



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم و التكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCÉDES

N° d'ordre : M2...../GPE/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Industries pétrochimiques

Option: Génie pétrochimique

Thème

**TRAITEMENT DES EFFLUENTS GAZEUX
DE LA COLONNE C101 DU COMPLEXE CP1/Z**

Présenté par

1-DERRAR FATMA

2-DERGHAM FERRIAL

Soutenu le 07/07/ 2022 devant le jury composé de :

Président : MEKIBES Zohra MCB Université de Mostaganem.

Examineur : BENZEKRI BENALLOU Mokhtar MCA Université de Mostaganem.

Rapporteur : MAHREZ Nouria MCA Université de Mostaganem.

Année Universitaire 2021/2022

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Allah le tout puissant et miséricordieux, pour la force et la patience qui nous ont permis d'accomplir ce travail.

En second lieu, nous exprimons notre profonde reconnaissance à notre encadreur Madame NOURIA MAHREZ pour ses précieux conseils, son aide et sans qui ce mémoire n'aurait vu le jour.

Nos vifs remerciements vont aussi aux membres du jury Monsieur BENZEKRI BENALLOU et Madame MEKIBES ZOHRA pour l'intérêt porté à notre recherche, l'examen apporté et son enrichissement par vos soins.

Nos remerciements également à tous les enseignants de la faculté des sciences et de la technologie de l'université de Mostaganem, qu'ils retrouvent ici notre reconnaissance et notre respect.

Dédicaces

C'est avec toute l'ardeur de nos sentiments, fruit de notre profonde reconnaissance, que nous dédions ce modeste travail à :

- Nos parents, que Dieu les garde et les protège ;
- Celles qui nous ont imprégné de l'essence de son être, de sa générosité, de sa gentillesse et qui n'a jamais cessé d'être là pour nous : nos mères respectives ;
- Ceux qui n'ont cessé de nous encourager durant nos études : nos pères respectifs, à qui nous dédions ce travail qui est le fruit de votre patience et de votre éducation ;
- Nos frères, nos sœurs et nos amis d'étude pour leur sympathie et leur solidarité ;
-

Enfin, nous tenons à remercier nos familles « **DERRAR** » et « **DERGHAM** », qui par leurs prières, soutiens et encouragements on a pu arriver à ce stade et réaliser ce travail.

Liste des abréviations

COV	: Composés organiques volatiles
UFC 80	: Urée formaldéhyde condensé
FA	: Formaldéhyde
CO	: Monoxyde de carbone
CO ₂	: Dioxyde de carbone
CH ₃ OH	: Méthanol
H ₂ CO	: Formaldéhyde
HCOOH	: Acide formique
CH ₃ OCH ₃	: Diméthyle Ether
X _i	: Fraction molaire du constituant i
Y _i	: Fraction massique du constituant i
C _p	: Chaleur spécifique à pression constante
dT	: Variable d'intégration
pci	: Pouvoir Calorifique inferieur
C _p	: Capacité calorifique à pression constante
DME	: Diméthyle Ether
ΔH_r°	: Enthalpie standard des réactifs
ΔH_p°	: Enthalpie standard des produits
ΔH_R°	: Enthalpie standard de réaction
ΔH_f°	: Enthalpie standard de formation
ΔH_R	: Enthalpie de la réactions
ΔH_r	: Enthalpie de réactif entre les températures T _C et T ₀
ΔH_p	: Enthalpie de produit entre les températures T ₀ et T _s
Nm ³ /h	: Normo mètre cube par heure.
kcal/h	: kilo calorie par heure
K	: Kelvin

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	01
CHAPITRE.I : GENERALITES	02
I.1 Introduction.....	02
I.2 Description complexe.....	02
I.2.1Historique du complexe CPI/Z.....	02
I.2.2Activités principales.....	03
I.2.3Capacités de production.....	03
I.3 Utilisation du méthanol	04
I.3.1 Caractéristique du méthanol.....	04
I.3.2 Toxicité.....	04
I.4 Procédé de production de formaldéhyde.....	04
I.4.1 Utilisation du formaldéhyde	06
I.4.2 Effets irritants et corrosifs.....	06
I.4.3 effets allergiques.....	07
I.5 Urée.....	07
I.5.1 Description	07
I.5.2 Irritation.....	07
I.6 Impact environne tale.....	07
I.6.1 Le réglementation algérienne.....	07
I.6.2 Bilan sur la production.....	08
I.7 Technique de traitement.....	09
I.8 Définition des COVs.....	10
I.8.1 Les technologies destructive.....	10
CHAPITRE.II : PARTIE EXPERIMENTALE	13
II.1 Introduction.....	13
II.2 Problématique.....	13
II.3 Choix de la technique.....	13
II.4 Schéma de fonctionnement du système.....	13
II.5 Conditions de fonctionnement.....	15
II.5.1 Composition de la charge	15
II.5.2 Temps de séjour.....	15
II.5.3 Température de combustion	15
II.6 Etude de faisabilité technique.....	16
II.7 Modes de fonctionnement.....	17
II.8 Mode en service.....	17
II.8.1 Réaction de combustion.....	17
II.8.2 Calcul du besoin en oxygène.....	18
II.8.3 Diagramme des réaction.....	18
II.8.4 Calcul de l'enthalpie des réaction.....	19
II.8.5 Calcul de l'enthalpie des réactifs.....	20
II.8.6 Calcul de la température de sortie des gaz.....	21
II.9 L'échangeur de chaleur.....	23

II.9.1 Système de chaleur.....	23
II.10 Démarrage du système.....	24
CONCLUSION GENERALE.....	27

Résumé

Résumé :

De nos jours, complexe CP1/Z est confronté à plusieurs problèmes notamment l'émission de gaz toxique appelés les composés organiques volatiles COVs, qui à leur tour affectent considérablement l'environnement, qui légalement ne devrait pas dépasser en quantité 200 mg/Nm³.

Pour cela, notre travail concentré sur une présenter une proposition d'un système de traitement des effluents gazeux de la colonne C101, ce dernier est la source de son émission.

De ce point de vue, notre travail vise à se débarrasser de ces gaz par la combustion dans un brûleur au niveau de l'unité de production de formaldéhyde, sachant qu'il existe plusieurs autres méthodes.

Et en fonction des résultats obtenu on pourra conclure si on peut envisager d'utiliser cette méthode sans problème et nous donner de bons résultats.

Summary:

Nowadays, CP1/Z complex faces several problems including the emission of toxic gases called VOC-related organic compounds, which in turn significantly affect the environment, which legally should not exceed in quantity 200 mg/Nm³.

For this, our work focused on presenting a proposal for a gaseous effluent treatment system from the C101 column, the latter being the source of its emission.

From this point of view, our work aims to get rid of these gases by combustion in a burner at the level of the formaldehyde production unit, knowing that there are several other methods.

And depending on the results obtained we can conclude if we can consider using this method without problem and give us good results.

ملخص :

في الوقت الحاضر ، يواجه مركب CP1 / Z العديد من المشكلات بما في ذلك انبعاث الغازات السامة التي تسمى المركبات العضوية المرتبطة بالمركبات العضوية المتطايرة ، والتي بدورها تؤثر بشكل كبير على البيئة ، والتي يجب ألا تتجاوز الكمية من الناحية القانونية 200 مغ / متر مكعب عادي.

لهذا ، ركز عملنا على تقديم اقتراح لنظام معالجة النفايات الغازية من عمود C101 ، وهذا الأخير هو مصدر انبعاثه.

ومن هذا المنطلق يهدف عملنا إلى التخلص من هذه الغازات عن طريق الاحتراق في موقد على مستوى وحدة إنتاج الفورمالديهايد ، مع العلم أن هناك عدة طرق أخرى.

واعتمادًا على النتائج التي تم الحصول عليها يمكننا أن نستنتج ما إذا كان بإمكاننا التفكير في استخدام هذه الطريقة دون مشكلة وإعطائنا نتائج جيدة.

Mots clés : Traitement thermique, effluents gazeux, formaldéhyde, oxydation thermique, méthanol, combustion.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Capacite de production du complexe.....	3
Tableau I.2: Utilisations du methanol.	4
Tableau I.3 : Valeurs limites des COV.....	8
Tableau I.4 : Composition des gaz rejetes.....	9
Tableau II.1: Temperature d'ignition des COV.....	15
Tableau II.2: Consommation d'oxygene.	18
Tableau II.3: Enthalpies standards de formation.....	19
Tableau II.4 : Enthalpies de reactions	19
Tableau II.5 : Calcul de la chaleur de reaction globale.....	20
Tableau II.6 : Constantes a, b, c de la chaleur specifique.	21
Tableau II.7 : Composition des gaz traites.....	22
Tableau II.8 : Composition du gaz naturel.	25
Tableau II.9 : Besoin en oxygene lors de la combustion du gaz naturel.....	26

LISLE DES FIGURES

Figure I.1 : Plan de la ligne gaz U100.....	4
Figure I.2 : Utilisations du formaldéhyde.....	6
Figure I.3 : Schéma de système d'incinération.....	11
Figure II.1 : Schéma du système de traitement.....	14
Figure II.2 : Schéma du système de traitement.....	18
Figure II.3 : Schéma du système de régénération de chaleur à 3 L	24

INTRODUCTION GENERALE

Depuis toujours, les énergies fossiles demeurent la base de la vie de l'homme, leur exploitation permet d'en extraire divers produits qui ont facilité les tâches quotidiennes de l'être humain.

La pétrochimie représente la clé de l'industrie moderne et un secteur important pour l'économie algérienne.

La pollution atmosphérique, et plus particulièrement les rejets des composés organiques volatils sont aujourd'hui pointés du doigt à cause de leur effet direct ou indirect sur l'homme et l'environnement.

Pour cela dans ce mémoire, nous avons étudié un procédé de traitement des effluents gazeux émis par la colonne C101 par d'oxydation thermique.

Le traitement des rejets atmosphérique d'une unité en production en continue, peut engendrer un coût supplémentaire aux charges d'exploitation et conditionner automatiquement le choix de la technique employée pour atteindre les exigences réglementaires en terme de qualité de traitement des déchets et doit permettre une certaine flexibilité lors de son exploitation, comme dans le cadre de cette étude qui a opté pour le traitement thermique des effluents et tenté de joindre certains impératifs en terme de qualité et de consommation d'énergies durant le cycle de vie du catalyseur en service dans l'unité.

L'objectif recherché pour l'aboutissement de ce modeste travail s'inscrit dans une politique de maîtrise de l'impact écologique de l'industrie pétrochimique au niveau du groupe sonagraphe.

Le présent travail se décompose en deux chapitres, le premier présente le complexe CP1Z et ces unités en service alors que le suivant définit les techniques de traitement applicable aux composés organiques volatils, les contraintes imposées ainsi que les étapes suivies et les résultats obtenus pour conduire à terme le processus de traitement, la détermination des enthalpies, de la température de combustion à la sortie de la colonne et la quantité de chaleur.

Finalement, une conclusion générale rassemble les principaux résultats de cette étude.

CHAPITRE I

GENERALITES

I.1 Introduction :

Ce chapitre va essayer de décrire d'une façon générale le complexe, Développer son historique et nous allons nous baser sur ces activités, définir sa situation géographique et la disposition de ces installations de production.

Nous allons décrire brièvement les procédés de production exploités et présenter les produits commercialisés, nous aborderons les matières premières utilisés lors de la production et leurs impacts sur l'environnement de travail.

Enfin, nous allons présenter l'impact environnemental de l'unité de production de formaldéhyde en évaluant les rejets atmosphériques émis par la source fixe d'émission de COV, à savoir la colonne C101.

I.2 Description du complexe :

I.2.1 Historique du complexe CP1Z :

Le complexe méthanol et résines synthétiques est le premier projet de la société mixte ALMER, créée par la société nationale SONATRACH et la société italienne SIR en 1969 dans le cadre de la politique d'industrialisation du pays et du développement de l'économie nationale.

Le 10 septembre 1970 fut signé un contrat avec la société HUPPHREYS et GLASGOW pour la construction de l'unité méthanol, contrat qui rentrera en vigueur en février 1971. Puis En novembre 1971, la société ALMER fut dissoute; SONATRACH poursuivit la réalisation du projet en signant deux contrats avec la société italienne ITALCONSULT, le premier en 1972 pour la construction des utilités et le second contrat en 1973 pour celle des unités de production de résines.

L'Entreprise Nationale de Pétrochimie a été créée à l'Issue de la restructuration de SONATRACH, par le décret n°83-410 du 06 Aout 1983 portant auparavant la création de l'entreprise nationale des industries pétrochimiques (ENIP) dont la mission devrait être la prise en charge des activités pétrochimiques et phytosanitaires.

I.2.2 Activités principales :

Le complexe CP1Z a pour mission la prise en charge de toute les opérations de transformations chimiques des hydrocarbures ainsi que leurs dérivés pour la production de produits pétrochimiques de base et des produits finis destinés au marché national et à l'exportation.

Jusqu'à la fin des années 90 et avant l'arrêt de la production de quelques unités suite aux défauts de commercialisation et l'obsolescence des produits, le complexe produisait la gamme des produits suivants :

- Méthanol, Grade A ;
- Formaldéhyde 36% ;
- UFC 80 ;
- Résines phénoliques liquides ;
- Résines phénoliques en poudre à mouler ;
- Résines uréiques liquides ;
- Résines uréiques atomisées ;
- Résines uréiques en poudre à mouler ;
- Résines mélaminiques ;

Mais au jour d'aujourd'hui, le complexe ne produit que le méthanol Grade A, le Formaldéhyde 36 % et UFC80 ainsi que la résine urée-formol L10.

I.2.3 Capacités de production :

Les capacités de production du complexe sont renseignées dans le tableau suivant.

Tableau I.1 : Capacité de production du complexe.

Désignation des produits	Capacité de production (tonne /an)
Méthanol	112,000
Formaldéhyde / UFC 80	20,000 / 12400
Résines uréiques liquides	10,000

I.3 Utilisations du méthanol :

Aujourd'hui, le méthanol est principalement une matière de base pour l'industrie chimique. Il est utilisé pour la production de divers matériaux. Il est manufacturé sur une grande échelle (plus de 32 millions de tonnes par an en 2004, 40 millions de tonnes en 2007 et 64 millions de tonnes en 2012, 109 millions de tonnes par an en 2014[1]), il est utilisé comme intermédiaire pour la production de divers produits chimiques comme il est illustré dans le Tableau suivant.

Tableau I.2 : Utilisations du méthanol.

Formaldéhyde	28,20%	Diméthyle éther	6,70%
Additif ou substitut à l'essence	15,30%	Dichlorométhane	2,90%
Mtbe	13,30%	Méthyle amines	2,00%
Source d'oléfines	12,60%	Biodiesel	1,60%
Acide acétique	8,30%	Autres	9,10%

I.3.1 Caractéristique du méthanol :

Le méthanol est un liquide mobile, incolore, volatil, d'odeur plutôt agréable quand il est pur. Les données relatives au seuil de détection olfactive sont discordantes, les chiffres de 5900, 1500, 100 et 3 ppm ayant été trouvés par les différents expérimentateurs.

Le méthanol est miscible à l'eau, le mélange se faisant avec dégagement de chaleur et contraction, et à la plupart des solvants organiques (alcools, éthers, cétones...).

Il dissout les graisses et un grand nombre de matières plastiques et de sels minéraux ; c'est, à cet égard, un meilleur solvant que l'éthanol [2].

I.3.2 Toxicité:

Bien absorbé par voie respiratoire, orale et percutanée, le méthanol diffuse rapidement dans l'organisme. Il est transformé au niveau hépatique par la même voie que l'éthanol pour donner des métaboliques tels que l'acide formique et les formiates. L'élimination se fait par les urines et la Voie respiratoire sous forme inchangée ou de métabolites (CO₂, formiate), une dépression du système nerveux central, responsable d'un syndrome ébrieux (vertiges, ataxie, céphalées, agitation) puis de troubles de conscience plus ou moins profonds, qui s'accompagnent parfois de convulsions, d'une dépression respiratoire, d'un collapsus cardio-vasculaire.

I.4 Procède de production de formaldéhyde :

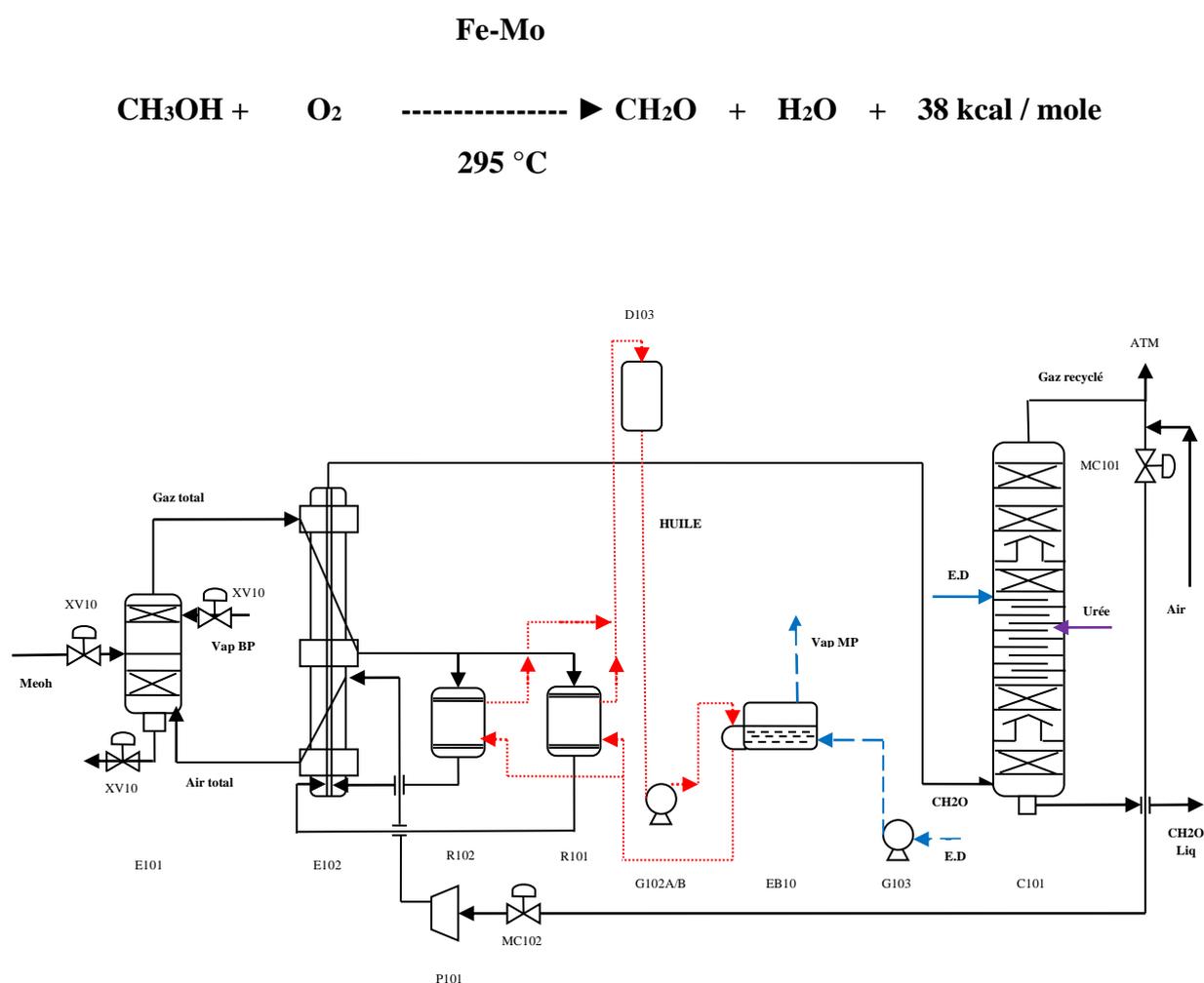
L'unité de production de formaldéhyde permet de produire deux produits commerciaux différents, à savoir le formaldéhyde à 36 % en poids et 64 % d'eau déminéralisé et le deuxième produit qui est l'urée formaldéhyde condensé (UFC 80) constitué de formaldéhyde à 57 % en poids et de 23 % d'urée et 20 % d'eau déminéralisée.

La production de formaldéhyde est basée sur l'oxydation partielle du méthanol en phase gazeuse lors de son passage sur un catalyseur à base de molybdate de fer (Fe-Mo) installé dans deux réacteurs identiques, l'agent d'oxydation étant l'oxygène contenu dans l'air.

Le gaz de formaldéhyde passe par des échangeurs pour récupérer la chaleur qu'il emmagasine puis rentre depuis le bas de la colonne C101 pour procéder à l'abatage des gaz avec de l'eau

déminéralisé pour produire le FA 36 % ou avec de l'urée pour former des pré-condensats (UFC80).

Le gaz pauvre en formaldéhyde sortant du haut de la colonne et compose 75 % du gaz recyclé dans le circuit de l'installation et 25 % d'air frais est aspiré de l'extérieur pour enrichir le mélange ne oxygène grâce au compresseur et vas refouler l'air total chaud vers l'évaporateur ou est pompé le méthanol liquide afin d'assurer son évaporation ainsi le gaz de procédé constitué est totalement gazeux lorsqu'il pénètre dans les deux réacteurs identiques et parallèles, siège de la réaction d'oxydation partielle ou sera convertie 98 % du méthanol avec un taux de conversion sélectif en formaldéhyde de 93,5 % et le reste du méthanol convertie produit par des réactions secondaire du monoxyde et dioxyde de carbone ainsi que du di-méthyl-éther et de l'acide formique.



I.4.1 Utilisations du formaldéhyde :

Le formaldéhyde est un produit chimique de base, il est principalement utilisé pour préparer le phénol, l'urée, le mélamine-formaldéhyde et les résines Polyacétales aussi bien que le Butane diol et l'Iso cyanate de Méthylène bis (4-phényle) (MDI). Il est utilisé comme isolant dans les réfrigérateurs, portes et tableaux de bord d'automobile. Les résines à base de formaldéhyde sont principalement utilisées comme adhésifs dans une grande variété d'applications dans l'industrie du bois.

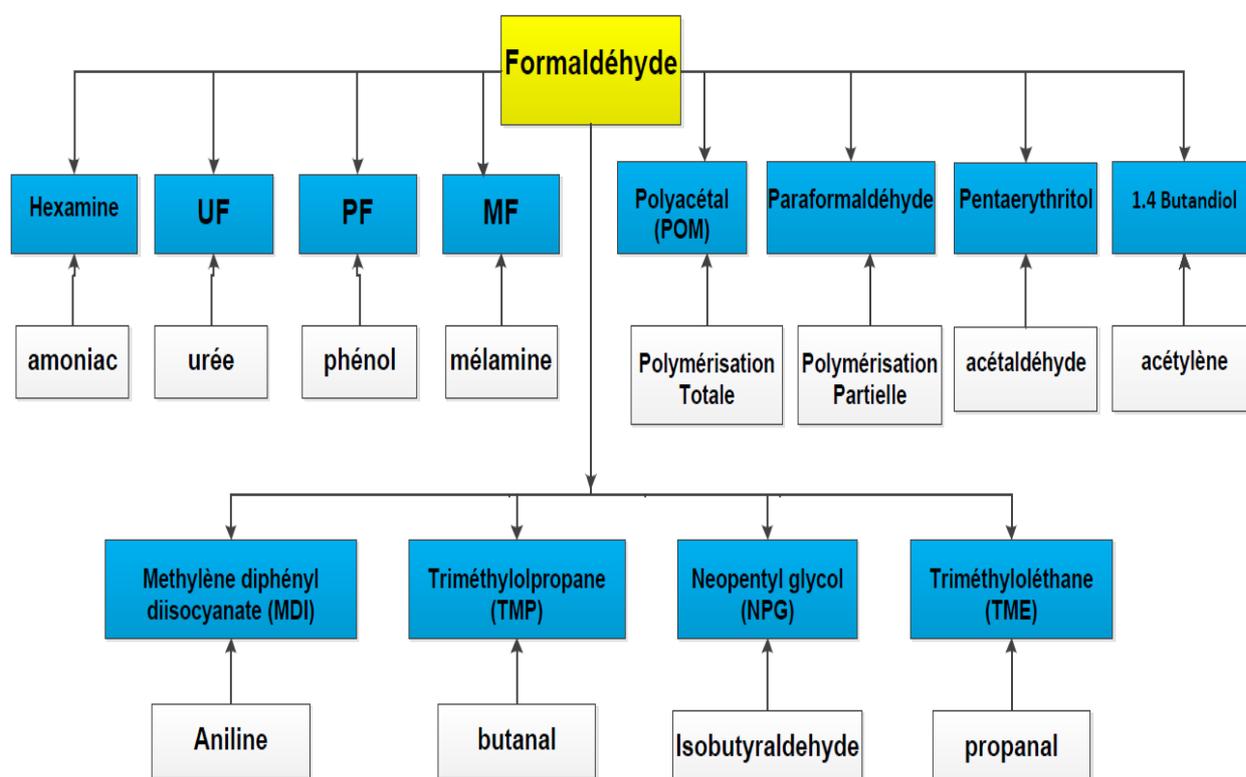


Figure I.2 : Utilisations du formaldéhyde.

I.4.2 Effets irritants et corrosifs :

Les solutions de formaldéhyde sont irritantes pour la peau et sévèrement irritantes pour les yeux. Les vapeurs provoquent une irritation sensorielle transitoire et réversible des yeux et des voies respiratoires (nez et gorge). Ces effets sont ceux qui interviennent aux concentrations de formaldéhyde dans l'air les plus faibles, Une forte variabilité individuelle est observée dans la susceptibilité à ces effets et ils surviennent généralement à partir de 0,3 à 1 ppm, mais peuvent être ressentis dès 1 ppm [3].

I.4.3 Effets allergiques :

Le formaldéhyde peut provoquer des allergies cutanées. Ces allergies sont déclenchées par un contact direct avec un produit contenant du formaldéhyde ou des matériaux en libérant, comme les résines à base de formaldéhyde. Lors du contact, le formaldéhyde se lie aux protéines qu'il rencontre et c'est ce produit qui déclenche le mécanisme allergique. Les allergies se manifestent généralement par un eczéma de contact localisé mais parfois également par des réactions généralisées (choc anaphylactique). Elles sont principalement d'origine domestique (contact avec des cosmétiques, produits ménagers, peintures). Néanmoins, des cas d'allergies cutanées professionnelles au formaldéhyde ont également été rapportés dans l'industrie du contreplaqué, du textile, chez le personnel de santé et les coiffeurs. Il est estimé que de 3 à 6 % de la population sont sujets à cette allergie de contact qui peut se manifester chez les personnes sensibilisées à partir de concentration en formaldéhyde de 30 à 60 ppm. Par ailleurs, les effets irritants des vapeurs de formaldéhyde sur les voies respiratoires sont suspectés de favoriser le développement d'asthmes [4].

I.5 Urée :

I.5.1 Description :

L'urée est un produit azoté massivement utilisé en agriculture pour la fertilisation, elle se présente sous la forme de perles blanches dont la taille se situe entre 1 et 4 mm de formule moléculaire brute $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$, elle est utilisée en solution dans la production de UFC 80 et la colle uréique liquide [5].

I.5.2 Irritation :

Irritation possible: peau, yeux, voies respiratoires et digestives; ingestion: nausées, vomissements, douleurs abdominales, effet diurétique, mal de gorge [6].

I.6 Impact environne tale :

Les différentes installations citées jusqu'à maintenant sont d'anciennes installations conçues et mise en exploitation depuis plusieurs décennies et continue d'être tout à fait performante au niveau de leurs capacités de production et de la qualité de leurs produits, cependant les conditions de production initiales deviennent de plus en plus en marge des standards de sécurité, des normes de respect à l'environnement de travail et seuils de rejets dans l'environnement.

I.6.1 La réglementation algérienne :

Le journal officiel de la république algérienne démocratique et populaire énonce selon le Décret exécutif n° 06-138 du 16 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 15 avril 2006 réglemente l'émission dans l'atmosphère de gaz, fumées, vapeurs, particules liquides ou solides, ainsi que les conditions dans lesquelles s'exercent leur contrôle.

Les valeurs limites arrêté par le décret sont présentés dans l'annexe A, le tableau suivant renseignés depuis l'annexe suscitée indique les valeurs limites en composés organiques volatiles admises au sein des installations en exploitation ainsi que pour les anciennes installations.

Tableau I.3 : Valeurs limites des COV.

N°	Paramètres	Unité	Valeurs limites	Tolérance des valeurs limites des industries anciennes
7	Composés organiques volatils (Rejet total de composés organiques volatils à l'exclusion du méthane)	mg/Nm ³	150	200

I.6.2 Bilan sur la production :

Nous avons établi le bilan sur la colonne C101 en cours de production en fonction des paramètres de marche et indications et avons obtenu les résultats présentés plus bas cependant la composition des gaz n'a pas été actualisé en raison d'un défaut de matériels d'analyse, les valeurs utilisées sont issues d'une analyse de design.

Le débit de gaz rejeté vers atmosphère par la colonne en volume est de 2669,2 m³/h sera convertie en conditions normal de pression et de température pour donner un résultat de 2775,92 Nm³/h.

Le débit des différents constituants en masse sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau I.4 :Composition des effluents gazeux rejetés.

Composants	Y _i	Kg/h
N ₂	84,83	3200,85
O ₂	10,73	404,87
CO	0,96	36,22
CO ₂	0,66	24,90
CH ₃ OH	0,30	11,32
H ₂ CO	0,50	19,20
UREE	0,00	0
H ₂ O	1,98	74,71
HCOOH	0,001	0,037
CH ₃ OCH ₃	0,03	1,13
Total	100	3773,26

Le tableau de la composition des effluents gazeux rejeté indique en couleur les Composés organique volatils concernés par la réglementation et le calcul de la concentration des gaz en COV donne 11404,15mg/Nm³ qui dépassent largement la valeur limite de 200 mg/Nm³.

Un traitement des gaz devra traiter 98,24 % pour produire un effluent gazeux respectant la réglementation.

I.7 Techniques de traitement :

Les Procédés et installations industrielles sont susceptibles d'émettre dans l'atmosphère des substances dangereuses pour l'homme, nuisibles à l'environnement et corrosives pour les équipements de production. Les polluants peuvent être de nature particulaire ou gazeuse. Ces derniers sont d'autant plus dangereux qu'ils sont miscibles à l'air, donc facilement transportés, et qu'ils sont parfois invisibles et inodores. Les polluants gazeux les plus courants sont les composés organiques volatils (COV), les oxydes de soufre (SO₂ et SO₃), les oxydes d'azote (NO, NO₂...), les oxydes de carbone (CO, CO₂), les vapeurs d'acides (HCl, HF...), l'ozone (O₃), dioxines et furanes, et quelques métaux lourds.

Ainsi le développement des techniques de traitement ne cesse d'améliorer les procédés de production afin d'éliminer la production de déchets à la source ou en les réduisant au minimum et cet effort permet de remettre toute l'ingénierie dans de nouvelles dispositions tout aussi prometteuses qu'elles l'ont été au tout début.

Nous allons aborder différentes approches empruntées dans le traitement des COV actuellement, notamment les techniques destructives et récupératrices, nous pourrons ainsi présélectionner au courant les possibilités envisageables dans la résolution de notre problématique et mettre en avant les critères utiles pour justifier notre choix porté sur le traitement thermique des COV.

Le but de ce projet étant d'étudier la possibilité de traiter ces gaz par traitement thermique en minimisant les couts énergétiques et réduire la quantité de COV présents dans les gaz à une valeur inférieur à 200 mg/Nm³.

Enfin, nous préciserons les contraintes imposées par le système de traitement thermique et nous allons décrire le système que nous proposons.

I.8 Définition des COVS :

La Directive européenne du 11 mars 1999, relative à la réduction des émissions de COV dues à l'utilisation de solvants organiques dans certaines activités et installations donne les définitions suivantes :

- Composé organique : tout composé contenant au moins l'élément carbone et un ou plusieurs des éléments suivants : hydrogène, halogènes, oxygène, soufre, phosphore, silicium ou azote, à l'exception des oxydes de carbone et des carbonates et des bicarbonates inorganiques ;
- Composé organique volatil (COV) : tout composé organique ayant une pression de vapeur de 0,01 kPa ou plus à une température de 293,15 K ou ayant une volatilité correspondante dans les conditions d'utilisation particulières. Aux fins de la présente directive, la fraction de créosote qui dépasse cette valeur de pression de vapeur à la température de 293,15 K est considérée comme un COV [7].

I.8.1 Les technologies destructives :

-L'oxydation thermique :

L'oxydation thermique représente environ 60 % des traitements des COVs mis en place actuellement. Cette technique de destruction consiste à brûler les molécules organiques présentes dans l'air pour produire du dioxyde de carbone (CO₂) et de l'eau. La mise en œuvre la plus simple consiste à injecter l'air pollué dans une flamme de gaz naturel (CH₄) où se produit l'oxydation thermique. La température de l'enceinte est de l'ordre de 750 °C et le

temps de séjour d'environ 0,2 à 2 s. Le système peut être autothèrme, (il s'entretient sans apport d'énergie complémentaire) si la concentration en COV est élevée. Ce procédé permet également une récupération de la chaleur par échangeur. Cependant ce système présente un inconvénient environnemental pour la destruction des composés comportant des hétéroatomes comme du soufre, de l'azote ou des halogènes (chlore, fluor, brome, iode). En effet, dans ce cas, l'oxydation produirait respectivement du SO_2 , des NO_x ou des composés halogénés comme l'acide chlorhydrique (HCl). Cet ensemble de composés soumis à réglementation [8].

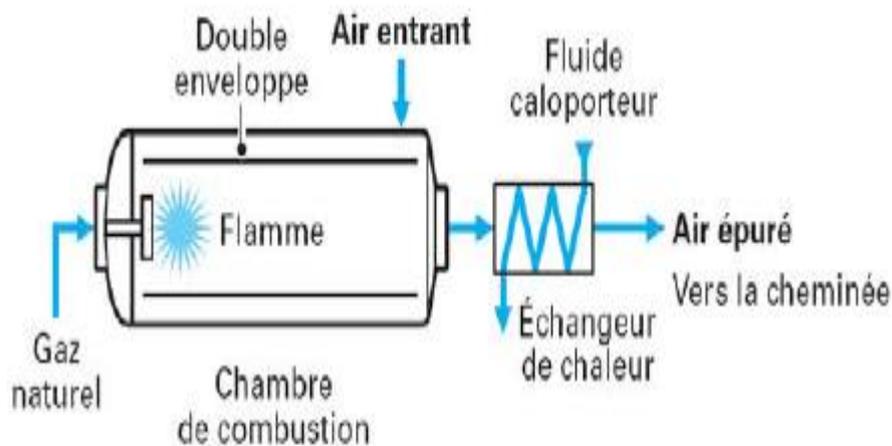


Figure I.3 : Schéma du système d'incinération [9].

Ce système présente un besoin énergétique élevé lors de son fonctionnement rendant son exploitation chère cependant la qualité de traitement peut atteindre les 99,99 %.

Les gaz rejetés de la colonne C101 contiennent une faible quantité de COV pouvant fournir de l'énergie lors de leurs réactions et le système nécessite une bonne récupération d'énergie.

-L'oxydation catalytique :

L'oxydation catalytique est basée sur le même principe que l'incinération cependant l'ajout d'un catalyseur contribue à diminuer la température nécessaire à la réaction de combustion en abaissant l'énergie d'activation de la réaction et permet de produire un même résultat avec des besoins énergétiques moins importants cependant la durée de vie du catalyseur risque à tout moment d'être diminuée en présence d'un poison ou de poussières pouvant obstruer les sites actifs ou désactiver le catalyseur causant une baisse d'efficacité du système de traitement qui nécessite l'arrêt de l'unité de production pour effectuer le changement du catalyseur et compliquer la gestion de l'unité en terme de maintenance [10].

-Les traitements biologiques :

Les traitements biologiques représentent environ 5 % des traitements des COV mis en place actuellement avec principalement l'utilisation de bio filtres pour leur élimination. Le principe repose sur l'action de microorganismes fixés sur un support du type tourbe, copeaux de bois, écorces... qui dégradent les polluants présents dans l'air. Généralement, le réacteur ouvert est constitué simplement de parois et d'un plancher poreux. L'air traverse le garnissage par écoulement ascendant et de l'eau contenant éventuellement des nutriments est injectée périodiquement en haut du filtre. L'humidité du milieu (entre 40 et 60 %) est un facteur influant fortement sur les performances. Du fait d'une cinétique biologique lente, les temps de séjour (20 s à 2 min) ou les vitesses de passage (de 100 à 500 m /h) sont relativement faibles, impliquant des dimensions de réacteur importantes. De plus, les propriétés physico-chimiques des polluants vont interférer sur les performances des traitements biologiques comme la solubilité et la biodégradabilité des molécules à traiter. Il faut noter que ce type de procédé est principalement utilisé pour l'élimination des odeurs [11].

La vitesse de réaction au sein de ces système est lente et nécessite un volume de réacteur tres important et une basse concentration de polluant augmenterait le volume du reacteur d'avantage, cette solution requière un espace considerable qui n'est pas toujours disponible dans les installations industrielles.

CHAPITRE II

PARTIE EXPERIMENTALE

II.1 Introduction :

Les différentes techniques exposées sont toutes intéressantes et efficaces dans certaines conditions toutes aussi différentes les unes que les autres et ceci explique qu'aucune technique n'est applicable dans toutes les situations.

II.2 Problématique:

De nos jours, le complexe CP1/Z est confronté à plusieurs problèmes notamment l'émission de gaz toxique appelés les composés organiques volatiles COVs, qui à leur tour affectent considérablement l'environnement, qui légalement ne devrait pas dépasser en quantité 200 mg/Nm³.

II.3 Choix de la technique :

Les techniques récupératrices ne sont pas envisageables à cause des difficultés de séparation des polluants très miscibles, cependant le volume de gaz est majoritairement composé d'azote réduisant la concentration en COV et rendant le coût d'investissement élevé à cause du surdimensionnement du volume à traiter.

Enfin, Le traitement thermique ou catalytique sont les plus adéquats pour éliminer les COV avec un système simple à l'exploitation, un encombrement raisonnable et une efficacité remarquable mais cependant le coût à l'investissement est tout aussi élevé que leurs performances avérées.

Notre choix s'est porté sur le traitement thermique pour diverses raisons, minimiser les contraintes relatives à l'utilisation de deux systèmes en série qui exploitent des catalyseurs différents dont les durées de vie sont différentes dont le coût est important, le catalyseur peut être sujet à un empoisonnement ou à une baisse de performance à cause de la poussière.

II.4 Schéma de fonctionnement du système :

Le système de traitement des gaz est composé d'un compresseur capable d'aspirer les gaz qui sortent vers l'atmosphère et les refouler vers le système de régénération de chaleur pour le préchauffage par les effluents sortant du brûleur, les gaz à traiter chauds rentrent dans le brûleur pour la combustion et sortent de la chambre de combustion à une température plus élevée pour

passer dans le système de régénération de chaleur afin de dissiper la chaleur de ces gaz et pouvoir être rejetés vers atmosphères comme il est montré dans la figure suivante.

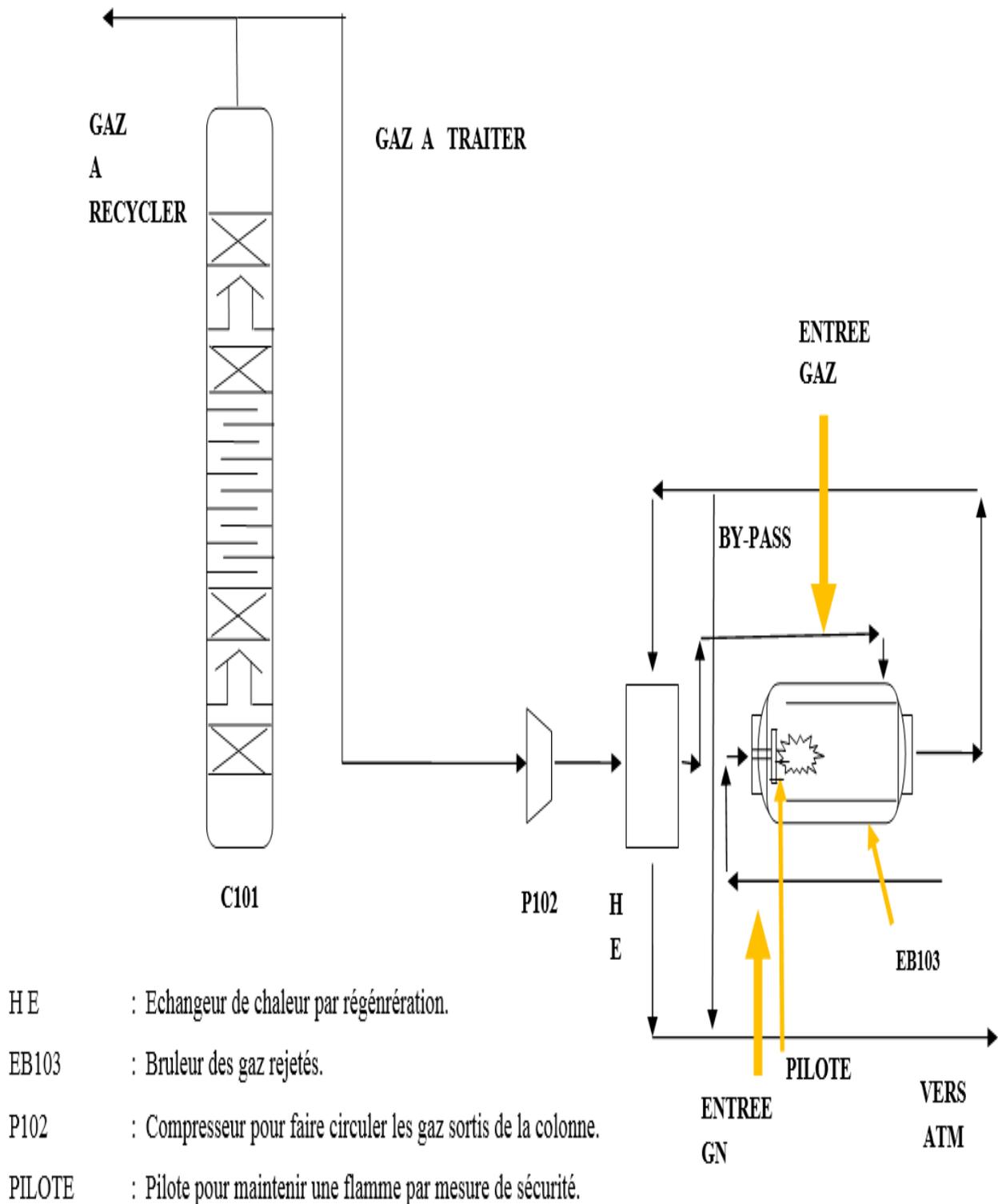


Figure II.1 : Schéma du système de traitement.

II.5 Conditions de fonctionnement :

II.5.1 Composition de la charge :

La composition des gaz à la sortie de la colonne sont sujets à des variations en fonction des paramètres de marche de l'unité, elle dépend principalement de la réaction d'oxydation ménagé au niveau du réacteur et du fonctionnement de la colonne, cependant la capacité de traitement est suffisante en terme d'énergie et de comburant pour les différentes compositions que peut avoir la charge.

II.5.2 Temps de séjour :

Le temps de séjour est le temps nécessaire à la réaction pour consommer une quantité définie d'un réactif et dépend de la température de combustion et de la quantité initiale des réactifs, la détermination du temps de séjour est difficile et a été déterminé empiriquement selon différents scientifiques car nous devons aussi prendre en compte les vitesses de réactions des réactions qui produisent les intermédiaires de réactions sous forme de radicaux et les vitesses de réaction des réactions qui consomment ces mêmes radicaux afin de déterminer la vitesse réelle de formation de notre produit de réaction.

Le temps de séjour a été choisi de façon empirique dans le calcul de la température de combustion, le temps de séjour à une incidence directe sur le volume du bruleur et est inversement proportionnel à la température de combustion, nous avons pris un temps de séjour de 1 seconde pour la suite de nos calculs.

II.5.3 Température de combustion :

La température de combustion est un paramètre très important lors de la combustion, son influence est directe sur le taux de traitement finale du gaz à traiter, la détermination de la température de service du bruleur doit nécessairement être tributaire de la composition de la charge et doit considérer le constituant dont la température d'autoignition est la plus élevée, nous l'appellerons constituant repère qui est dans notre cas l'acide formique comme il est possible de le constater sur le tableau suivant.

Tableau II.1 :Température d'auto ignition des COV.

Composant	Température d'auto ignition °C
Méthanol	464
Formaldéhyde	430
Diméthyle éther	350
Acide formique	520

La détermination de la température de service se fait grâce à un calcul empirique pour la dégradation de 98,24 % du constituant repère, la formule est présentée de calcul de la température de combustion.[12]

$$T_{99,00} = 577.0 - 10.0V_1 + 110.2V_2 + 67.1V_3 + 72.6V_4 + 0.586V_5 - 23.4V_6 - 430.9V_7 + 85.2V_8 - 82.2V_9 + 65.5V_{10} - 76.1V_{11} \quad (\text{II.1})$$

Les valeurs des constantes V_i dépendent du constituant et sont décrites dans l'annexe B.

Le calcul effectué selon cette équation et en spécifiant les constantes V_i , avec une température d'auto ignition de 520 °C (793,15 K) et un temps de séjour de 1 seconde, la température de combustion doit être égale à 716,69 °C (989,84 K).

II.6 Etude de faisabilité technique :

Le présent chapitre a pour but de développer en détails la méthode que nous allons suivre pour définir les paramètres de fonctionnement du brûleur et les besoins en gaz naturel.

La combustion est une réaction exothermique et cette chaleur générée rentrera dans le calcul du bilan énergétique cependant le système n'est pas autotherme en utilisant un échangeur de chaleur classique tubes calandre et nécessite un appoint de chaleur par la combustion du gaz naturel injecté dans le brûleur.

Le traitement thermique des gaz nécessite une quantité importante de chaleur à fournir au gaz à l'entrée pour procéder à la combustion dans des conditions favorables à une réaction rapide et complète, cette chaleur est ensuite récupérée avec un système spécialement dédié à cet usage par soucis d'économie d'énergie.

Nous allons devoir définir les réactions de combustion et déterminer la quantité de chaleur qu'elle dégage par la loi de Hess, puis nous calculerons la quantité de chaleur nécessaire pour atteindre la température de service du brûleur avec la loi de Kirchoff, enfin nous pourrions préciser la quantité de chaleur dans les produits de la réaction et nous utiliserons le solveur du logiciel Microsoft Excel pour déterminer la température de sortie des gaz.

Enfin, nous allons déterminer la quantité de gaz naturel à brûler pour préchauffer le système à la température de service utile en temps de démarrage.

II.7 Modes de fonctionnement :

Le système de traitement nécessite une quantité de chaleur importante pour chauffer les gaz à traiter à la température de combustion, nous allons étudier deux scénarios correspondant au mode en service et le deuxième correspondant au mode de démarrage du système.

II.8 Mode en service :

Le système de traitement en service nécessite un apport de chaleur pour chauffer les gaz à la température de combustion qui est 716,69 °C (989,84 K) et assurer la qualité de traitement exigé, le calcul de la quantité de chaleur contenue dans les produits de combustion est nécessaire pour estimer la quantité de chaleur prête à être échangé en déduisant les pertes au niveau du brûleur de 5 % et définir le taux de récupération de chaleur minimum afin d'éviter un apport supplémentaire de chaleur par la combustion de gaz naturel.

La température peut être réglée en utilisant une ligne de dérivation des fumées vers l'atmosphère, cette ligne sert de by-pass à l'échangeur de chaleur

II.8.1 Réactions de combustion :

Les différentes réactions qui se déroulent dans le brûleur sont les suivantes :

- Oxydation du monoxyde de carbone;



- Oxydation du méthanol;



- Oxydation du formaldéhyde;



- Oxydation de l'acide formique;



- Oxydation du di méthyle éther ;



II.8.2 Calcul du besoin en oxygène :

L'oxygène nécessaire à la réaction de combustion est présent en quantité suffisante dans les gaz à traiter et nous n'avons pas besoin d'injecter de l'air pour enrichir le mélange, le tableau suivant indique le besoin en oxygène en fonction des différents polluants.

Tableau II.2 : Consommation d'oxygène.

Composants	X_i (%)	Coefficient O_2	kmole/h
CO	0,9655	0,5	0,4827
CH ₃ OH	0,2640	1,5	0,3960
H ₂ CO	0,4778	1	0,4778
HCOOH	0,0006	0,5	0,0003
CH ₃ OCH ₃	0,0184	3	0,0551
Total			1,4119
Quantité d'O₂ total (kmole/h)			1,8919
Quantité O₂ restante (kmole/h)			10,7603

Le besoin en oxygène est de 1,4119 kmole/h qui est largement satisfait sachant que le débit d'oxygène à l'entrée est de 12,6522 kmole/h, il reste une quantité importante d'oxygène égal à 10,7603 kmole/h.

II.8.3 Diagramme des réactions :

La figure suivante représente un diagramme des enthalpies des réactifs et des produits de la combustion, en considérant que le système est adiabatique.

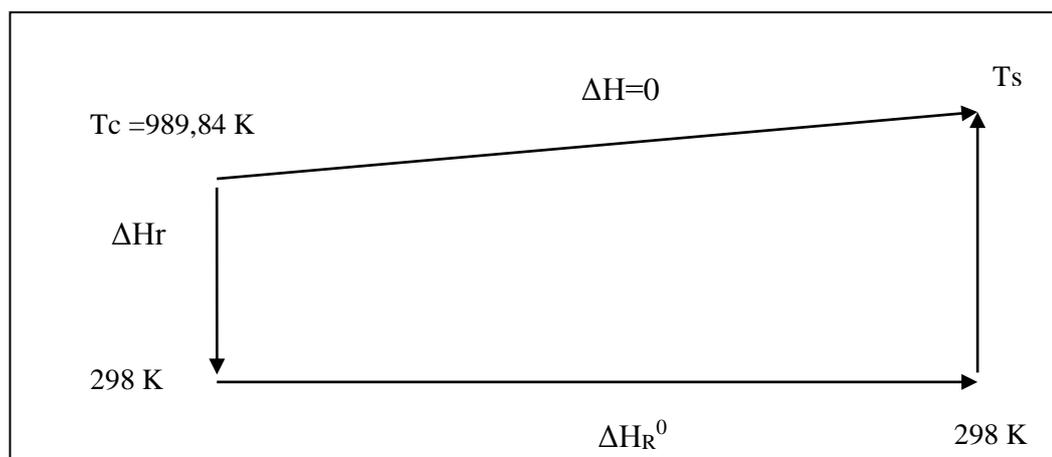


Figure II.2 : schéma du système de traitement.

Afin de déterminer l'enthalpie des produits H_P et la température de sorties des gaz, nous devons calculer l'enthalpie des réactifs à la température de combustion, calculer l'enthalpie de la réaction à T_0 ,

Le système est adiabatique et isobare, donc $\Delta H_p = \Delta H_r + \Delta H_R$ (II.2)

II.8.4 Calcul de l'enthalpie des réactions :

Le Calcul de l'enthalpie de réaction est fait en utilisant la loi de Hess.

$\Delta H_R = \Delta H_f \text{ Produits} - \Delta H_f \text{ Réactifs}$ (II.3)

Les enthalpies standards de formation des réactifs sont représentées dans le tableau suivant.

Tableau II.3 : Enthalpies standards de formation.

Composants	ΔH_f° kcal/mole
CO	-26,41
CO ₂	-94,05
CH ₃ OH	-48,04
H ₂ CO	-25,95
H ₂ O	-57,8
HCOOH	-90,51
CH ₃ OCH ₃	-56,12

Le tableau suivant regroupe les coefficients stœchiométriques des réactions de combustion et présente l'enthalpie de réaction des réactions misent en jeu.

Tableau II.4 : Enthalpies de réactions.

Composants	ΔH_f° kcal/mol	Nombre de mole CO ₂	$n \cdot \Delta H_f^\circ$ CO ₂ kcal	Nombre de mole H ₂ O	$n \cdot \Delta H_f^\circ$ H ₂ O kcal	ΔH_R° kcal/mole
CO	-26,41	1	-94,03	0,00	0,00	-67,64
CH ₃ OH	-48,04	1	-94,03	2	-115,56	-161,61
H ₂ CO	-25,95	1	-94,03	1	-57,78	-125,9
HCOOH	-90,51	1	-94,03	1	-57,78	-61,34
CH ₃ OCH ₃	-56,12	2	-188,06	3	-173,33	-305,38

Le calcul de la chaleur totale générée par les réactions de combustion est présenté dans le tableau suivant.

$$\Delta H_R = \text{débit molaire} * \Delta H_R^\circ \text{ pour chaque réactions de combustion} \dots \dots \dots (II.4)$$

Tableau II.5 : Calcul de la chaleur de réaction globale.

Composants	Nombre de mole kmole/h	ΔH_R° kcal/mole	ΔH_R kcal/h
CO	1,293	-67,64	-87458,52
CH ₃ OH	0,353	-161,61	-57048,33
H ₂ CO	0,64	-125,9	-80576
HCOOH	0,0008	-61,34	-50,3
CH ₃ OCH ₃	0,0246	-305,38	-7521,35
/	/	Total	-232654,5

L'enthalpie totale des réactions $\Delta H_R = -232654,5$ kcal/h

II.8.5 Calcul de l'enthalpie des réactifs :

Le calcul de l'enthalpie des réactifs est fait en utilisant la loi de Kirchhoff, cependant nous devons calculer le CP de chaque constituant en fonction de la température.

$$\Delta H_f = n \int \sum CP \cdot \Delta T \dots \dots \dots (II.5)$$

Le calcul du CP de chaque constituant peut être calculé selon l'équation d'Antoine comme suite :

$$C_p = a + bT + cT^2 \dots \dots \dots (II.6)$$

Avec a, b, c des constantes relatives au constituant, T est température du constituant en degré Kelvin.

Les constantes a, b, c, de chaque constituant sont présentés dans l'annexe C.

La formule développée donne :

$$\Delta H = n \int_{T_0}^{T_1} \sum x_i * (a + bT + cT^2) dT = n x_i ((T_0 - T_1) a + (T_0^2 - T_1^2) b/2 + (T_0^3 - T_1^3) c/3) \dots \dots \dots (II.7)$$

Le tableau suivant regroupe les valeurs des constantes a, b, c, des constituants de base de nos réactions d'oxydation. [Annexe D]

Tableau II.6 : Constantes a, b, c de la chaleur spécifique.

Composants	Xi (%)	a	b	c	C_pi
N ₂	0,853119	6,91	-0,000376	1,9332E-06	7,2083
O ₂	0,094421	6,095	-0,003636	0,000002E-06	0,7570
CO	0,009655	6,7368	-0,000401	1,2851E-06	0,08102
CO ₂	0,004224	5,3253	-0,01431	-8,3756E-06	0,0476
CH ₃ OH	0,002640	9,5712	-0,009151	-5,86257E-05	0,15288
H ₂ CO	0,004778	8,2284	-0,007147	0,000004	0,1904
H ₂ O	0,030975	7,7129	-0,000460	0,000003	0,3295
HCOOH	6,612153 E-6	7,5872	0,001774	-4,49116E-05	3,2656 E-4
CH ₃ OCH ₃	0,000184	8,2858	0,016800	0,000004	0,01168
				Total	8,7785

L'enthalpie total des réactif égal : $\Delta H_r = n \cdot T_c \int^{T_1} \sum C_p \cdot \Delta T = n \cdot C_p (T_1 - T_c) \dots \dots \dots$ (II.8)

$$\Delta H_r = 134 \cdot 8,7785 (298 - 989,84)$$

$$\Delta H_r = -813824,537 \text{ kcal/h}$$

II.8.6 Calcul de la température de sortie des gaz :

Le calcul de la température de sortie des gaz est un calcul que nous avons fait avec le complément solveur du logiciel Microsoft Excel afin de retrouver la valeur de la température de sortie.

Tableau II.7 : Composition des gaz traites.

Composants	% Massique	Masse kg	Masse molaire g/mole	Nombre de mole kmole
N ₂	0,848	3022,49	28	107,94
O ₂	0,091	326,44	32	10,20
CO		0	28	0
CO ₂	0,034	119,64	44	2,71
CH ₃ OH		0	32	0
H ₂ CO		0	30	0
H ₂ O	0,026	93,53	18	5,19
HCOOH		0	46	0
CH ₃ OCH ₃		0	46	0
Total		3563		126,06

Sachant que le système est adiabatique alors $\Delta H = 0$

Or, $\Delta H_p - (\Delta H_R + \Delta H_r) = 0$(II.9)

Reste à calculer ΔH_p qui dépend de la température T avec la condition que ΔH soit égale à zéro.

Sachant que ΔH_p est calculé selon la loi de Kirchhoff.

$$\Delta H_p = n \int_{298}^{T_s} \sum x_i^* (a + bT + cT^2) dT \dots \dots \dots (II.10)$$

$$\Delta H_p = n \sum x_i ((T_s - T_{298}) a + (T_s^2 - T_{298}^2) b/2 + (T_s^3 - T_{298}^3) c/3) \dots \dots \dots (II.11)$$

D'après les calculs précédents de logiciel Microsoft l'Excel la somme des ΔH_p égal à 1046479,03 kcal/h.

Le solveur a calculé T qui est égale à 1014.8 °C (1287,8 K) avec la condition $\Delta H_p - (\Delta H_R + \Delta H_r) = 0$

Le système de traitement est composé d'un échangeur de chaleur alimenté par les gaz à traiter froids et par les gaz traités chaud, l'échange de chaleur se fera en continue et servira à chauffer le gaz à traiter à la température de combustion soit 716,69 °C (989,84 K) pour ensuite entrer dans la chambre de combustion et alimenter le bruleur, la température des gaz atteindra 1014,8 °C (1287,8 K) après

combustion, les gaz sortant vont ensuite passer par l'échangeur de chaleur et céder la chaleur et enfin ressortir vers atmosphère.

II.9 L'échangeur de chaleur :

Le bilan de chaleur que nous avons établi grâce au diagramme de la réaction nous a permis de déterminer la quantité de chaleur disponible qui est égale à Q_{298}^{Tadi} , les pertes au niveau du brûleur sont évalué à 5% et le rapport entre $Q_{989,84}^{298} / Q_{298}^{Tadi} = 0,77$, nous avons donc besoin de récupérer au minimum 77% de la chaleur des gaz à la sortie du brûleur pour que le système soit astotherme.

Les systèmes de récupérations utilisent les échangeurs tubes-calandres ou des échangeurs à plaques, le type à plaques est plus économique lors de son utilisation avec des basses ou moyennes températures (environ 1000 °F) alors que les échangeurs tubes calandres sont préférable pour les hautes températures (van der va art et al, 1990). A cause des limitations sur les échangeurs conventionnels, les systèmes de récupérations sont normalement conçus pour chauffer les gaz d'entrée à une température maximale de 1200 °F. Un système conventionnel de récupération de chaleur peut généralement récupérer 60 à 80 % de la chaleur disponible [13].

Dans le cas de notre projet, nous devons opter pour un système de régénération de chaleur car il présente un taux de récupération jusqu'à 95% et nous permet d'éviter une consommation permanente de gaz naturel.

Cependant, une partie de la récupération de la chaleur doit avoir lieu au niveau du brûleur par un économiseur qui fait passer l'effluent à traiter avant d'entrer dans la chambre de combustion.

II.9.1 Système de régénération de chaleur :

Dans les systèmes de régénération, les gaz chauds de la chambre de combustion passent par un lit d'anneaux résistant chimiquement et thermiquement tel que la porcelaine synthétique, elle chauffe lorsque le gaz refroidit. Le gaz quitte le lit avec une température basse en cédant une grande partie de sa chaleur sensible aux anneaux, au même moment, le gaz à traiter passe par un autre lit qui lui cède sa chaleur pour atteindre la température de combustion (qui aurait été chauffé par les gaz sorties de la chambre de combustion), quand le premier lit est complètement chauffé et que le deuxième lit complètement refroidi, un troisième lit est en

nettoyage avec du gaz traité en chassant les gaz pollués résiduels après préchauffage et disposer le lit au passage de gaz traité, la figure suivante illustre le système à trois lits.

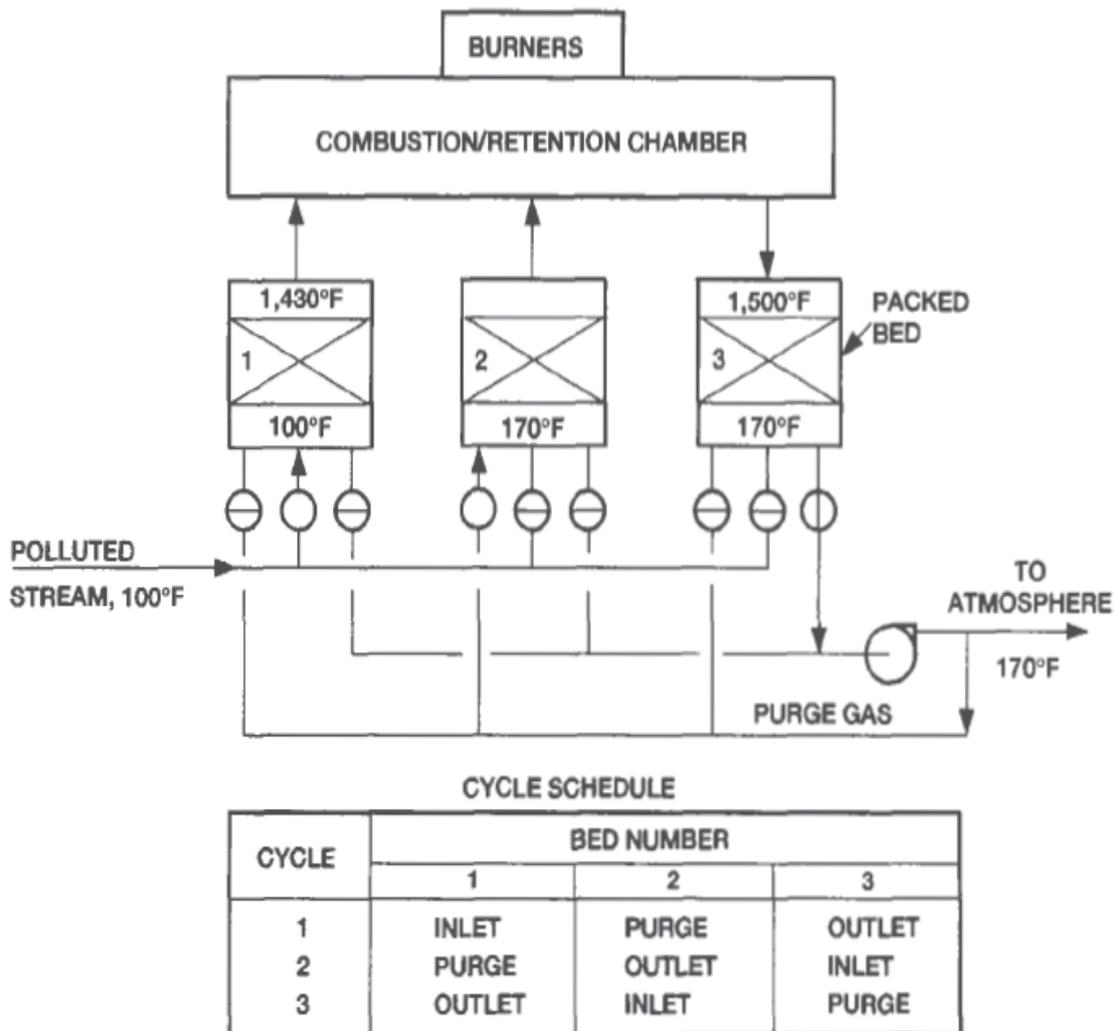


Figure II.3 : Schéma du système de régénération de chaleur à 3 lits [14].

II.10 Démarrage du système :

Le Démarrage du système passe par le préchauffage des gaz à l'entrée à travers le système de régénération de chaleur via les gaz sortis du bruleur par la combustion du gaz naturel

Nous allons calculer quelle est la quantité de gaz naturel nécessaire au préchauffage du système pour brûler les effluents de la colonne dans les conditions établies.

Le tableau suivant présente la composition du gaz naturel qui alimente le complexe, le pouvoir calorifique spécifique aux constituants et le pci moyen du gaz naturel.

Tableau II.8 :Composition du gaz naturel.

Composition	X _i molaire	pci _i kcal/mole	X _i * pci _i kcal/mole
C1	0,837	191,76	160,503
C2	0,073	341,261	24,912
C3	0,02	488,527	9,771
IC4	0,003	633,744	1,901
NC4	0,004	635,384	2,542
IC5	0,001	780,12	0,780
NC5	0,001	782,04	0,782
C6	0,001	928,93	0,929
CO ₂	0,002	0	0
N ₂	0,058	0	0
		pci moyen	202,120

Le pouvoir calorifique du gaz est égale à 202,12 kcal/mole, nous avons estimé le besoin en chaleur en considérant les pertes au bruleur et à l'échangeur, nous devons donc produire

$$Q_{\text{dem}} = \Delta H_R / (0,95 * 0,95) \dots \dots \dots (II.12)$$

$$Q = 813824,537 / (0,95 * 0,95) = 901777,873 \text{ kcal / h.}$$

La quantité de gaz naturel à bruler nécessaire pour obtenir cette chaleur est de

$$F_{GN} = Q / pci_{\text{moy}} \dots \dots \dots (II.13)$$

$$F_{GN} = 901777,873 / 202,119 = 4,461 \text{ kmole / h}$$

Donc, le débit de gaz naturel nécessaire est de $F_{GN} = 116,754 \text{ Nm}^2/\text{h}$.

Selon la réaction de combustion des différents constituants du gaz naturel, le besoin en oxygène sera calculé en fonction de la stœchiométrie des réactions de combustion des divers constituants du gaz naturel, le tableau suivant présente le calcul du besoin en oxygène.

Tableau II.9 :Besoin en oxygène lors de la combustion du gaz naturel.

Compositions	X _i molaire	Coefficient stœchiométrique	X _i * Coefficient
C1	0,837	2	1,674
C2	0,073	3,5	0,255
C3	0,02	5	0,1
IC4	0,003	6,5	0,020
NC4	0,004	6,5	0,026
IC5	0,001	8	0,008
NC5	0,001	8	0,008
C6	0,001	9,5	0,010
CO ₂	0,002	0	0
N ₂	0,058	0	0
		Coefficient moyen	2,101

Le coefficient stœchiométrique moyen est de 2,101

Le besoin en oxygène est de $n_{O_2} = 2,101 * 4,461 \text{ kmole/h} = 8,944 \text{ kmole/h}$

Sachant que la combustion des gaz à traiter ne sera pas effective, donc la quantité d'oxygène disponible sera la totalité de l'oxygène présent dans la charge soit 12,65 kmole/h.

Le rapport de l'oxygène disponible sur le besoin en oxygène lors de cette combustion du gaz naturel sera de $\sigma = 12,65 / 8,944 = 1,41$ soit un excès de 41 % qui est recommandé.

CONCLUSION GENERALE

Ces dernières années, l'industrie pétrochimique a été développée, à l'échelle mondiale, avec une cadence très rapide. En effet, ceci nous montre que le pétrole et le gaz naturel de simple produit combustible sont des matières premières de choix qui peuvent donner d'énormes produits synthétiques.

Le complexe CP1Z produit 100 000 Tonnes / an de méthanol, 20 000 Tonnes / an de Formaldéhyde, 6 000 Tonnes / an de phénoliques liquide et 10 000 Tonnes /an d'uréiques liquides et en poudre à mouler.

dans le complexe CP1/Z il y a des problèmes de l'émission de gaz toxique appelés les COVs, qui affectent l'environnement, légalement ne devrait pas dépasser 200 mg/Nm³.

L'objectif assigné à ce travail, était de proposer un procédé de traitement des polluants gazeux de la colonne C101, afin de réduire ou éliminer leurs teneurs dans le gaz traité, et assurer une meilleure qualité d'air.

Tout d'abord on a opté pour l'oxydation thermique pour le traitement des effluents gazeux, elle est réalisable selon le procédé que nous avons proposé.

Ensuite, nous avons étudié les conditions de marche de cette unité, soit la température de la réaction, et l'enthalpie nécessaire pour le bon fonctionnement du réacteur, ainsi le choix du thermique pour une conversion totale des COV.

Enfin, nous avons étudié et dimensionné chaque équipement, afin de déterminer ces dimensions et ces caractéristiques, qui seront apte pour supporter une telle charge.

Nous avons trouvé comme résultats d'après les calculs la température à la sortie $T=989.84$ K,

L'enthalpie totale des réactions $\Delta H_R = -232654,5$ kcal/h.

Nous pouvons conclure que le système est efficace dans la mesure où il permet un traitement de 99,99% des polluants présents dans les gaz de rejets de la colonne et permet l'unité de se conformer à la réglementation.

Le présent travail est basé sur une technique qui a fait ses preuves car elle est la technique utilisée majoritairement dans le traitement des COV

BIBLIOGRAPHIE

- [1] N.Term Peril, GreenGrowth,Source MMSA <http://www.methanolmsa.com> ,singapore, 2004.
- [2] INRS Base de données, n°203, Edition 2008, www.inrs.fr/fichetox.
- [3] Carbenzime,INRS, point des connaissances ED 5032, Edition decembre 2009, en France, Janvier 2008.
- [4] B.salangro, Travail & Sécurité, n° 758, Edition 2017, Février 2015.
- [5] CHIMIE IMPORT DEVELOPPEMENT, France, Février 2014
- [6] J.Boulet, Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail, Canada, 2 Février 2016.
- [7] E.L'her,<http://www.em-consulte.com>, Vol 22-N°Spécial, Juin 2005.
- [8] P.de Cloirec, Procédé d'électrodéposition de nanoparticules de métal sur un filtre en matériau fibreux, France, 2004.
- [9] P.de Cloirec, Procédé d'électrodéposition de nanoparticules de métal sur un filtre en matériau fibreux, France, 2004.
- [10] Z.Ikram, Traitement des effluents gazeux de la colonne C101 par oxydation catalytique, Université d'Oran, 2019.
- [11] G.Vincent, Procèdes d'élimination de la pollution de l'air par traitement photo catalytique, application au COV, September 2008.
- [12] Walter R. Niessen, Combustion and Incineration Process, 3rd edition, revised and expanded, New York, 28 Février 2002.
- [13] A. kohl, R. Nielsen, Gulf Publishing Company, Gas purification, 5th edition, 28 August 1997.
- [14] A. kohl, R. Nielsen, Gulf Publishing Company, Gas purification, 5th edition, 28 August 1997.
- [15] B. Belkacem, loi_emissions_NOX_06-138,Journal officiel de la république algérienne démocratique et populaire.
- [16] Walter R. Niessen, Combustion and incineration process,3rdedition, revised and expandad, New York, 28 Février 2002.
- [17] Houston, Handbook of thermodynamic diagrams of organic compounds, c1toc4.voll, Texas,1996.

ANNEXE A : Valeurs limites des paramètres de rejets atmosphériques.

N°	PARAMETRES	UNITE	VALEURS LIMITES	TOLERANCE DES VALEURS LIMITES DES INDUSTRIES ANCIENNES
1	Poussières totales	mg/Nm ³	50	100
2	Oxydes de soufre (exprimés en dioxyde de soufre)	"	300	500
3	Oxydes d'azote (exprimés en dioxyde d'azote)	"	300	500
4	Protoxyde d'azote	"	300	500
5	Chlorure d'hydrogène et autres composés inorganiques gazeux du chlore (exprimé en HCL).	"	50	100
6	Fluor et composés inorganiques du fluor (gaz, vésicule et particules), (exprimés en HF)	"	10	20
7	Composés organiques volatils (Rejet total de composés organiques volatils à l'exclusion du méthane)	"	150	200
8	Métaux et composés de métaux (gazeux et particulaires)	"	5	10
9	Rejets de cadmium, mercure et thallium, et de leurs composés	"	0,25	0,5
10	Rejets d'arsenic, sélénium et tellure et de leurs composés autres que ceux visés parmi les rejets de substances cancérigènes	"	1	2
11	Rejets d'antimoine, chrome, cobalt, cuivre, étain, manganèse, nickel, vanadium et zinc, et de leurs composés autres que ceux visés parmi les rejets de substances cancérigènes	"	5	10
12	Phosphine, phosgène	"	1	2
13	Acide cyanhydrique exprimé en HCN, brome et composés inorganiques gazeux du chrome exprimés en HBr, chlore exprimé en HCl, Hydrogène sulfuré	"	5	10
14	Ammoniac	"	50	100
15	Amiante	"	0,1	0,5
16	Autres fibres que l'amiante	"	1	50

ANNEXE B : Equation prédictive de theodore et reynolds.

Les équations de prédiction de la température de dégradation d'un composé sont illustrées dans la figure suivante.

$$\begin{aligned}T_{99.00} &= 577.0 - 10.0V_1 + 110.2V_2 + 67.1V_3 + 72.6V_4 + 0.586V_5 - 23.4V_6 \\ &\quad - 430.9V_7 + 85.2V_8 - 82.2V_9 + 65.5V_{10} - 76.1V_{11} \\ T_{99.90} &= 594.0 - 12.2V_1 + 117.0V_2 + 71.6V_3 + 80.2V_4 + 0.592V_5 - 20.2V_6 \\ &\quad - 420.3V_7 + 87.1V_8 - 66.8V_9 + 62.8V_{10} - 75.3V_{11} \\ T_{99.99} &= 605.0 - 13.9V_1 + 122.5V_2 + 75.7V_3 + 85.6V_4 + 0.597V_5 - 17.9V_6 \\ &\quad - 412.0V_7 + 89.0V_8 - 55.3V_9 + 60.7V_{10} - 75.2V_{11}\end{aligned}$$

Les constantes relatives au composé à bruler sont illustrées dans la figure suivante

V_1 = nombre d'atomes de carbone dans la molécule

V_2 =aromatique (0=non, 1=oui)

V_3 =double liaison carbone-to-carbone (0=non, 1=oui)

V_4 =nombre d'atomes d'azote dans la molécule

V_5 =température d'auto-inflammation (°F)

V_6 =nombre d'atomes d'oxygène dans la molécule

V_7 =nombre d'atomes de soufre dans la molécule

V_8 =rapport hydrogène/atome de carbone

V_9 =composé allylique (0=non, 1=oui)

V_{10} =double liaison carbone-interaction chlore (0=non, 1=oui)

V_{11} =logarithme népérien du temps de séjour en secondes

ANNEXE C : Chaleur spécifique des composés organiques.

Appendix E

GAS HEAT CAPACITY FOR C₁ TO C₄ COMPOUNDS

Carl L. Yaws
Lamar University, Beaumont, Texas

$C_p = A + B T + C T^2 + D T^3 + E T^4$ (C_p - joule/g-mol K, T - K)

NO	FORMULA	NAME	A	B	C	D	E	TMIN	TMAX
1	CBrClF2	BROMOCHLORODIFLUOROMETHANE	18.387	2.7933E-01	-3.7127E-04	2.2889E-07	-5.3229E-11	100	1500
2	CBrCl3	BROMOTRICHLOROMETHANE	24.484	3.2024E-01	-4.9096E-04	3.3359E-07	-8.2982E-11	100	1500
3	CBrF3	BROMOTRIFLUOROMETHANE	17.208	2.4770E-01	-2.9181E-04	1.6247E-07	-3.4765E-11	100	1500
4	CBr2F2	DIBROMODIFLUOROMETHANE	22.399	2.7403E-01	-3.7433E-04	2.3638E-07	-5.6067E-11	100	1500
5	CClF3	CHLOROTRIFLUOROMETHANE	13.762	2.4951E-01	-2.8194E-04	1.4962E-07	-3.0450E-11	100	1500
6	CClN	CYANOGEN CHLORIDE	21.270	1.1915E-01	-1.6822E-04	1.1457E-07	-2.9210E-11	100	1500
7	CCl2F2	DICHLORODIFLUOROMETHANE	14.877	2.8292E-01	-3.6295E-04	2.1591E-07	-4.8619E-11	100	1500
8	CCl2O	PHOSGENE	20.747	1.7972E-01	-2.3242E-04	1.4224E-07	-3.3087E-11	100	1500
9	CCl3F	TRICHLOROFUOROMETHANE	16.636	3.1336E-01	-4.4426E-04	2.8612E-07	-6.8556E-11	89	1500
10	CCl4	CARBON TETRACHLORIDE	19.816	3.3311E-01	-5.0511E-04	3.4057E-07	-8.4249E-11	100	1500
11	CF2O	CARBONYL FLUORIDE	23.640	8.9853E-02	-2.4575E-05	-2.8140E-08	1.4023E-11	100	1500
12	CF4	CARBON TETRAFLUORIDE	15.278	1.9916E-01	-1.6369E-04	5.1686E-08	-3.1820E-12	100	1500
13	CHBr3	TRIBROMOMETHANE	33.356	1.7475E-01	-1.9516E-04	1.0725E-07	-2.3180E-11	100	1500
14	CHClF2	CHLORODIFLUOROMETHANE	20.519	1.4746E-01	-9.2440E-05	1.4379E-08	3.4356E-12	100	1500
15	CHCl2F	DICHLOROFUOROMETHANE	33.078	1.0473E-01	-2.2510E-05	-3.8822E-08	1.8245E-11	100	1500
16	CHCl3	CHLOROFORM	22.487	1.9823E-01	-2.1676E-04	1.1636E-07	-2.4555E-11	100	1500
17	CHF3	TRIFLUOROMETHANE	23.287	9.5385E-02	2.0049E-05	-7.4432E-08	2.7428E-11	100	1500
18	CHN	HYDROGEN CYANIDE	25.766	3.7969E-02	-1.2416E-05	-3.2240E-09	2.2610E-12	100	1500
19	CH2BrCl	BROMOCHLOROMETHANE	27.752	9.1021E-02	-8.2541E-06	-3.7449E-08	1.5156E-11	100	1500
20	CH2Br2	DIBROMOMETHANE	28.305	1.0581E-01	-4.7966E-05	-2.6711E-09	5.1497E-12	100	1500
21	CH2Cl2	DICHLOROMETHANE	26.694	8.3984E-02	8.9712E-06	-5.0924E-08	1.8726E-11	100	1500
22	CH2F2	DIFLUOROMETHANE	30.323	1.1176E-02	1.5809E-04	-1.6323E-07	4.7955E-11	100	1500
23	CH2I2	DIIODOMETHANE	28.918	1.1739E-01	-7.3808E-05	1.7055E-08	1.2051E-14	100	1500
24	CH2O	FORMALDEHYDE	34.428	-2.9779E-02	1.5104E-04	-1.2733E-07	3.3887E-11	50	1500
25	CH2O2	FORMIC ACID	31.745	7.4234E-03	1.8791E-04	-1.9475E-07	5.7613E-11	50	1500
26	CH3Br	METHYL BROMIDE	29.146	2.4374E-02	1.0655E-04	-1.1324E-07	3.3241E-11	100	1500
27	CH3Cl	METHYL CHLORIDE	27.385	2.6036E-02	1.0320E-04	-1.0887E-07	3.1642E-11	150	1500
28	CH3Cl3Si	METHYL TRICHLOROSILANE	56.670	2.0066E-01	-1.6721E-04	7.2533E-08	-1.2684E-11	200	1500
29	CH3F	METHYL FLUORIDE	34.077	-3.5019E-02	2.2031E-04	-1.9566E-07	5.4104E-11	100	1500
30	CH3I	METHYL IODIDE	25.635	6.6836E-02	1.2292E-05	-3.6742E-08	1.2301E-11	100	1500
31	CH3NO	FORMAMIDE	30.911	1.4363E-02	1.9281E-04	-1.9805E-07	5.8262E-11	150	1500
32	CH3NO2	NITROMETHANE	41.136	3.4367E-03	2.6380E-04	-2.6898E-07	7.9503E-11	100	1500
33	CH4	METHANE	34.942	-3.9957E-02	1.9184E-04	-1.5303E-07	3.9321E-11	50	1500
34	CH4Cl2Si	METHYL DICHLOROSILANE	37.250	2.3327E-01	-1.9952E-04	9.1473E-08	-1.7387E-11	200	1500
35	CH4O	METHANOL	40.046	-3.8287E-02	2.4529E-04	-2.1679E-07	5.9909E-11	100	1500
36	CH4O3S	METHANESULFONIC ACID	65.450	-1.0363E-01	6.2784E-04	-6.7194E-07	2.3114E-10	298	1000
37	CH4S	METHYL MERCAPTAN	40.307	-3.6753E-03	1.8400E-04	-1.7596E-07	5.0137E-11	100	1500
38	CH5ClSi	METHYL CHLOROSILANE	25.886	2.1064E-01	-1.3055E-04	3.6499E-08	-3.0118E-12	200	1500
39	CH5N	METHYLAMINE	40.039	-1.5108E-02	2.5012E-04	-2.3336E-07	6.5582E-11	100	1500
40	CH6Si	METHYL SILANE	25.277	1.2988E-01	5.9803E-05	-1.2080E-07	4.0036E-11	100	1500
41	CN4O8	TETRANITROMETHANE	23.733	5.5312E-01	-4.5854E-04	1.5286E-07	-1.3967E-11	298	1500
42	CO	CARBON MONOXIDE	29.556	-6.5807E-03	2.0130E-05	-1.2227E-08	2.2617E-12	60	1500
43	COS	CARBONYL SULFIDE	20.913	9.2794E-02	-9.7014E-05	5.0943E-08	-1.0615E-11	100	1500
44	CO2	CARBON DIOXIDE	27.437	4.2315E-02	-1.9555E-05	3.9968E-09	-2.9872E-13	50	5000
45	CS2	CARBON DISULFIDE	20.461	1.2299E-01	-1.6184E-04	1.0199E-07	-2.4444E-11	100	1500
46	C2BrF3	BROMOTRIFLUOROETHYLENE	33.956	2.3803E-01	-2.5448E-04	1.3108E-07	-2.6462E-11	300	1200
47	C2Br2F4	1,2-DIBROMOTETRAFLUOROETHANE	50.542	3.7777E-01	-4.8770E-04	3.1054E-07	-7.8174E-11	298	1200
48	C2ClF3	CHLOROTRIFLUOROETHYLENE	28.388	2.5871E-01	-2.9010E-04	1.5876E-07	-3.3880E-11	300	1500
49	C2ClF5	CHLOROPENTAFLUOROETHANE	24.663	3.8598E-01	-3.8927E-04	1.7751E-07	-2.9992E-11	200	1500
50	C2Cl2F4	1,2-DICHLOROTETRAFLUOROETHANE	17.183	4.8507E-01	-5.9368E-04	3.3494E-07	-7.1705E-11	273	1500
51	C2Cl3F3	1,1,2-TRICHLOROTRIFLUOROETHANE	42.456	4.0973E-01	-5.0045E-04	2.8463E-07	-6.1623E-11	200	1500
52	C2Cl4	TETRACHLOROETHYLENE	34.627	3.1065E-01	-4.5258E-04	3.2734E-07	-9.4234E-11	298	1000
53	C2Cl4F2	1,1,2,2-TETRACHLORODIFLUOROETHANE	3.788	6.9339E-01	-1.0927E-03	7.6080E-07	-1.9434E-10	298	1000
54	C2Cl4O	TRICHLOROACETYL CHLORIDE	55.547	2.5821E-01	-2.9449E-04	1.6054E-07	-3.3869E-11	298	1500
55	C2Cl6	HEXACHLOROETHANE	48.475	4.4117E-01	-5.9638E-04	3.6922E-07	-8.5631E-11	150	1500
56	C2F4	TETRAFLUROETHYLENE	30.934	2.1587E-01	-1.9110E-04	7.5713E-08	-1.0493E-11	100	1500
57	C2F6	HEXAFLUROETHANE	13.604	4.3503E-01	-4.8166E-04	2.4841E-07	-4.8897E-11	100	1500
58	C2HBrClF3	HALOTRANE	65.307	1.2411E-01	8.8736E-05	-1.7716E-07	6.3268E-11	100	1500
59	C2HClF2	2-CHLORO-1,1-DIFLUOROETHYLENE	19.530	2.4576E-01	-2.5701E-04	1.3429E-07	-2.7612E-11	298	1500
60	C2HCl3	TRICHLOROETHYLENE	40.879	1.6218E-01	-1.0399E-04	1.3310E-08	5.9103E-12	100	1500

$$C_p = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 \quad (C_p - \text{joule/g-mol K, T - K})$$

NO	FORMULA	NAME	A	B	C	D	E	TMIN	TMAX
61	C2HCl3O	DICHLOROACETYL CHLORIDE	38.143	2.3343E-01	-1.9070E-04	5.6320E-08	-2.5489E-12	298	1500
62	C2HCl3O	TRICHLOROACETALDEHYDE	46.176	2.3126E-01	-2.3659E-04	1.2539E-07	-2.7197E-11	298	1200
63	C2HCl5	PENTACHLOROETHANE	28.297	4.3657E-01	-5.5684E-04	3.3877E-07	-7.8834E-11	100	1500
64	C2HF3O2	TRIFLUOROACETIC ACID	9.274	3.9410E-01	-4.3755E-04	2.4769E-07	-5.7309E-11	298	1200
65	C2HF5	PENTAFLUOROETHANE	40.370	2.0895E-01	-4.5524E-05	-8.2827E-08	3.9062E-11	100	1500
66	C2H2	ACETYLENE	19.360	1.1519E-01	-1.2374E-04	7.2370E-08	-1.6590E-11	200	1500
67	C2H2Br4	1,1,2,2-TETRABROMOETHANE	49.111	2.5471E-01	-2.1340E-04	7.7534E-08	-9.0356E-12	150	1500
68	C2H2Cl2	1,1-DICHLOROETHYLENE	21.272	2.0394E-01	-1.8292E-04	8.2561E-08	-1.4802E-11	200	1500
69	C2H2Cl2	cis-1,2-DICHLOROETHYLENE	11.376	2.4489E-01	-2.5183E-04	1.3368E-07	-2.8416E-11	200	1500
70	C2H2Cl2	trans-1,2-DICHLOROETHYLENE	19.666	2.0908E-01	-1.9503E-04	9.4941E-08	-1.8848E-11	200	1500
71	C2H2Cl2O	CHLOROACETYL CHLORIDE	29.566	2.1377E-01	-1.8076E-04	7.9913E-08	-1.4782E-11	298	1500
72	C2H2Cl2O	DICHLOROACETALDEHYDE	39.761	1.3843E-01	9.8425E-06	-1.0396E-07	4.4962E-11	298	1200
73	C2H2Cl2O2	DICHLOROACETIC ACID	48.334	1.7165E-01	-6.2134E-05	-3.6029E-08	2.3198E-11	298	1200
74	C2H2Cl3F	1,1,1-TRICHLOROFLUOROETHANE	20.183	3.8754E-01	-4.6141E-04	2.7663E-07	-6.5842E-11	298	1200
75	C2H2Cl4	1,1,1,2-TETRACHLOROETHANE	27.227	3.4932E-01	-3.7793E-04	2.0496E-07	-4.3937E-11	200	1500
76	C2H2Cl4	1,1,2,2-TETRACHLOROETHANE	20.427	3.6839E-01	-4.0365E-04	2.2067E-07	-4.7303E-11	298	1500
77	C2H2F2	1,1-DIFLUOROETHYLENE	24.354	1.2196E-01	1.1084E-05	-7.9704E-08	3.0820E-11	100	1500
78	C2H2F4	1,1,1,2-TETRAFLUROETHANE	8.429	3.4966E-01	-3.3281E-04	1.5603E-07	-2.8939E-11	200	1500
79	C2H2O	KETENE	-14.704	3.1238E-01	-4.3385E-04	2.9499E-07	-7.5221E-11	200	1500
80	C2H2O4	OXALIC ACID	-5.565	1.3496E-01	1.3737E-05	-1.9105E-07	1.1311E-10	298	1000
81	C2H3Br	VINYL BROMIDE	19.032	1.4697E-01	-7.2736E-05	4.7354E-09	4.4305E-12	200	1500
82	C2H3Cl	VINYL CHLORIDE	17.193	1.4564E-01	-6.4281E-05	-3.2385E-09	6.7882E-12	200	1500
83	C2H3ClF2	1-CHLORO-1,1-DIFLUOROETHANE	20.964	2.6700E-01	-2.0774E-04	7.5759E-08	-9.7753E-12	200	1500
84	C2H3ClO	ACETYL CHLORIDE	37.484	1.0683E-01	1.3035E-05	-5.7327E-08	1.9960E-11	200	1500
85	C2H3ClO	CHLOROACETALDEHYDE	25.272	1.5004E-01	-3.4110E-05	-4.1182E-08	2.0993E-11	298	1200
86	C2H3ClO2	CHLOROACETIC ACID	9.327	2.9997E-01	-2.6947E-04	1.2616E-07	-2.4406E-11	298	1500
87	C2H3ClO2	METHYL CHLOROFORMATE	13.353	2.7827E-01	-2.0298E-04	3.2225E-08	1.9750E-11	298	900
88	C2H3Cl3	1,1,1-TRICHLOROETHANE	18.674	3.3443E-01	-3.4963E-04	1.8764E-07	-4.0744E-11	100	1500
89	C2H3Cl3	1,1,2-TRICHLOROETHANE	28.881	2.4893E-01	-1.7639E-04	5.2632E-08	-3.5668E-12	200	1500
90	C2H3F	VINYL FLUORIDE	27.617	5.4052E-02	1.3093E-04	-1.6220E-07	5.0829E-11	100	1500
91	C2H3F3	1,1,1-TRIFLUOROETHANE	33.444	1.5361E-01	3.3402E-05	-1.1974E-07	4.4424E-11	100	1500
92	C2H3N	ACETONITRILE	36.947	2.2085E-02	1.4661E-04	-1.5012E-07	4.3482E-11	100	1500
93	C2H3NO	METHYL ISOCYANATE	21.328	8.5385E-02	7.8504E-05	-1.0050E-07	2.9508E-11	298	1500
94	C2H4	ETHYLENE	32.083	-1.4831E-02	2.4774E-04	-2.3766E-07	6.8274E-11	60	1500
95	C2H4Br2	1,1-DIBROMOETHANE	21.084	2.5090E-01	-2.0060E-04	8.4960E-08	-1.5026E-11	200	1500
96	C2H4Br2	1,2-DIBROMOETHANE	47.739	1.3553E-01	1.0414E-05	-6.8462E-08	2.5192E-11	200	1500
97	C2H4Cl2	1,1-DICHLOROETHANE	15.730	2.6124E-01	-2.1489E-04	9.5761E-08	-1.8004E-11	200	1500
98	C2H4Cl2	1,2-DICHLOROETHANE	37.275	1.4362E-01	1.0378E-05	-7.8305E-08	2.8872E-11	200	1500
99	C2H4Cl2O	BIS(CHLOROMETHYL)ETHER	3.763	3.6729E-01	-3.5749E-04	1.8325E-07	-3.7910E-11	298	1500
100	C2H4F2	1,1-DIFLUOROETHANE	36.271	7.8276E-02	1.6310E-04	-2.0396E-07	6.3814E-11	100	1500
101	C2H4F2	1,2-DIFLUOROETHANE	18.309	2.0288E-01	-6.1613E-05	-3.8781E-08	2.0688E-11	200	1500
102	C2H4O	ACETALDEHYDE	34.140	4.0020E-02	1.5634E-04	-1.6445E-07	4.7248E-11	100	1500
103	C2H4O	ETHYLENE OXIDE	30.827	-7.6041E-03	3.2347E-04	-3.2747E-07	9.7271E-11	50	1500
104	C2H4O2	ACETIC ACID	34.850	3.7626E-02	2.8311E-04	-3.0767E-07	9.2646E-11	50	1500
105	C2H4O2	METHYL FORMATE	5.795	2.5072E-01	-1.7515E-04	6.0565E-08	-8.1015E-12	250	1500
106	C2H5Br	BROMOETHANE	26.552	1.1837E-01	6.7525E-05	-1.1655E-07	3.7186E-11	100	1500
107	C2H5Cl	ETHYL CHLORIDE	35.946	5.2294E-02	2.0321E-04	-2.2795E-07	6.9123E-11	100	1500
108	C2H5ClO	2-CHLOROETHANOL	12.997	2.5587E-01	-1.6553E-04	5.2292E-08	-6.5812E-12	298	1500
109	C2H5F	ETHYL FLUORIDE	21.452	1.2080E-01	7.8409E-05	-1.2578E-07	3.9184E-11	150	1500
110	C2H5I	ETHYL IODIDE	27.759	1.1915E-01	5.9726E-05	-1.0756E-07	3.4157E-11	100	1500
111	C2H5N	ETHYLENIMINE	12.316	1.1833E-01	1.2598E-04	-1.8322E-07	5.8831E-11	150	1500
112	C2H5NO	ACETAMIDE	17.748	1.3627E-01	1.0668E-04	-1.8647E-07	6.2842E-11	100	1500
113	C2H5NO	N-METHYLFORMAMIDE	43.449	-1.0054E-01	7.2412E-04	-8.6224E-07	3.2724E-10	298	1000
114	C2H5NO2	NITROETHANE	17.726	2.2334E-01	-2.1690E-05	-8.0889E-08	3.2223E-11	200	1500
115	C2H6	ETHANE	28.146	4.3447E-02	1.8946E-04	-1.9082E-07	5.3349E-11	100	1500
116	C2H6AlCl	DIMETHYALUMINUM CHLORIDE	13.870	3.1526E-01	-2.4008E-04	9.9159E-08	-1.7228E-11	298	1500
117	C2H6O	DIMETHYL ETHER	34.668	7.0293E-02	1.6530E-04	-1.7675E-07	4.9313E-11	100	1500
118	C2H6O	ETHANOL	27.091	1.1055E-01	1.0957E-04	-1.5046E-07	4.6601E-11	100	1500
119	C2H6OS	DIMETHYL SULFOXIDE	27.816	2.4839E-01	-1.3176E-04	2.3843E-08	1.6501E-12	200	1500
120	C2H6O2	ETHYLENE GLYCOL	48.218	1.9073E-01	-6.6117E-05	-1.8834E-08	1.2555E-11	200	1500
121	C2H6O4S	DIMETHYL SULFATE	23.800	3.7920E-01	-2.0385E-04	2.4893E-08	8.1594E-12	200	1500
122	C2H6S	DIMETHYL SULFIDE	35.994	1.2381E-01	5.0871E-05	-9.1708E-08	2.8274E-11	200	1500
123	C2H6S	ETHYL MERCAPTAN	47.034	4.1940E-02	2.3486E-04	-2.5035E-07	7.4049E-11	100	1500
124	C2H6S2	DIMETHYL DISULFIDE	50.010	1.4793E-01	4.2325E-05	-9.9087E-08	3.2173E-11	200	1500
125	C2H7N	DIMETHYLAMINE	30.638	1.0737E-01	1.5824E-04	-1.9418E-07	5.8509E-11	200	1500
126	C2H7N	ETHYLAMINE	30.983	1.2458E-01	1.0966E-04	-1.5256E-07	4.6640E-11	200	1500
127	C2H7NO	MONOETHANOLAMINE	-0.555	3.7003E-01	-3.1976E-04	1.5834E-07	-3.2344E-11	298	1500
128	C2H8N2	ETHYLENEDIAMINE	10.429	3.2490E-01	-1.9912E-04	6.3557E-08	-8.7124E-12	298	1500
129	C2H8Si	DIMETHYL SILANE	27.940	2.2419E-01	-4.0022E-06	-9.9567E-08	3.6936E-11	100	1500
130	C2N2	CYANOGEN	22.445	1.6837E-01	-2.3212E-04	1.5784E-07	-4.0479E-11	100	1500
131	C3F6	HEXAFLUOROPROPYLENE	-3.108	5.2270E-01	-4.6521E-04	1.9228E-07	-2.9928E-11	200	1500
132	C3F6O	HEXAFLUOROACETONE	0.451	5.2201E-01	-4.5370E-04	1.6725E-07	-1.9476E-11	200	1500

ANNEXE D : Chaleur spécifique des composés inorganiques.

		$C_p = A + B T + C T^2 + D T^3 + E T^4$ (C_p - joule/g-mol K, T - K)								
NO	FORMULA	NAME	A	B	C	D	E	TMIN	TMAX	PHASE
126	H2	HYDROGEN	25.399	2.0178E-02	-3.8549E-05	3.1880E-08	-8.7585E-12	250	1500	gas
127	H2O	WATER	33.933	-8.4186E-03	2.9906E-05	-1.7825E-08	3.6934E-12	100	1500	gas
128	H2O2	HYDROGEN PEROXIDE	36.181	8.2657E-03	6.6420E-05	-6.9944E-08	2.0951E-11	100	1500	gas
129	H2S	HYDROGEN SULFIDE	33.878	-1.1216E-02	5.2578E-05	-3.8397E-08	9.0281E-12	100	1500	gas
130	H2SO4	SULFURIC ACID	9.486	3.3795E-01	-3.8078E-04	2.1308E-07	-4.6878E-11	100	1500	gas
131	H2S2	HYDROGEN DISULFIDE*	58.617	-1.1216E-02	5.2578E-05	-3.8397E-08	9.0281E-12	100	1500	gas
132	H2Se	HYDROGEN SELENIDE*	34.878	-1.1216E-02	5.2578E-05	-3.8397E-08	9.0281E-12	100	1500	gas
133	H2Te	HYDROGEN TELLURIDE*	34.878	-1.1216E-02	5.2578E-05	-3.8397E-08	9.0281E-12	100	1500	gas
134	H3NO3S	SULFAMIC ACID	129.000	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	293	303	solid
135	He	HELIUM-3	20.786	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	100	1500	gas
136	He	HELIUM-4	20.786	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	100	1500	gas
137	Hf	HAFNIUM	25.703	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	298	308	solid
138	Hg	MERCURY	31.106	-1.4350E-02	1.2908E-05	0.0000E+00	0.0000E+00	234	630	liquid
139	HgBr2	MERCURIC BROMIDE	66.584	2.9288E-02	6.0558E-12	-1.0022E-14	6.1505E-18	298	514	solid
140	HgCl2	MERCURIC CHLORIDE	52.426	1.3494E-01	-3.1212E-04	3.9829E-07	-1.9638E-10	298	550	solid
141	HgI2	MERCURIC IODIDE	56.286	3.4249E-01	-8.7036E-04	1.0951E-06	-5.3193E-10	298	563	solid
142	I7	IODINE HEPTAFLUORIDE	38.537	5.0269E-01	-7.1344E-04	4.5817E-07	-1.0835E-10	298	1500	gas
143	I2	IODINE	34.150	1.3931E-02	-2.0953E-05	1.4362E-08	-3.5950E-12	100	1500	gas
144	In	INDIUM	21.506	1.7573E-02	-2.4686E-11	4.5400E-14	-3.1151E-17	298	429	solid
145	Ir	IRIDIUM	23.347	5.7739E-03	-3.4328E-17	2.3440E-20	-5.5160E-24	298	1809	solid
146	K	POTASSIUM	7.837	7.1983E-02	---	---	---	298	336	solid
147	KBr	POTASSIUM BROMIDE	34.390	1.1766E-01	-2.9798E-04	2.6546E-07	-8.5845E-11	298	1007	solid
148	KCl	POTASSIUM CHLORIDE	39.680	5.8380E-02	-8.1210E-05	5.0100E-08	0.0000E+00	200	1000	solid
149	KF	POTASSIUM FLUORIDE	45.982	1.4422E-02	3.8443E-15	-3.7237E-18	1.2824E-21	298	1130	solid
150	KI	POTASSIUM IODIDE	66.603	-1.0541E-01	2.6297E-04	-2.3479E-07	7.9064E-11	298	954	solid
151	KOH	POTASSIUM HYDROXIDE	-4.100	4.6870E-01	-1.0706E-03	9.4200E-07	0.0000E+00	50	522	solid
152	Kr	KRYPTON	20.786	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	100	6200	gas
153	La	LANTHANUM	25.815	6.6944E-03	-2.6336E-16	2.4699E-19	-8.2601E-23	298	1141	solid
154	Li	LITHIUM	-8.997	3.3378E-01	-1.3341E-03	2.4813E-06	-1.6521E-09	100	454	solid
155	LiBr	LITHIUM BROMIDE	68.390	-1.5919E-01	4.3042E-04	-4.2500E-07	1.5943E-10	298	823	solid
156	LiCl	LITHIUM CHLORIDE	41.417	2.3397E-02	-1.3477E-14	1.5769E-17	-6.6511E-21	298	883	solid
157	LiF	LITHIUM FLUORIDE	16.725	1.3208E-01	-2.0239E-04	1.6126E-07	-4.8053E-11	298	1121	solid
158	LiI	LITHIUM IODIDE	41.903	2.8091E-02	6.6308E-14	-8.7334E-17	4.1888E-20	298	742	solid
159	Lu	LUTECIUM	25.104	6.2760E-03	-6.3338E-17	4.0169E-20	-8.7163E-24	298	2000	solid
160	Mg	MAGNESIUM	19.801	2.2569E-02	-2.4620E-05	2.2489E-08	-7.7607E-12	298	923	solid
161	MgCl2	MAGNESIUM CHLORIDE	31.946	2.2965E-01	-4.2858E-04	3.7372E-07	-1.2269E-10	298	987	solid
162	MgO	MAGNESIUM OXIDE	-8.000	2.4690E-01	-3.7660E-04	1.9830E-07	0.0000E+00	200	800	solid
163	Mn	MANGANESE	15.292	5.4688E-02	-7.7529E-05	6.7461E-08	-2.2097E-11	298	990	solid
164	MnCl2	MANGANESE CHLORIDE	42.233	1.7706E-01	-3.2746E-04	2.9913E-07	-1.0323E-10	298	923	solid
165	Mo	MOLYBDENUM	21.715	6.9371E-03	6.4610E-17	-2.9498E-20	4.5417E-24	298	2890	solid
166	MoF6	MOLYBDENUM FLUORIDE	41.680	4.1131E-01	-6.0261E-04	4.0311E-07	-1.0025E-10	298	1500	gas
167	MoO3	MOLYBDENUM OXIDE	30.322	2.3631E-01	-3.7096E-04	3.0598E-07	-9.4632E-11	298	1068	solid
168	NCl3	NITROGEN TRICHLORIDE	30.253	1.7432E-01	-2.1734E-04	1.1642E-07	-2.2436E-11	100	2000	gas
169	ND3	HEAVY AMMONIA*	34.574	-1.2581E-02	8.8906E-05	-7.1783E-08	1.8569E-11	100	1500	gas
170	NF3	NITROGEN TRIFLUORIDE	18.732	1.5505E-01	-1.4305E-04	5.3741E-08	-5.8443E-12	100	1500	gas
171	NH3	AMMONIA	33.573	-1.2581E-02	8.8906E-05	-7.1783E-08	1.8569E-11	100	1500	gas
172	NH3O	HYDROXYLAMINE	21.935	1.0340E-01	-5.8693E-05	1.0557E-08	1.5150E-12	200	1500	gas
173	NH4Br	AMMONIUM BROMIDE	95.159	-2.5788E-03	1.3674E-05	-3.2219E-08	2.8462E-11	273	293	solid
174	NH4Cl	AMMONIUM CHLORIDE	34.757	1.1150E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	458	700	solid
175	NH4I	AMMONIUM IODIDE	60.291	7.1764E-02	-7.8705E-14	9.6400E-17	-4.2746E-20	298	824	solid
176	NH5O	AMMONIUM HYDROXIDE	---	---	---	---	---	---	---	liquid
177	NH5S	AMMONIUM HYDROGENSULFIDE	---	---	---	---	---	---	---	solid
178	NO	NITRIC OXIDE	33.227	-2.3626E-02	5.3156E-05	-3.7858E-08	9.1197E-12	50	1500	gas
179	NOCl	NITROSYL CHLORIDE	28.551	7.5899E-02	-9.4410E-05	6.0476E-08	-1.5054E-11	100	1500	gas
180	NOF	NITROSYL FLUORIDE*	27.551	7.5899E-02	-9.4410E-05	6.0476E-08	-1.5054E-11	100	1500	gas
181	NO2	NITROGEN DIOXIDE	32.791	-7.4294E-04	8.1722E-05	-8.2872E-08	2.4424E-11	50	1500	gas
182	N2	NITROGEN	29.414	-4.5993E-03	1.3004E-05	-5.4759E-09	2.9239E-13	50	1500	gas
183	N2F4	TETRAFLUOROHYDRAZINE	12.422	3.0609E-01	-3.1077E-04	1.3914E-07	-2.2235E-11	100	1500	gas
184	N2H4	HYDRAZINE	23.630	9.1270E-02	2.9042E-05	-7.1858E-08	2.5093E-11	100	1500	gas
185	N2H4C	AMMONIUM CYANIDE*	52.812	9.1270E-02	2.9042E-05	-7.1858E-08	2.5093E-11	100	1500	gas
186	N2H6CO2	AMMONIUM CARBAMATE	---	---	---	---	---	---	---	solid
187	N2O	NITROUS OXIDE	23.219	6.1984E-02	-3.7989E-05	6.9671E-09	8.1421E-13	100	1500	gas
188	N2O3	NITROGEN TRIOXIDE	28.509	1.6895E-01	-1.8161E-04	9.9662E-08	-2.1975E-11	100	1500	gas
189	N2O4	NITROGEN TETRAOXIDE	29.587	2.2719E-01	-2.2740E-04	1.0698E-07	-1.9223E-11	50	1500	gas
190	N2O5	NITROGEN PENTOXIDE	63.710	1.2317E-01	-5.9937E-05	1.1842E-08	-8.1522E-13	200	6000	gas
191	Na	SODIUM	14.791	4.4228E-02	4.6243E-09	-9.2264E-12	6.8903E-15	298	371	solid
192	NaBr	SODIUM BROMIDE	41.654	4.4400E-02	-4.6524E-05	2.1650E-08	0.0000E+00	200	1000	solid

** A computer program, containing data for all compounds, is available for a nominal fee (Carl L. Yaws, Box 10053, Lamar University, Beaumont, TX 77710, phone/FAX 409-880-8787). The computer program is in ASCII which can be accessed by other software.

$$C_p = A + B T + C T^2 + D T^3 + E T^4 \quad (C_p = \text{joule/g-mol K, } T = \text{K})$$

NO	FORMULA	NAME	A	B	C	D	E	TMIN	TMAX	PHASE
193	NaCN	SODIUM CYANIDE	68.399	7.7953E-04	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	298	835	solid
194	NaCl	SODIUM CHLORIDE	36.710	6.2770E-02	-6.6670E-05	2.8000E-08	0.0000E+00	200	1074	solid
195	NaF	SODIUM FLUORIDE	18.360	1.6682E-01	-3.1756E-04	2.7570E-07	-8.3700E-11	200	1200	solid
196	NaI	SODIUM IODIDE	48.877	1.2054E-02	-3.1542E-15	3.5205E-18	-1.4126E-21	298	933	solid
197	NaOH	SODIUM HYDROXIDE	-31.800	8.4550E-01	-3.0665E-03	5.0706E-06	-2.9200E-09	60	592	solid
198	Na2SO4	SODIUM SULFATE	-8.040	9.3400E-01	-2.2370E-03	2.1350E-06	0.0000E+00	59	458	solid
199	Nb	NIOBIUM	23.723	4.0166E-03	-2.2179E-17	1.0763E-20	-1.7590E-24	298	2740	solid
200	Nd	NEODYMIUM	36.372	-6.8306E-02	1.6672E-04	-1.3166E-07	3.8858E-11	298	1135	solid
201	Ne	NEON	20.786	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	100	1500	gas
202	Ni	NICKEL	-13.157	2.7626E-01	-7.0013E-04	8.2194E-07	-3.7096E-10	298	630	solid
203	NiC4O4	NICKEL CARBONYL*	69.830	8.9853E-02	-2.4575E-05	-2.8140E-08	1.4023E-11	100	1500	gas
204	NiF2	NICKEL FLUORIDE	72.258	1.0293E-02	5.2390E-17	-2.7624E-20	4.9116E-24	298	1723	solid
205	Np	NEPTUNIUM	---	---	---	---	---	---	---	solid
206	O2	OXYGEN	29.526	-8.8999E-03	3.8083E-05	-3.2629E-08	8.8607E-12	50	1500	gas
207	O3	OZONE	31.467	1.4982E-02	6.7966E-05	-8.4157E-08	2.7205E-11	50	1500	gas
208	Os	OSMIUM	23.556	3.8493E-03	4.0482E-17	-2.6647E-20	6.0441E-24	298	1877	solid
209	OsO5	OSMIUM OXIDE PENTAFLUORIDE	---	---	---	---	---	---	---	gas
210	OsO4	OSMIUM TETROXIDE - YELLOW	24.585	2.4934E-01	-3.3236E-04	2.1344E-07	-5.0476E-11	298	1500	gas
211	OsO4	OSMIUM TETROXIDE - WHITE	24.585	2.4934E-01	-3.3236E-04	2.1344E-07	-5.0476E-11	298	1500	gas
212	P	PHOSPHORUS - WHITE	4.400	1.2200E-01	-2.5300E-04	2.2765E-07	-7.1400E-11	31	317	solid
213	PBr3	PHOSPHORUS TRIBROMIDE	56.758	1.0427E-01	-1.6430E-04	1.1542E-07	-2.9670E-11	298	1500	gas
214	PCl2F3	PHOSPHORUS DICHLORIDE TRIFLUORIDE*	20.696	4.7099E-01	-7.8406E-04	5.6105E-07	-1.4442E-10	100	1500	gas
215	PCl3	PHOSPHORUS TRICHLORIDE	27.213	2.4066E-01	-3.9532E-04	2.8032E-07	-7.1695E-11	100	1500	gas
216	PCl5	PHOSPHORUS PENTACHLORIDE	25.701	4.7099E-01	-7.8406E-04	5.6105E-07	-1.4442E-10	100	1500	gas
217	PH3	PHOSPHINE	32.964	-1.4201E-02	1.3216E-04	-1.1915E-07	3.2843E-11	100	1500	gas
218	PH4Br	PHOSPHONIUM BROMIDE*	62.034	-1.4201E-02	1.3216E-04	-1.1915E-07	3.2843E-11	100	1500	gas
219	PH4Cl	PHOSPHONIUM CHLORIDE*	61.942	-1.4201E-02	1.3216E-04	-1.1915E-07	3.2843E-11	100	1500	gas
220	PH4I	PHOSPHONIUM IODIDE*	62.037	-1.4201E-02	1.3216E-04	-1.1915E-07	3.2843E-11	100	1500	gas
221	POCl3	PHOSPHORUS OXYCHLORIDE	23.911	3.2446E-01	-5.0571E-04	3.4836E-07	-8.7607E-11	40	1500	gas
222	PSBr3	PHOSPHORUS THIOBROMIDE	63.322	1.6822E-01	-2.5688E-04	1.7681E-07	-4.4843E-11	298	1500	gas
223	PSCl3	PHOSPHORUS THIOCHLORIDE	27.454	3.3554E-01	-5.4132E-04	3.7986E-07	-9.6538E-11	100	1500	gas
224	P4O6	PHOSPHORUS TRIOXIDE	-26.248	8.7464E-01	-1.2429E-03	8.1470E-07	-1.9988E-10	298	1500	gas
225	P4O10	PHOSPHORUS PENTOXIDE	9.600	5.9230E-01	1.3880E-03	-3.6600E-06	0.0000E+00	20	325	solid
226	P4S10	PHOSPHORUS PENTASULFIDE	-25.525	2.3950E+00	-6.9192E-03	9.9713E-06	-5.3678E-09	30	560	solid
227	Pb	LEAD	23.552	9.7404E-03	-2.9945E-14	4.4267E-17	-2.4109E-20	298	601	solid
228	PbBr2	LEAD BROMIDE	77.781	9.2048E-03	2.1995E-13	-3.1856E-16	1.6938E-19	298	640	solid
229	PbCl2	LEAD CHLORIDE	60.760	4.1535E-02	1.4883E-14	-1.9009E-17	8.8300E-21	298	768	solid
230	PbF2	LEAD FLUORIDE	54.940	6.4425E-02	-9.8385E-13	1.4615E-15	-7.9884E-19	298	613	solid
231	PbI2	LEAD IODIDE	75.312	1.9665E-02	-3.7105E-13	5.1367E-16	-2.6034E-19	298	680	solid
232	PbO	LEAD OXIDE	41.455	1.5330E-02	6.9602E-14	-8.9876E-17	4.2208E-20	298	762	solid
233	PbS	LEAD SULFIDE	46.434	1.0263E-02	-3.9829E-16	3.2805E-19	-9.5043E-23	298	1387	solid
234	Pd	PALLADIUM	24.225	5.7488E-03	-7.4914E-17	5.1613E-20	-1.2204E-23	298	1823	solid
235	Po	POLONIUM	20.292	2.0418E-02	2.7009E-12	-4.4052E-15	2.6616E-18	298	527	solid
236	Pt	PLATINUM	24.250	5.3764E-03	-9.8794E-17	6.0617E-20	-1.2748E-23	298	2043	solid
237	Ra	RADIUM	20.920	2.0920E-02	-3.7799E-15	4.0654E-18	-1.5696E-21	298	973	solid
238	Rb	RUBIDIUM	13.736	5.6681E-02	3.5243E-06	-7.7226E-09	6.3452E-12	298	312	solid
239	RbBr	RUBIDIUM BROMIDE	48.534	1.0669E-02	-5.0051E-15	5.6215E-18	-2.2585E-21	283	953	solid
240	RbCl	RUBIDIUM CHLORIDE	48.116	1.0418E-02	-4.8316E-15	5.2698E-18	-2.0526E-21	283	988	solid
241	RbF	RUBIDIUM FLUORIDE	59.623	-8.2079E-02	2.2230E-04	-1.8584E-07	1.8584E-11	298	1048	solid
242	RbI	RUBIDIUM IODIDE	48.534	1.1004E-02	-8.4558E-16	1.0369E-18	-4.5189E-22	283	913	solid
243	Re	RHENIUM	24.695	2.7522E-03	2.2393E-06	-7.2768E-10	8.3708E-14	298	3453	solid
244	Re2O7	RHENIUM HEPTOXIDE	113.266	6.8782E-01	-3.3492E-03	7.2466E-06	-5.8789E-09	298	318	solid
245	Rh	RHODIUM	21.966	1.0042E-02	2.6411E-17	-1.5094E-20	2.9416E-24	298	2239	solid
246	Rn	RADON	20.794	-3.9576E-15	4.4438E-18	-1.9112E-21	2.7806E-25	298	3000	gas
247	Ru	RUTHENIUM	21.966	6.2760E-03	5.4587E-16	-4.7849E-19	1.4756E-22	298	1308	solid
248	RuF5	RUTHENIUM PENTAFLUORIDE	---	---	---	---	---	---	---	solid
249	S	SULFUR	25.639	-7.9870E-03	4.7860E-06	-9.5700E-10	0.0000E+00	273	1500	gas
250	SF4	SULFUR TETRAFLUORIDE	15.486	3.1315E-01	-4.4453E-04	2.9083E-07	-7.1213E-11	298	1500	gas
251	SF6	SULFUR HEXAFLUORIDE	-7.934	5.1224E-01	-6.4878E-04	3.7509E-07	-8.1524E-11	100	1500	gas
252	SOBr2	THIONYL BROMIDE	48.491	1.0815E-01	-1.4791E-04	9.4987E-08	-2.2463E-11	298	1500	gas
253	SOCl2	THIONYL CHLORIDE	34.838	1.4750E-01	-1.7837E-04	9.4399E-08	-1.8111E-11	100	2000	gas
254	SOF2	SULFUROUS OXYFLUORIDE	18.639	1.9505E-01	-2.5689E-04	1.5983E-07	-3.7838E-11	298	1500	gas
255	SO2	SULFUR DIOXIDE	29.637	3.4735E-02	9.2903E-06	-2.9885E-08	1.0937E-11	100	1500	gas
256	SO2Cl2	SULFURYL CHLORIDE	18.553	2.9713E-01	-4.2391E-04	2.7784E-07	-6.7857E-11	100	1500	gas
257	SO3	SULFUR TRIOXIDE	22.466	1.1981E-01	-9.0842E-05	2.5503E-08	-7.9208E-13	100	1500	gas
258	S2Cl2	SULFUR MONOCHLORIDE	51.240	1.1549E-01	-1.6270E-04	1.0449E-07	-2.4709E-11	298	1500	gas
259	Sb	ANTIMONY	22.343	8.9538E-03	-8.4656E-15	9.6707E-18	-3.9802E-21	298	903	solid

** A computer program, containing data for all compounds, is available for a nominal fee (Carl L. Yaws, Box 10053, Lamar University, Beaumont, TX 77710, phone/FAX 409-880-8787). The computer program is in ASCII which can be accessed by other software.