substitution. Ces déchets proviennent principalement d'installations industrielles et de stations d'épuration.

Chaque type de déchet se distingue des autres par la quantité d'énergie qu'il libère, l'humidité qu'il contient ou la quantité de cendres résultant de sa combustion. Les solvants et huiles usagées, par exemple, contiennent peu d'eau, brûlent aussi bien que les combustibles fossiles, et ne produisent pratiquement pas de cendres. Les boues d'épuration et les gâteaux de filtration, au contraire, contiennent encore beaucoup d'eau, libèrent peu d'énergie par tonne, et produisent des cendres en quantité.

Dans certains cas, les déchets doivent subir un traitement préalable avant de pouvoir être utilisés dans les fours à ciment, alors qu'ils peuvent être injectés dans les incinérateurs tels quels. Par exemple, il est nécessaire d'extraire l'eau contenue dans les boues d'épuration, tandis que les résidus d'encre et de peinture doivent eux être mélangés à de la sciure. Ce prétraitement a également des conséquences sur l'environnement.

IV.3 Utilisation des déchets pour produire du ciment

Le ciment est un élément de base nécessaire à la fabrication du béton et du mortier. Il se compose de calcaire et d'autres minéraux.

Tout d'abord, les matières premières sont concassées, dosées dans les bonnes proportions, mélangées, et parfois préchauffées. Elles sont ensuite portées à haute température dans un four à ciment afin d'être chimiquement transformées en clinker voir la figure V.1, ce qui nécessite beaucoup d'énergie. Enfin, les granules de matière solide qui sortent du four (appelés clinker) sont refroidis, réduits en poudre et mélangés à d'autres matériaux pour produire une fine poudre de ciment [35].



Fig. IV.1 Les fours à ciment produisent du clinker.

A l'heure actuelle, les fours à ciments sont alimentés par des combustibles fossiles et des déchets. Si l'on ajoutait une tonne de déchets supplémentaires à ce processus, la quantité totale de

ciment produit n'augmenterait pas, la tonne de déchets venant en effet simplement se substituer à une partie des combustibles fossiles et des matières premières nécessaires.

L'ajout d'une tonne de déchets modifierait légèrement l'ensemble des émissions atmosphériques ainsi que la composition du clinker, en fonction des éléments présents dans les déchets et du type de combustible fossile qu'ils remplacent. Par exemple, si les déchets contiennent moins de soufre que le combustible fossile qu'ils remplacent, les émissions de soufre dans l'atmosphère diminueront, ce qui entraînera moins de pluies acides. La production de ciment ne génère aucune émission directe dans l'eau et le sol.

IV.4 Incinération des déchets industriels

Les incinérateurs de déchets se composent d'une chambre de combustion dans laquelle les déchets sont brûlés à haute température, d'une chaudière à vapeur qui récupère, sous forme de vapeur, une partie de l'énergie contenue dans les déchets, et d'une turbine à vapeur qui transforme partiellement la vapeur en électricité. De plus, on extrait des gaz générés la poussière et les substances chimiques toxiques avant de les libérer dans l'atmosphère. Ce processus d'épuration des gaz de combustion peut parfois entraîner un rejet d'eaux usées dans les eaux de surface. Les cendres et les autres résidus solides résultant de l'incinération sont en général stockés dans des sites d'enfouissement des déchets [61].

Le type d'incinérateur le plus approprié dépend du type de déchet :

IV.4.1 Incinérateur à four rotatif

Il convient pour la plupart des types de déchets pris en considération (solvants et huiles usagées, gâteaux de filtration, et résidus de peinture et d'encre). Près d'un quart de l'énergie contenue dans ces déchets est récupérée grâce à ce système, principalement sous forme de vapeur. Son système d'épuration des gaz à l'eau provoque un rejet d'eaux usées dans les eaux de surface.

IV.4.2 Incinérateur à lit fluidisé

Il convient mieux au fluff et aux boues d'épuration. Plus d'un tiers de l'énergie contenue dans ces déchets est récupérée grâce à ce système sous forme de vapeur et d'électricité. Son système d'épuration des gaz de combustion par voie semi-humide n'entraîne aucun rejet d'eaux usées dans les eaux de surface.

Dans les deux cas, si l'on traitait une tonne de déchets supplémentaire, les émissions dans l'environnement augmenteraient en fonction des éléments présents dans les déchets. L'énergie récupérée réduirait en revanche le besoin global d'électricité et de vapeur produits par d'autres sources d'énergies, ce qui permettrait dès lors d'éviter le rejet d'une partie des émissions dans l'environnement.

IV.5 Impacts sur l'environnement

Les deux options de traitement des déchets sont comparées par le biais d'une Analyse du cycle de vie (ACV), une méthode qui prend en compte toutes les étapes du processus: du transport des déchets au traitement final des émissions avant leur libération dans l'environnement, en passant par le prétraitement des déchets et leur traitement dans les fours à ciment ou les incinérateurs.

Cette étude examine tout d'abord les émissions dans l'air, l'eau et le sol ainsi que l'utilisation des ressources naturelles pour chacune des deux options de traitement, en se basant sur la situation actuelle en Belgique. Elle évalue ensuite quel serait l'impact sur les émissions et l'utilisation des ressources si une tonne de déchets venait s'ajouter à l'un ou l'autre procédé de traitement, remplaçant de la sorte une partie des sources d'énergie (et des matières premières) qui auraient été utilisées sans cet ajout. Enfin elle quantifie les conséquences sur l'environnement – positives ou négatives – résultant de ce changement.

Les émissions et l'utilisation des ressources sont exprimées en termes d'impacts environnementaux, à savoir en termes d'effets sur : la réduction des combustibles fossiles et des matières premières ; le réchauffement climatique ; la couche d'ozone ; la santé de l'homme ; la santé des écosystèmes terrestres, marins et d'eau douce ; le smog ; les pluies acides ; et l'eutrophisation (la prolifération excessive d'algues) [58].

On considère dans cette évaluation que les émissions de CO₂ qui ne résultent pas des combustibles mais font partie du cycle du carbone ne contribuent pas au réchauffement climatique – comme le CO₂ libéré suite à la combustion de matière organique contenue dans les boues et la sciure.

IV.6 Traitement le moins nocif pour l'environnement

Pour la grande majorité des impacts environnementaux, l'étude démontre qu'il est moins nocif pour l'environnement d'utiliser les déchets industriels comme combustible de substitution pour la production de ciment que de les traiter dans des incinérateurs de déchets [59].

Pour les deux méthodes de traitement, l'utilisation d'une tonne de déchets produit une énergie qui aurait été fournie par d'autres sources sans l'ajout de cette tonne de déchets, notamment par des combustibles qui contribuent au réchauffement de la planète.

Les déchets et les combustibles fossiles contiennent une certaine quantité d'énergie (exprimée en mégajoules ou MJ). Dans le cas des fours à ciment, la combustion d'un MJ de déchets est aussi efficace que la combustion d'un MJ de combustible fossile. Par contre, les incinérateurs de déchets sont énergétiquement bien moins performants que les centrales électriques fonctionnant aux combustibles fossiles en termes de production d'électricité et de vapeur, car seule une petite partie de l'énergie est récupérée. Par conséquent, utiliser les déchets comme combustible de substitution pour la production de ciment permet d'épargner d'avantage de combustibles fossiles.

En général, brûler des déchets génère des cendres. Dans la production de ciment, ces cendres sont incorporées au produit final, remplaçant de la sorte certaines matières premières qui autrement auraient été ajoutées au produit. Dans le cas de l'incinération, on se débarrasse de ces cendres dans des sites d'enfouissement des déchets [62].

Le traitement dans un four à ciment est-il la meilleure option pour un type de déchet donné et un impact environnemental particulier?

10 catégories d'impacts sur l'environnement	5 types de déchets				
	Solvants & huiles usagées	Boues d'épuration	Gâteaux de filtration provenant du traitement des eaux usées	Résidus de peinture et d'encre	Fluff (plastiques, textiles)
Diminution des ressources	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Réchauffement climatique	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Couche d'ozone	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Santé humaine	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Écosystèmes d'eau douce	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Écosystèmes marins	Oui	Non	Oui	Oui	Non
Écosystèmes terrestres	Non	Oui	Oui	Non	Non
Smog	Oui	Oui	Oui	Non	Oui
Pluies acides	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Eutrophisation	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui

Tableau. IV Les types des déchets et celle influence sur l'environnement

En ce qui concerne les gâteaux de filtration provenant du traitement des eaux usées, leur utilisation dans les fours à ciment afin de remplacer une partie des combustibles fossiles et des matières premières pour la production de ciment constitue la meilleure option pour tous les impacts environnementaux considérés. Pour les quatre autres types de déchets industriels, le traitement dans

les fours à ciment constitue la meilleure option pour huit ou neuf des dix types d'impacts environnementaux.

Les types d'impacts environnementaux pour lesquels le traitement dans les incinérateurs de déchets est préférable dans le cas d'un ou plusieurs types de déchets sont les effets sur la santé de l'homme, les écosystèmes marins, les écosystèmes terrestres et le smog. Pour les six impacts environnementaux restants (diminution des ressources, réchauffement climatique, couche d'ozone, écosystèmes d'eau douce, pluies acides et eutrophisation), le traitement dans les fours à ciment constitue la meilleure option pour les cinq types de déchets [62].

IV.7 Conclusion

Pour la grande majorité des impacts environnementaux, l'étude démontre qu'il est moins nocif pour l'environnement d'utiliser les déchets industriels comme combustible de substitution pour la production de ciment que de les traiter dans des incinérateurs de déchets.

Qu'est-ce qui est plus important: la préservation de nos ressources en eau ou la préservation de la couche d'ozone? Il n'y a pas de réponse objective à cette question. A l'heure actuelle, le changement est l'une des priorités politiques, et pourrait potentiellement se voir accorder une plus grande importance au moment de comparer les impacts. En ce qui concerne le changement climatique et de nombreux autres impacts sur l'environnement, la présente évaluation aboutit à la conclusion suivante : l'utilisation des déchets dans la production de ciment en tant que substitut d'une partie des combustibles fossiles et des matières premières constitue la meilleure option.

Toutefois, c'est aux décideurs politiques que doit revenir la décision, subjective, de l'importance à accorder aux différentes préoccupations environnementales. Pour les experts et les décideurs politiques, les résultats pondérés (exprimés en termes monétaires artificiels) et les suppositions sous-tendant cette étude sont disponibles dans le rapport complet.

Même si les caractéristiques, les types de déchets ou les types de traitement étaient légèrement différents, ou si une autre méthode d'évaluation était utilisée, les résultats globaux resteraient valides.

Conclusion générale

La valorisation en cimenterie permet non seulement d'améliorer la gestion des matières résiduelles, mais également, la valorisation du résidu de bois (ressource renouvelable) qui permet d'économiser les combustibles principaux des cimenteries à travers le territoire national soit : le charbon, le pétrole ou le gaz naturel (ressources non renouvelables).

Les cimenteries sont donc des technologies propices au développement d'un programme de gestion qui vise à tendre vers un développement durable.

En effet, la production de ciment contribue au développement de notre société et sa fabrication aurait consommé la même quantité d'énergie, quelle que soit la forme ou la source de celle-ci.

Dans ces conditions, il est préférable que l'énergie provienne de matières résiduelles plutôt que directement d'une ressource naturelle non renouvelable.

Référence

- [1] CEMENT Huaxin ; LI YEQING ; CLOUGH Tom, L'ENVIRONNEMENT VU PAR HOLCIM EN CHINE, Ciments, bétons, plâtres, chaux A. 2010, n° 902-903, pp 48.
- [2] GARCIA-LUNA Armando, Researching and Developing, World cement A. 2008, vol. OCT, pp. 71-73.
- [3] El hachem abid, Investing to Grow, World cement A. 2008, vol. NOV, pp. 43-44.
- [4] BARRETT Al, How to reduce energy consumption, World cement A. 2002, vol. 33, n° 1, pp. 92-96.
- [5] BOLLIGER Matthias ; GALLESTEY Eduardo ; CROSLEY Gabriela ; Energy Expertise, World cement A. 2009, vol. MARS, pp 40-47.
- [6] M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, H. Bolio Sustainable cement production—present and future, Cement and Concrete Research, Volume 41, Issue 7, July 2011, pp 642–650.
- [7] Michael Taylor, Cecilia Tam and Dolf Gielen, Energy Efficiency and CO2 Emissions from the Global Cement Industry, Energy Efficiency and CO2 Emission Reduction Potentials and Policies in the Cement Industry, IEA, Paris, 4-5 September 2006.
- [8] P.E. Tsakiridis, G.D. Papadimitriou, S. Tsivilis, C. Koroneos, Utilization of steel slag for Portland cement clinker production, Journal of Hazardous Materials, Volume 152, Issue 2, pp 805–811.
- [9] KELLER Thiébaud, La valorisation énergétique des déchets par incinération, Majeure Finance, HEC, 2009.
- [10] SR Turns, An introduction to combustion, Mc Graw Hill Education (India) Edition 2012, ISBN 978-0-07-338019-3, pp 24.
- [11] Irvin Glassman, Richard A. Yetter, Nick G. Glumac, Combustion, Academic press, 2014, ISBN 978-0-12-407913-7, pp 747.
- [12] I Jacubowicz, Fours industriels, Techniques Ingénieur, 2009,
- [13] Georges Monnot La Combustion dans les fours et les chaudières, Technip, paris, 1978, ISBN 2-7108-0320-8, pp 292.
- [14] M. Crosland, The History of French Science: Recent Publications and Perspectives, French Historical Studies, JSTOR, Vol. 8, No. 1 (Spring, 1973), pp. 157-171.
- [15] P. E. HALSTEAD, The Early History of Portland Cement, Transactions of the Newcomen Society, Volume 34, 1961 - Issue 1, pp 37-54.
- [16] Mokhtar Didouche, Abdelkader, Prédiction des émissions polluantes issues d'un four industriel : Cas de la cimenterie de Chlef, thèse de magister, 2008.

- [17] David Degener, "Votre nom se mêle au sien": la première lettre connue de Stéphane Mallarmé à Sarah Helen Whitman, *Revue d'Histoire littéraire de la France*, 96e Année, No. 6 (Nov. - Dec., 1996), pp. 1166-1175.
- [18] SCHAEFER H. Studienreform in der Deutschen Medizin 1953-1959, *Medizinische Ausbildung*, 1998, vol. 15, n°1, pp. 47-50.
- [19] Ferrero Jean-François, Contribution à l'étude du frottement sec sous faible déplacement: application au four rotatif, *Travaux Universitaires - Thèse nouveau doctorat*, 1996, pp 210.
- [20] TROYANKIN YU. V., Méthode d'évaluation de l'effet économique de l'isolation thermique des éléments des fours industriels, *Promyšlennaâ ènergetika A.* 1987, n° 1, pp. 9-12.
- [21] Y. Bamberger, Quelles solutions des industriels peuvent-ils apporter aux problèmes énergétiques, *Revue de l'Énergie*, n° 575, 2007, pp 5-16.
- [22] J. Perron, R.T. Bui, Fours rotatifs, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Volume 72, Issue 1, 1994, pp 16–25.
- [23] Tanh Le Cong, Étude expérimentale et modélisation de la cinétique de combustion de combustibles gazeux, *Thèse de doctorat en Chimie - Physique*, 2007, Orléans.
- [24] BOARDMAN R. D., Pollutant formation and control, *Coal science and technology*, 1993, vol. 20, pp. 433-509.
- [25] Edmond Perthuis, *Combustion industrielle*, Technip-paris, ISBN 2-7108-0438-7, pp 215.
- [26] Toufik Boushaki, Du contrôle passif au contrôle actif : application à l'oxy-combustion dans des brûleurs à jets séparés, *Thèse de doctorat en Énergétique*, 2007, Rouen, France.
- [27] Elio Flesia, Jean-Marie Surzur, Sur l'obtention de radicaux nitroxydes a partir de divers derives halogenes et d'hydrure de tributyletain, *Tetrahedron Letters*, Volume 15, Issue 2, 1974, pp 123-126.
- [28] Vincent Bronet, Amélioration de la performance industrielle à partir d'un processus Référent, *Thèse de doctorat en Génie industriel*, 2006, France, pp 189.
- [29] Dominique Barjot, « Lafarge : l'ascension d'une multinationale à la française [1833-2005] », *Relations internationales*, 124, octobre 2005, p. 51-67. Voir aussi Léon Dubois, *Lafarge Coppée. 150 ans d'industrie*, Paris, Belfond, 1988, 324 p.
- [30] D. Barjot, « Un leadership fondé sur l'innovation, Colas : 1929-1997 », dans L. Tissot, B. Veyrassat (dir.), *Trajectoires technologiques, Marchés, Institutions. Les pays industrialisés, XIX^e-XX^e siècles*, Bern, Peter Lang, 2001, p. 273-296.
- [31] Jung-yeon Lee, *Lafarge [1946-1974]*, mémoire de maîtrise d'histoire (sous la direction de D. Barjot), Université Paris-Sorbonne (Paris IV), septembre 2004, 331 p.
- [32] Bertrand Collomb, «L'industrie européenne du ciment au XX^e siècle », *Entreprises et Histoire*, 3, 1993, p. 97-100.

- [33] D'un montant de 123 millions de dollars, dont 85,3 % couverts par des actionnaires extérieurs au groupe. Rapport d'activité sur l'année 1993.
- [34] CEMENT Huaxin ; LI YEQING ; CLOUGH Tom, L'ENVIRONNEMENT VU PAR HOLCIM EN CHINE, Ciments, bétons, plâtres, chaux A. 2010, n° 902-903, pp 48.
- [35] Environnement Agency, 1996 Etude technique et économique des procédés concernant le ciment et la chaux, Rapport britannique, The United Kingdom.
- [36] Technique d'ingénieur, article BE8045, BM2520.
- [37] R.Guenoune « Simulation numérique d'un jet coaxial turbulent avec différence de densité », Thèse de Magistère en physique, Université ELhadj Lakhdar, Batna.
- [38] G. Monnot " La combustion dans les fours et les chaudières", Publications de l'institut Français du pétrole. 1978
- [39] S. Noui " Etude numérique de la combustion des gaz dans un four de cimenterie", thèse de magistère, Faculté des sciences exactes département de physique, Université de Batna Mars 2006.
- [40] Denis Veynante, « Modélisation et simulation numérique de la combustion turbulente » www.idris.fr/docs/journal/pdf_N.3/N.3veynam.pdf
- [41] C. Prière " simulations aux grands échelles : application au jet transverse", Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Janvier 2005.
- [42] V. Faivre " Etude expérimentale et numérique du contrôle actif de jets dans des chambres de combustion", Thèse de Doctorat de L'Institut National Polytechnique de Toulouse, Décembre 2003
- [43] K. Matveev " Thermoacoustic Instabilities in the Rijke Tube: Experiments and Modeling" PhD, thesis of California Institute of technology Pasadena, California 2003
- [44] S.A.Goldenberg et V.S.Pélévine français du pétrole, avril 1958, XIII, N°04, p538-543.
- [45] M. L. Facchinetti, E. d. Langre et Boilley " Un modèle phénoménologique des vibrations induites par détachement tourbillonnaire", 16^{ème} Congrès Français de Mécanique Nice, 1-5 septembre 2003.
- [46] Pene Pierre; Masse Roland, Air extérieur, air intérieur et santé, Bulletin de l'Académie nationale de médecine A. 2009, vol. 193, n° 6, pp. 1387-1415.
- [47] Gérard Sarlos, Pierre-André Haldi, Pierre Verstraete: Systèmes énergétiques: Offre et demande d'énergie : méthodes d'analyse. PPUR presses polytechniques, 2003.
- [48] Jean-Michel Commandré, Formation des oxydes d'azote lors de la combustion de coques de pétrole dans des conditions de précalcinateur de cimenterie, Thèse, RAPSODEE - Centre de recherche d'Albi, France

- [49] Jabouille Florent, Contribution à l'étude des facteurs d'émissions des oxydes d'azote lors de l'incinération de déchets ménagers, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, Poitiers, France, 1996, pp 181.
- [50] Olivier Delabroy, Edward Haile, Denis Veynante, François Lacas, Sébastien Candel, Réduction de la production des oxydes d'azote (NOX) dans une flamme de diffusion à fioul par excitation acoustique, Revue Générale de Thermique, Volume 35, Issue 415, 1996, pp 475-489.
- [51] Nechad S. Prédiction numérique des flammes de diffusion avec le modèle d'écoulement laminaire en flammellettes, These de magister, 2011, Université Hassiba Benbouali de Chlef, pp 89.
- [52] Williams, F. A., 1985 combustion theory, Addison-Wesley.
- [53] Hanson, R. K., Salimian, S., 1984 Survey of Rate Constants in H/N/O Systems. In W. C. Gardiner, editor, Combustion Chemistry, page 361.
- [54] Fluent Inc, Fluent 6.3 User's Guide, Chapter 20, 2006 Modeling Pollutant formation, Lebanon, New Hampshire, USA.
- [55] Jiang, B., Liang, H., Huang, G., Li, X., 2006 Study on NO_x Formation in CH₄/ Air Jet Combustion, Chinese J. Chem. Eng., Vol. 14, No.6, pp.723-728.
- [56] Fenimore, C. P., 1971 Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames. In 13 th Symp. (Int'l.) on Combustion, page 373. The Combustion Institute.
- [57] pesenti, B., 2006 caractérisation numérique et expérimentale d'un brûleur à gaz à swirl variable, these de Doctorat en sciences appliquées, Polytech, MONS, Bruxelles, Belgique
- [58] Miller, J. A., Bowman, C. T., 1989 Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion. Prog. in Energy and Comb. Sci., 15:287-338.
- [59] BERTOLINI G., 1998, « La politique française de gestion des déchets depuis 1973 », In : Les politiques d'environnement. Évaluation de la première génération : 1971-1995, sous la direction de B. Barraqué et J. Theys, Paris, Recherches, pp. 171-188.
- [60] Rapport 'Inventaire National des Déchets Industriels', BC Berlin, 1995.
- [61] PREVOST H., 2000, La récupération de l'énergie issue du traitement des déchets, Conseil général des Mines-Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie.
- [62] ADEME, 2005, Déchets et territoires. De la planification à la gestion locale de tous les déchets. Le dossier du colloque, 22-23 juin, Paris.

ANNEXE

Annexe

Liste des figures

Chapitre I

Fig. I.1 Représentation générale de la combustion.....	3
Fig. I.2 Four de ‘BOUTEILLE’	5
Fig. I.3 Four à chaux de 1906	6
Fig. I.4 Four rotatif long en vois sèche.....	8
Fig. I.5 Principe de four à gueulard.....	9

Chapitre II

Fig. II.1 Usine Lafarge de Hammam Dalaa à M’sila	12
Fig. II.2 Position géographique de LAFARGE M’sila.....	15
Fig. II.3 Circuit de fabrication de ciment	16
Fig. II.4 Four rotatif.....	17
Fig. II.5 A l’intérieur du four à clinker.....	18
Fig. II.6 Un brûleur à Gaz naturel.....	19
Fig. II.8 Principe de combustion du gaz naturel.....	21
Fig. II.9 Variation du volume des gaz brûlés en fonction de PCI du gaz naturel.....	21
Fig. II.10 les différents structures d’une flamme de diffusion.....	22
Fig. II.11 Echelle d’une flamme turbulente non prémélangée	24
Fig. II.12 Simulation numérique directe de l’interaction flamme/turbulence.....	24
Fig. II.13 Développement d’un jet libre	26
Fig. II.14 Angle d’ouverture du jet libre observé par Strioscopie.....	26
Fig. II.15-a Evolution du profil de vitesse des écoulements primaire et secondaire	28
Fig. II.15-b Schéma théorique de l’écoulement et zone de recirculation.....	28
Fig. II.16 variation de la pression statique à la paroi pour les valeurs de $\theta = 0.075, 0.151, 0.301, 0.895$ et 0.941	29
Fig. II.17 Variation du débit de recirculation en fonction de la distance au brûleur	30
Fig. II.18 Evolution du débit maximal recirculée.....	31

Fig. II.19 Schéma réel des écoulements froids avec différentes valeurs de θ	32
Fig. II.20 Enregistrement de quatre différents écoulements $U(x, t)$	33
Fig. II.21 corrélation temporelle des fluctuations de vitesse en fonction du retard τ en milli sec.....	34
Fig. II.22 Signal d'un écoulement turbulent.....	35
Fig. II.23.a spectre turbulent issu de mesures expérimentales.....	38
Fig. II.23.b spectre turbulent issu de mesures expérimentales.....	39
Fig. II.24 Evolution d'un jet turbulent pour deux nombres de Reynolds.....	41
Fig. II.25 Expériences de M'Closky et Al. Des jets transverses excités ($R=2.58$, $U_1=1.2$ m/s ; avec R : rapport des vitesses et U_1 : vitesse d'injection du jet).....	42
Fig. II.26 Evolution du nombre de Strouhal en fonction de Reynolds d'un sillage créer par un Corp. non profilé $S_t = f(Re)$	43
Fig. II.27 sillage créer par un corps non profilé ; un véritable oscillateur d'écoulement.....	43

Chapitre III

Fig. III.1 pourcentage des éléments de l'air atmosphérique.....	44
Fig. III.2 Les dix pays les plus pollueurs (2006).....	53

Chapitre IV

Fig. IV.1 Les fours à ciment produisent du clinker.....	55
--	----

Liste des Tableaux

Tableau II.1 caractéristique de gaz naturel.....	20
Tableau III.1 Composition de l'air atmosphérique.....	45
Tableau III.2 Composition de l'air atmosphérique sec au niveau de la mer.....	46
Tableau. IV Les types des déchets et celle influence sur l'environnement.....	59

Résumé

L'industrie cimentière est fortement consommatrice en énergie (électrique, fossile) et génératrice de pollution et d'émissions de gaz. De fait, environ 40 % de ses coûts de production sont attribuables à cette dernière.

Les enjeux environnementaux, énergétiques et économiques sont pris en compte dans l'évaluation du potentiel de valorisation de chaque matière. En somme, la valorisation énergétique permet de réduire à la fois la quantité de matières à éliminer ainsi que les émissions de gaz à effet de serre (GES) générés notamment par les déchets enfouis qui se décomposent.

D'autre part, de prouver que l'usage de matières et combustibles alternatifs en cimenterie résulte en des réductions de polluants atmosphériques (NO_x , SO_2 , etc.).

Ce travail donne un point sur la situation existante en Algérie, et présente des filières à suivre pour l'amélioration de méthodes d'utilisation des installations de cimenterie dans l'objectif de réduire les coûts d'investissement et de protéger notre environnement. Chaque projet, pour être mené à bien, doit être conduit avec la collaboration d'experts cimentiers et les fournisseurs concernés.

ملخص

ينجم عن صناعة الاسمنت توليد انبعاثات التلوث والغازات عالية الكثافة باستخدام الطاقة (الكهربائية، الحفريّة) وفي الواقع حوالي 40٪ من تكاليف إنتاجها يمكن أن تعزى إلى هذا الأخير.

باختصار تؤخذ البيئة والطاقة والقضايا الاقتصادية بعين الاعتبار في تقييم إمكانية تطوير كل موضوع ، وكذا استعادة الطاقة بالتخلص من كمية المواد الملوثة وانبعاثات غازات الاحتباس الحراري (غازات الدفيئة) التي نجمت على وجه الخصوص من النفايات المطمورة.

علاوة على ذلك، أثبت أن استخدام المواد وأنواع الوقود البديلة في إنتاج الاسمنت في خفض ملوثات الهواء (أكسيد النيتروجين، SO_2 ، وما إلى ذلك).

هذا العمل يقدم التحديث على الوضع الراهن في الجزائر والحلول التي يتم استخدامها من أجل تحسين طرق استخدام مصانع الاسمنت وذلك بهدف الحد من تكاليف الاستثمار وحماية بيئتنا في كل مشروع والتي يتعين الاضطلاع بها، ويجب أن تتم بالتعاون خبير الأسمنت والموردين المعنية.