

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix - Travail - Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I
ECOLE NORMALE SUPERIEUR
D'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE
D'EBOLOWA
DEPARTEMENT DE GENIE
ELECTRIQUE



REPUBLIC OF CAMEROUN

Peace - Work - Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I
HIGHER TECHNICAL TEACHER
TRAINING COLLEGE OF
EBOLOWA
DEPARTMENT OF ELECTRICAL
ENGINEERING

**Filière
Electrotechnique (ET)**

CONCEPTION D'UN INCINERATEUR POUR HÔPITAUX

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de
Professeur d'Enseignement Technique et Professionnel de deuxième
grade (DIPET II)

Par : ETOGA NDONGO Hubert Divin

Sous la direction de
Dr ONANENA Raïssa
Assistant, Université de Yaoundé I
Pr ELE Pierre
Professeur UYI

Année Académique : 2019 - 2020



DEDICACE :

Je dédie ce travail à ma maman,

Mme **MENGUE Sylvie Marguerite**

REMERCIEMENTS :

Je tiens à remercier sincèrement :

- Le président de jury, **Pr. NDJAKOMO ESSIANE Salomé** qui a accepté de présider le jury de la soutenance de ce travail
- Madame le Directeur de l'ENSET d'Ebolowa et également Chef de Département du Génie Electrique, **Pr. NDJAKOMO ESSIANE Salomé** pour avoir mis tous les moyens à sa disposition pour que nous ayons la meilleure formation possible.
- **Pr. ELE Pierre**, coordonnateur du CURES, pour avoir été le Directeur de mon mémoire
- **Dr ONANENA Raïssa** pour m'avoir encadré et m'avoir toujours poussé dans mes retranchements afin que je donne le meilleur de moi,
- **Dr KOUMI Simon** pour avoir accepté d'examiner ce travail,
- Particulièrement nos enseignants **M. NYATTE Samson** et **M. PESDJOCK Mathieu** pour les conseils prodigués,
- **M. MBELE Daniel** pour son aide précieuse,
- Tout le personnel enseignant qui nous a encadré durant notre formation sans oublier le personnel administratif
- Ma maman **MENGUE Sylvie Marguerite** et mon papa **NDONGO ETOGA Hubert** pour le soutien sans faille qu'ils me portent jusqu'à présent, et mon frère **NTSAMA NDONGO Adrien Joel** pour sa disponibilité,
- A ma grande sœur **ENYEGUE Julienne Murielle** pour l'énorme soutiens dont elle a fait preuve à mon égard,
- Toute ma famille qui ne cesse de m'encourager dans mes projets,
- Mes camarades et amis qui ont été d'un énorme soutien
- A tous ceux qui de près ou loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

GLOSSAIRE :

Ar: Argon

CHU : Centre Hospitalier Universitaire

CMA : Centre Médical d'Arrondissement

CO₂ : dioxyde de carbone

CO: Monoxyde carbone

C_p: Capacité thermique du système à pression constante (J/Kg/K)

CSI : Centre de Santé Intégré

CURES : Centre Universitaire de Recherche sur l'Energie pour la Santé

DASRI : Déchets d'Activités de Soins à Risques Infectieux

DBM : Déchets Biomédicaux

DH : Déchet Hospitalier

e : erreur

Fuzzy Logic : Logique floue

GDBM : Gestion Déchets Biomédicaux

h : hauteur de la chambre de combustion (m)

H₂: Dihydrogène

H₂O: Molécule d'eau

HC : Hôpital central

HCl : Chlorure d'Hydrogène

HD : Hôpital de district

HP : Hôpital Provincial

HV : Hépatite Virale

I : intensité du courant

MINEP: Ministère de l'Environnement et de la Protection de la nature

MINSANTE : Ministère Santé Publique

N₂: Diazote

NO_x : Monoxyde d'azote

O₂ : dioxygène

OVH : Oxydation en Voie Humide

P : Pression

PID : Proportionnel, Intégral, Dérivateur

Q : quantité de chaleur (J/kg)

R : constante des gaz parfaits (R=8,314 J/mol.K)

r : consigne

SO₂: Dioxyde de soufre

T : Température (°C ou K)

THA : Trypanosomiase Humaine

USA : United State of America

u (k) : commande

V : volume (L)

x_f : avancement final de réaction (mol)

y : sortie

α: Rapport cyclique hacheur

Δe: Variation de l'erreur

ΔH : enthalpie (J/kg)

Δ_rH: Enthalpie de combustion

Δu: Variation de la commande

λ : coefficient stœchiométrique

μ_{ci} : Facteur d'appartenance condition i

$\mu_{oi}(\mathbf{u})$: Facteur d'appartenance opération i

RESUME :

Les facteurs tels que l'expansion démographique, l'urbanisation et le développement technologique lié à l'industrialisation sont à l'origine de la prolifération des déchets de toute nature particulièrement de déchets biomédicaux. Ces déchets peuvent être source de plusieurs maux pour l'environnement et les hommes car ils sont le réservoir de parasites, de micro-organismes, de bactéries, virus... Pour que les patients, les acteurs de la santé, le personnel d'entretien et les populations en général puissent profiter d'un environnement sain dans lequel ils seront le moins exposés possible aux maladies, il est indispensable d'adopter une politique de gestion des déchets efficace. Le Cameroun en particulier dispose d'un certain nombre d'infrastructures sanitaires qui produisent des quantités non négligeables de déchets biomédicaux et comme la plupart des pays du tiers monde, il fait face à des difficultés de gestion de sa production de déchets. Les solutions actuelles de gestion de déchets biomédicaux au Cameroun étant éprouvés, un plan d'urgence de gestion des déchets biomédicaux chapeauté par le MINSANTE a vu le jour ces dernières années.

Pour accompagner la démarche du gouvernement, le CURES étant un Centre de recherche pour la santé, pour apporter sa contribution au projet du gouvernement a pensé à la mise sur pied d'un outil technologique avec les moyens disponibles sur place pour contribuer efficacement à la gestion des déchets biomédicaux. Cet outil n'est rien d'autre qu'un incinérateur à double chambre pouvant porter la combustion jusqu'à 1200°C, à ce niveau de température, les déchets sont complètement détruits, leur volume est considérablement réduit. L'incinérateur conçu a une contenance de 60kg, une hauteur de plus de 4m partant de la base au sommet de la cheminée d'évacuation des fumés. La structure du bâti est principalement faite de briques réfractaires et le brûleur qui est l'organe principal contrôle la température de combustion sur la base de la logique floue.

Mots clés : Incinérateur, déchets biomédicaux, logique floue, brûleur, briques réfractaires, température, combustion

ABSTRACT :

Factors such as demographic expansion, urbanization and technological development linked to industrialization are responsible for the proliferation of waste of all kinds, particularly biomedical waste. These wastes can be a source of many ills for the environment and humans because they are the reservoir of parasites, micro-organisms, bacteria, viruses... In order for patients, health care providers, maintenance staff and the general population to benefit from a healthy environment in which they will be the least possible exposed to disease, it is essential to adopt an effective waste management policy. Cameroon in particular has a number of health facilities that produce significant amounts of biomedical waste, and like most Third World countries, it faces challenges in managing its waste generation. The current solutions of biomedical waste management in Cameroon being proven, an emergency plan of biomedical waste management headed by the MINSANTE was born in recent years.

To support the government's approach, CURES being a Centre for Research on healthcare, has considered the establishment of a technological tool with the means available on site to effectively contribute to the management of biomedical waste. This tool is nothing more than a double chamber incinerator that can carry the combustion up to 1200 °C, at this temperature level, the waste is completely destroyed, its volume is considerably reduced. The designed incinerator has a capacity of 60 kg, a height of more than 4m from the base to the top of the smoke stack. The structure of the frame is mainly made of refractory bricks and the burner which is the main organ controls the combustion temperature on the basis of fuzzy.

Keywords: Incinerator, biomedical waste, fuzzy logic, refractory bricks, burner, temperature, combustion

TABLE DES MATIERES

DEDICACE :	_____	i
REMERCIEMENTS :	_____	iii
GLOSSAIRE :	_____	iv
RESUME :	_____	vii
ABSTRACT :	_____	viii
TABLE DES MATIERES :	_____	ix
LISTE DE FIGURES :	_____	xii
LISTE DES TABLEAUX :	_____	xiv
INTRODUCTION :	_____	1
CONTEXTE :	_____	3
1. Situation sanitaire du Cameroun :	_____	3
2. Les infrastructures sanitaires au Cameroun[11] :	_____	4
3. Evaluation de la gestion des déchets au Cameroun[11]:	_____	5
a) Typologie et caractérisation des déchets hospitaliers :	_____	5
b) Estimation de la production de déchets solides au Cameroun :	_____	7
c) Orientations politiques de la gestion des déchets au Cameroun :	_____	8
d) Traitement et disposition des déchets biomédicaux au Cameroun :	_____	8
PROBLÉMATIQUE :	_____	9
1. Impacts des déchets biomédicaux sur le personnel et l’environnement :	_____	9
a) Impacts environnementaux[12] :	_____	9
b) Impacts des déchets biomédicaux sur les populations riveraines/ personnes exposés [12] :	_____	10
c) Risques liés à la mauvaise gestion des déchets biomédicaux dans les formations sanitaires[12] :	_____	11
d) Impacts socio-culturels :	_____	12
2. Limites des solutions existantes servant d’alternative à la gestion des déchets biomédicaux :	_____	12
3. Intérêt de notre travail :	_____	13
Chapitre I : ETAT DE L’ART	_____	15

introduction :	16
I. Rappels sur la combustion [15]:	17
1. Comburant :	17
2. Combustibles :	18
3. Produits de combustion :	18
4. Combustion stœchiométrique :	18
5. Combustion non stœchiométrique :	19
6. Combustion non complète :	19
II. les différents procédés de traitement thermiques des déchets [16] :	20
1. les procédés d'oxycombustion :	20
2. les procédés d'oxydation haute température par PLASMA :	21
3. les procédés d'oxydation en voie humide :	21
4. La pyrolyse :	21
5. La Gazéification :	22
6. les procédés de valorisation énergétiques :	22
7. les procédés de traitement des fumées :	23
III. les types d'incinérateurs :	23
1. classification selon la nature des déchets :	23
2. classification selon la continuité de fonctionnement :	24
3. classification selon la configuration du four :	24
4. cas particulier des incinérateurs pour hôpitaux :	24
IV. travaux pertinants sur la conception d'incinérateur :	26
Chapitre II : METHODES ET OUTILS	30
I. logique floue utilisée pour le contrôle	31
Introduction :	31
Définition :	32
1. Historique de la logique floue [21]:	32
2. Théorie des ensembles flous [21] :	33
a) Notion d'appartenance partielle :	33
b) Fonction d'appartenance :	33
3. Principe de la logique floue :	34
4. Etapes de mise en œuvre d'un contrôleur flou	35
a) Fuzzification [22]:	35

b) Inférence :	36
c) Défuzzification :	37
d) Amélioration d'un régulateur flou :	38
5. Avantages et inconvénients du contrôle flou [24]:	39
II. METHODE DE CONCEPTION DE L'INCINERATEUR :	39
1. Choix de la technologie d'incinérateur :	41
2. Description du fonctionnement de l'incinérateur à double chambre :	41
3. le brûleur :	43
a) Séquence de fonctionnement brûleur :	48
b) Modélisation de la régulation du brûleur :	50
4. le bâti :	62
III. les outils :	65
CHAPITRE III :RESULTATS ET COMMENTAIRES	66
I. résultats :	67
1. Simulations Matlab :	67
2. Simulation proteus :	69
II. Evaluation du coût du projet grandeur nature :	72
CONCLUSION:	74
BIBLIOGRAPHIE :	75
ANNEXES :	77

LISTE DE FIGURES :

Figure 1-	DBM dans la nature et collecte par les populations riveraines à l'Hôpital Régional de Garoua [12]	10
Figure 2-	Briques de terre, ciment non adapté ce qui engendre les cassures[13]	13
Figure 3-	Hauteur de la cheminée inférieure à 3m[13]	13
Figure 4-	Répartition de l'énergie émise par un corps noir en fonction de la longueur d'onde	17
Figure 5-	Modèle chambre primaire [13]	27
Figure 6-	Estimation des réactifs de la combustion et des émissions en fonction du type de déchet en utilisant la logique floue [17]	28
Figure 7-	Différence entre un ensemble classique et un ensemble flou[21].	33
Figure 8-	1-fonction caractéristique ____ 2- fonction d'appartenance[21]	34
Figure 9-	Fonction d'appartenance, variable et terme linguistique[21]	34
Figure 10-	Principe de la logique floue	35
Figure 11-	Processus contrôlé par contrôleur flou [22]	36
Figure 12-	Incinérateur à double chambre[25]	42
Figure 13-	Dessin simplifié d'un incinérateur à double chambre en fonctionnement avec brûleur présent dans la chambre primaire	42
Figure 14-	Brûleur weishaupt fioul [26]	43
Figure 15-	Exemple constitution interne brûleur fioul [27]	44
Figure 16-	Schéma simplifié de notre brûleur	44
Figure 17-	Organigramme fonctionnement brûleur	49
Figure 18-	Schéma bloc régulation de température de combustion incinérateur chambre primaire	51
Figure 19-	Fonction d'appartenance de l'erreur	52
Figure 20-	Fonction d'appartenance variation de l'erreur	53
Figure 21-	Fonction d'appartenance commande	55

Figure 22-	Commande moteur via hacheur (transistor 2N2222) _____	57
Figure 23-	Hacheur dévolteur _____	57
Figure 24-	Catalogue d'électrovanne SMC série PVQ[28] _____	58
Figure 25-	Schéma fonctionnement électropompe _____	58
Figure 26-	Electropompe 12V utilisé pour notre prototypage _____	59
Figure 27-	Ventilateur utilisé pour le prototypage (ventilateur pc) _____	60
Figure 28-	Schéma régulation système déterminé _____	60
Figure 29-	Schéma de simulation des circuits du brûleur _____	61
Figure 30-	Schéma de simulation de la régulation floue du brûleur _____	61
Figure 31-	Transfert de chaleur à travers une brique _____	63
Figure 32-	Schéma Incinérateur double chambre _____	64
Figure 33-	Représentation du système floue dans Matlab _____	67
Figure 34-	Graphe 3D commande fonction de err et d_err _____	67
Figure 35-	Test 1 sur Matlab _____	68
Figure 36-	Test 2 Matlab _____	68
Figure 37-	Test 3 Matlab _____	69
Figure 38-	Erreur=600, d_erreur=600, commande=0,92 _____	69
Figure 39-	Erreur=190, d_erreur=455, commande=0,69 _____	70
Figure 40-	Erreur=0, d_erreur=0, commande=0,5 _____	70
Figure 41-	Erreur=-600, d_erreur=-600, commande = 0,08 _____	71
Figure 42-	Erreur = -436, d_erreur=-160, commande = 0,32 _____	71

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau.1:	Production journalière des déchets hospitaliers _____	7
Tableau.2:	Technologies utilisées pour la destruction des déchets au Cameroun [12] ____	9
Tableau.3:	Classification selon la configuration du four_____	24
Tableau.4:	Etude comparative des performances des différentes technologies _____	25
Tableau.5:	Avantages et inconvénients de la logique floue _____	39
Tableau.6:	Méthodologie de conception de notre incinérateur _____	40
Tableau.7:	Parties du brûleur_____	45
Tableau.8:	Séquences de fonctionnement brûleur_____	50
Tableau.9:	Composition statistique des déchets (Ontario, Canada) en pourcentage de masse et énergie maximale de combustion par kg _____	62
Tableau.10:	Evaluation coût brûleur _____	72
	Etant donné que pour un incinérateur à double chambre, nous avons un brûleur primaire et secondaire, ce coût doit être multiplié par deux soit : 2 510 000 Fcfa _____	72
Tableau.11:	Evaluation coût du bâti _____	73

INTRODUCTION :

Les déchets, surtout les déchets dangereux, constituent un problème propre à chaque pays, parce qu'indéniablement liés au développement des industries, mais aussi à l'urbanisation grandissante et à l'accroissement démographique. Ainsi, naissent et croissent des problématiques liées au traitement de ces déchets, ceux-ci se caractérisant généralement par l'impossibilité de les réemployer. Leur stockage, leur recyclage ou leur élimination ne sont donc pas sans risque pour l'environnement et les populations, surtout lorsqu'ils sont dangereux. Ils requièrent donc des moyens financiers et un niveau technologique important, ce qui est de nature à créer des disparités entre les pays développés et les pays du tiers monde. Si les premiers font face à une production importante de déchets dangereux de par leur niveau technologique et industriel, ils peuvent aussi disposer d'une plus grande capacité à traiter ces déchets sans mettre en danger l'environnement. Les seconds dont la faible industrialisation peut laisser penser qu'ils sont moins concernés par la question des déchets dangereux, sont certainement moins aptes à y faire face. Par ailleurs, les déchets dangereux ne sont pas nécessairement des déchets industriels [1]. Qu'un pays appartienne à l'une ou l'autre catégorie, ils n'échappent donc pas à cette hydre moderne. En témoignent les cas de déversements de déchets dangereux dans la nature (décharges à ciel ouvert, enfouissements, déversements dans les cours et points d'eaux) et de sites contaminés que l'on enregistre aussi bien dans des pays développés que pauvres [2].

L'identification des déchets dangereux en droit camerounais a révélé que ceux-ci peuvent émaner de sources diverses. Il a également été constaté que le territoire camerounais abritait de nombreuses activités sources de déchets dangereux. A titre de rappel, l'on a évalué à 5 600 t/an la production de Déchets Industriels Spéciaux et à 5 000 t/an celle de déchets hospitaliers dangereux [3]. Si certains de ces déchets peuvent être revalorisés ou incinérés, il n'en va pas de même pour tous. Les déchets liquides, par exemple sont plus difficiles à traiter. C'est dire qu'il y a une réelle production de déchets dangereux au Cameroun, alors qu'il n'existe pas toujours sur place les installations de traitement appropriées. L'exportation devient donc une solution rationnelle, au risque de voir ces déchets finir dans la nature sans traitement adéquat.

Justement, cette solution est retenue par certains producteurs locaux de déchets dangereux. C'est le cas de Total et British American Tobacco [3]. Au demeurant, il ne s'agit pas d'une infraction, ni d'une violation des règles internationales, dans la mesure où les Conventions de Bâle et de Bamako autorisent certains mouvements transfrontières de déchets dangereux. Elles se

contentent juste d'en fixer les règles, chose à laquelle le droit camerounais s'intéresse apparemment peu.

Dans ce travail, notre intérêt est spécifiquement tourné vers les déchets médicaux qui constituent un réel danger pour les populations et l'environnement car ce sont des réservoirs de micro-organismes responsables de maladies. La gestion des déchets hospitaliers constitue une préoccupation majeure pour le MINSANTE car en effet une absence généralisée d'un système de gestion efficaces des déchets est constatée dans nos formations sanitaire. Une justification de cette situation vient du fait que l'acquisition d'une technologie dédiée à cet effet est très onéreuse et requiert l'exploitation par un personnel qualifié pour une utilisation sur la durée. Pour faire face tant bien que mal à cette situation, les formations sanitaires utilisent des techniques dangereuses, peu efficace et souvent nocives pour l'environnement. La croissance rapide du développement urbain n'aidant pas cette cause, il devient urgent de mettre à la disposition des formations sanitaires une technologie peu onéreuse construite localement afin d'assurer la continuité de traitement des déchets médicaux, maîtriser la technologie tout en préservant l'environnement.

Ce travail a pour objectif la conception un INCINERATEUR POUR HOPITAUX localement donc peu onéreux comparé à ce qui est proposer à l'étranger pour apporter un début de solution à cette crise de gestion des déchets médicaux dans notre pays. Pour ce faire, après avoir situé clairement le contexte et la problématique, dans le chapitre un, nous évoquerons l'état de l'art de l'incinérateur avant d'exposer dans le chapitre deux la méthode de conception utilisée pour enfin dans le dernier chapitre présenter les résultats obtenus. La conclusion viendra faire le bilan du travail effectué et posera les bases pour des perspectives à venir.

CONTEXTE :

Avant de poursuivre, nous allons clarifier quelques mots et concepts clés.

Le **déchet** au sens premier s'entend d'un résidu[4] qui ne peut être conservé. C'est donc le reliquat de la consommation ou d'une quelconque activité et qui n'est plus utilisable [5], [6]. C'est à peu de chose près la conception contenue dans cette définition légale : « *est déchet au sens de la présente loi tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou, plus généralement, tout bien meuble abandonné ou que son destinataire destine à l'abandon* »[7]. La Convention de Bâle définit les déchets comme « *des substances ou des objets qu'on élimine, qu'on a l'intention d'éliminer ou qu'on est tenu d'éliminer en vertu des dispositions du droit national* » [8]. La Convention de Bamako adopte juste une conception plus large, en employant le terme « *matières* » à la place de celui « *d'objets* », employé par la Convention de Bâle [8].

Les **déchets dangereux** sont donc des déchets qui ont une capacité de nuisance avérée sur la santé humaine ou l'environnement, et cela de manière directe ou indirecte, à court, moyen ou long terme. Rentreront généralement dans la catégorie des déchets dangereux, la plupart des déchets industriels, hospitaliers. Il s'agira de déchets présentant des propriétés explosive, comburante, inflammable, irritante, nocive, toxique, cancérogène, corrosive, infectieuse, mutagène, écotoxique ou radioactive [8]. A cela, peuvent s'ajouter deux catégories au moins de déchets dangereux ou potentiellement dangereux qui sont sources de risques émergents. Ce sont les déchets issus des nanotechnologies et de l'industrie des biotechnologies (ou de la recherche dans ce domaine) [9].

La **gestion des déchets** quant à elle désigne « *l'ensemble des opérations de collecte, transport, recyclage et l'élimination des déchets, y compris la surveillance des sites d'élimination* » [10]. Pour être plus précis, il faut dire que ce terme doit englober les opérations de collecte, stockage, transport, traitement, élimination, surveillance des sites d'élimination, mais aussi la prévention et la réduction des déchets ou de leur toxicité [5].

1. SITUATION SANITAIRE DU CAMEROUN :

Le Cameroun dispose d'un certain nombre d'infrastructures sanitaires malgré les disparités régionales et les problèmes liés à la qualité de service. Le système d'assainissement collectif est presque inexistant dans les grandes villes du pays. Le contrôle de qualité des aliments ne s'opère pas de manière efficace faute d'un laboratoire de contrôle de qualité viable et d'une

insuffisance de personnel qualifié. L'enlèvement des déchets urbains est régulier uniquement dans les villes de Yaoundé et Douala. Il faut cependant relever l'absence d'une politique intégrée en matière de santé et environnement [11].

Le profil épidémiologique du Cameroun, comme celui de la plupart des pays en Afrique subsaharienne, est dominé par les maladies infectieuses et parasitaires. Il convient cependant de souligner la tendance à l'augmentation de la prévalence de certaines pathologies telles que l'hypertension artérielle, le diabète sucré et les cancers. Par ailleurs, certaines maladies qui avaient considérablement régressé sont en recrudescence : c'est le cas de la tuberculose, de la Trypanosomiase humaine africaine (THA) etc.... La situation épidémiologique se trouve aujourd'hui aggravée par la pandémie galopante de l'infection à VIH/SIDA. Les infections respiratoires, les dermatoses, les maladies gastro-intestinales constituent les principales causes de morbidité après le paludisme dans la population générale. Les indicateurs de santé, eau et assainissement se présentent ainsi [11]:

- Population ayant accès aux services de Santé : 15%
- Taux de mortalité infantile : 77‰
- Naissance suivie par du personnel de santé : 50%
- Taux de couverture vaccinale : 50%
- Taux de personnes ayant accès à l'Eau potable : 44,2%
- Population ayant accès aux services adéquats d'assainissement : 89%

2. LES INFRASTRUCTURES SANITAIRES AU CAMEROUN[11]:

Le Cameroun est divisé en dix provinces sanitaires dénommées « Délégations provinciales de Santé Publique ». Chaque délégation est répartie en districts de santé et le Cameroun en compte ce jour cent soixante-quatorze. La carte sanitaire du pays compte 2474 formations sanitaires réparties en 06 catégories :

- Hôpital Général (cat 1)
- Hôpital Central (cat 2),
- Hôpital Provincial (cat 3),
- Hôpital de District (cat 4),
- Centre Médical d'Arrondissement (cat 5)
- Centres de Santé intégrés (cat 6).

La Stratégie Sectorielle de Santé, la Réforme Hospitalière et le Développement Sanitaire au niveau du district visent l'amélioration de la qualité des soins au Cameroun.

3. EVALUATION DE LA GESTION DES DÉCHETS AU CAMEROUN[11]:

Les déchets hospitaliers concernent l'ensemble des rejets produits au niveau des formations sanitaires. Ils sont constitués de déchets solides et liquides, présentant ou non des risques d'infection, de contamination ou d'intoxication. Ils proviennent des services de diagnostic, de traitement, de prévention ou de recherche en matière de santé, mais aussi des administrations, des services de restauration, de buanderie, des morgues, etc...

a) Typologie et caractérisation des déchets hospitaliers :

L'évaluation de la gestion des **DH** (Déchets Hospitaliers) dans les formations sanitaires fait ressortir quatre principaux types de déchets : les déchets souillés infectieux, les déchets spéciaux non souillés, les déchets ménagers et les eaux usées.

Déchets solides :

Ces déchets peuvent être répartis en deux catégories :

- **Les Déchets d'Activités de Soins à Risque Infectieux (DASRI) :** il s'agit des déchets issus des hôpitaux, centres de santé, cliniques, cabinets médicaux, laboratoire d'analyse médicale, centre de fabrication de produits pharmaceutiques et cabinets vétérinaires et qui contiennent des agents infectieux, ou qui présentent des risques d'infection. Ces déchets sont constitués de :
 - Déchets atomiques (tissus d'organes du corps humain, organes, sang, fœtus, placentas, prélèvements biologiques, éléments d'amputation, autres liquides physiologiques, matériel imbibé des liquides corporels, ...) ;
 - Les déchets atomiques animaux provenant des laboratoires de recherche en santé humaine ;
 - Les déchets non atomiques et non désinfectés, constitués par :
 - Le sang ou autre liquides biologiques provenant des soins d'un patient ;
 - Le matériel jetable provenant de soins chirurgicaux et obstétricaux ;
 - Le matériel jetable ayant été en contact avec du sang ou d'autres liquides biologiques ;
 - Le matériel jetable provenant des soins liés à la dialyse ;

- Les cultures d'agents infectieux et le matériel de laboratoire jetable en contact avec ces cultures provenant des laboratoires de microbiologie ou de pathologie, des laboratoires de recherche ou d'analyse microbiologique ;
 - Les vaccins inutilisables constitués de souches vivantes et les produits de manipulation génétique, ainsi que tout matériel qui a été en contact avec eux ;
 - Tous les objets piquants et tranchants (aiguilles, seringues, lames, verreries, lamelles ou tout autre objet pouvant causer des piqûres ou des coupures) ayant servi à des soins médicaux ou ayant été utilisé dans les laboratoires effectuant de la recherche, du diagnostic, du dépistage, des autopsies.
- **Les déchets toxiques** (substances chimiques, films radiographiques, produits pharmaceutiques, produits radioactifs, déchets à forte teneur en métaux lourds).
 - **Les déchets assimilables aux ordures ménagères** produits par le personnel de santé ou par les accompagnateurs des malades (papiers provenant de bureaux, papiers plastiques d'emballage, boîtes de médicaments vides, flacons et bouteilles vides de médicaments, restes alimentaires provenant des malades et des accompagnants, résidus de cuisines, produits de balayages des cours et d'égouttement des jardins et gazons ; etc.).

Déchets liquides :

Ils sont constitués de résidus de sang, de produits chimiques liquides, de liquides médicaux tels que les liquides de lavage gastrique, de ponction pleurale et cardiaque ainsi que les liquides de drainage post-opératoire et les aspirations bronchiques et gastriques. Le sang constitue un effluent liquide important en raison de son pouvoir de contamination élevé. Les effluents incluent également les eaux de rinçage de films radiologiques, comme les révélateurs et fixateurs, les produits chimiques en laboratoire comme réactifs et les solvants.

Les déchets liquides comprennent aussi les eaux usées ménagères en provenance des salles de bains, des cuisines et buanderies ainsi que les eaux de vannes provenant des toilettes. Les déchets liquides comportent aussi des déchets toxiques (substances chimiques, mercure et composé mercures, films radiographiques, bain de développement, etc...).

Les déchets liquides sont généralement traités comme les eaux usées domestiques : leur évacuation s'effectue au niveau des stations d'épuration rarement fonctionnelles ou dans des

fosses septiques qu'il s'agit de vidanger régulièrement. Le plus souvent, les eaux sont rejetées par la suite dans la nature sans traitement préalable. Ces déchets contiennent parfois des produits toxiques et nécessitant un examen particulier.

b) Estimation de la production de déchets solides au Cameroun :

En règle générale, la production des déchets hospitalier dépend de plusieurs facteurs, notamment les méthodes de gestion, le type de formation sanitaire, le nombre de lits et le taux d'occupation, le nombre de patients traités quotidiennement, le degré de spécialisation des soins pratiqués.

An niveau du Cameroun, aucune étude n'a été effectuée sur le sujet. Les estimations effectuées s'appuient sur les campagnes de pesage effectués lors des missions de terrain et l'exploration des formations sanitaires :

- ❖ HG : 220 kg/jour
- ❖ HC : 175 kg/jour
- ❖ HP : 140 kg/jour
- ❖ HD : 30 kg/jour
- ❖ CMA : 20 kg/jour
- ❖ CSI : 15 kg/jour

Le tableau ci-dessous indique la production journalière de 43 tonnes/jour de DH, soit environ une production annuelle de 15 700 tonnes, calculée sur la base des campagnes de pesages effectuées lors de l'étude. Si on sait que de 20% de ces déchets hospitaliers seulement sont infectieux (déchets biomédicaux ou DBM), la production journalière de DBM serait de **8 562 kg/j (soit 3 125 tonnes/an)**.

	Hôpital Général	Hôpital Central	Hôpital Provincial	Hôpital District	CMA	CSI	TOTAL
Nombre	4	2	9	174	165	2120	2474
Ratio kg/j	220	175	140	30	20	15	
Total production DH (kg/j)	880	350	1260	5220	3300	31800	42810 kg/j
Production de DBM (20%)	176	70	252	1044	660	6360	8562 kg/j

Tableau.1: Production journalière des déchets hospitaliers

c) **Orientations politiques de la gestion des déchets au Cameroun :**

Plusieurs documents traitant de la question de gestion des déchets hospitaliers au Cameroun existent :

Dans la **Stratégie Nationale de Gestion des Déchets Solides** au Cameroun élaboré en 2007 par le MINEP, il a été souligné dans la partie diagnostic, l'insuffisance notoire de la gestion et du traitement des déchets hospitaliers qui sont rejetés dans la nature, mélangés avec les ordures ménagères. Dans ses orientations stratégiques, ce document met l'accent sur les points suivant : sensibilisation et formation des acteurs, la prévention, tri et collecte, traitement et élimination, transparence des mouvements, cohérence de la gestion, contrôle des coûts de gestion.

De nombreux autres documents donnant des orientations politiques à la gestion des déchets existent : **la Stratégie Sectorielle de Santé 2001-2010, la Stratégie Nationale de Santé et Environnement 2003, la Stratégie Nationale sur la Sécurité des Injections et la Gestion du Matériel d'Injection 2002, le Plan National de Gestion de l'Environnement 1998.**

Pour ce qui est des textes d'ordre juridiques et institutionnels sur la gestion des déchets, le Cameroun en dispose à profusion mais le fait est que dans la réalité, l'on peut observer une certaine léthargie si bien que l'on se demande cette situation est vraiment urgente pour les pouvoirs publics.

d) **Traitement et disposition des déchets biomédicaux au Cameroun :**

Le traitement des déchets biomédicaux est caractérisé par une disparité des méthodes d'éliminations. L'enfouissement sauvage et le brûlage à l'air libre constituent les pratiques les plus usuelles dans les centres de santé. Le rejet direct des déchets hospitaliers dans la nature, à même le sol ou dans des bacs à ordures, très souvent mélangés aux ordures ménagères, constitue aussi une pratique très répandue. L'incinération n'est pratiquée que par très peu de formations sanitaires et la plupart des incinérateurs visités ne fonctionnent pas normalement.

L'incinération des déchets dans les petits incinérateurs artisanaux existants s'effectue tant bien que mal à cause de leur valeur énergétique trop faible, surtout quand les déchets sont mouillés par la pluie, ce qui rend la combustion difficile, occasionnant ainsi des dégagements de fortes fumées noires.

Des incinérateurs plus modernes (pyrolyse) ne sont disponibles que dans les hôpitaux tertiaires. Certains d'entre eux ne fonctionnent pas pour cause de manque de combustible et d'entretien.

Le tableau ci-dessus présente les proportions de déchets traités par chaque type d'établissement selon un moyen bien défini (air libre, incinérateur, fosse...etc.).

	HG/CHU	HC	HP	HD	CMA	CSI
Incinérateur	25%	-	-	22.5%	-	26.7%
Brûlage à l'air libre	25%	20%	40%	34.2%	25%	26.5%
Décharge publique	50%	-	-	8.8%	-	-
Fosse à déchets	-	20%	40%	11.4%	50%	20.1%

Tableau.2: Technologies utilisées pour la destruction des déchets au Cameroun [12]

PROBLÉMATIQUE :

1. IMPACTS DES DÉCHETS BIOMÉDICAUX SUR LE PERSONNEL ET L'ENVIRONNEMENT :

La situation des déchets hospitaliers dans les formations sanitaires du Cameroun est relativement préoccupante aux plans environnemental et sanitaire au vu de tous les chiffres énumérés plus haut. Il faut souligner que la défaillance dans la gestion des déchets biomédicaux peut provoquer une pollution chimique et biologique pour l'environnement ; des infections pour les personnels de santé et utilisateurs de services ; la contamination de l'eau de surface et nappes souterraines ; la prolifération des vecteurs de maladies ; l'inconfort et l'insalubrité dans les formations sanitaires. Dans ces conditions, la formation sanitaire, au lieu de permettre aux patients de recouvrer leurs santés, elle devient un lieu critique d'exposition à des pathologies diverses.

a) Impacts environnementaux[12] :

Les déchets biomédicaux constituent un réservoir de micro-organismes potentiellement dangereux susceptibles d'infecter les malades hospitalisés, les agents de la santé et le grand public. Les autres risques infectieux potentiels sont notamment :

- La propagation à l'extérieur de micro-organismes parfois résistants présents dans les formations sanitaires.
- La gestion des DBM, notamment, la manipulation inappropriée des matériels (surtout ceux infectés par le VIH/SIDA) fait peser de graves menaces sur la santé de plusieurs catégories d'acteurs



Figure 1- DBM dans la nature et collecte par les populations riveraines à l'Hôpital Régional de Garoua [12]

b) Impacts des déchets biomédicaux sur les populations riveraines/ personnes exposés [12] :

Les problèmes posés par une mauvaise gestion des DBM revêtent une grande acuité. Les principales personnes exposées dans le processus de gestion des DBM sont :

- Les patients et les professionnels de la santé (personnel médical et paramédical) se trouvant dans les établissements de soins ;
- Les aides-soignants, les servants, les agents d'entretien, les préposés à l'incinération, ...
- En dehors du périmètre hospitalier, les agents des sociétés privées ou des ONG chargés de la collecte, du transport et de la mise en décharge des ordures ménagères mélangées aux DBM ;
- Les récupérateurs informels qui pratiquent de façon permanente ou occasionnelle la fouille des ordures, notamment les femmes et les enfants,
- Les populations qui utilisent des objets hospitaliers récupérés pour les usages domestiques.

c) Risques liés à la mauvaise gestion des déchets biomédicaux dans les formations sanitaires[12] :

Les risques liés à une mauvaise gestion des déchets dans les formations sanitaires portent globalement sur :

- Des blessures accidentelles : risques d'accidents pour personnel de santé ; les enfants qui jouent (ou qui font leurs besoins) sur les décharges d'ordure ainsi que les récupérateurs non avisés ;
- Des intoxications aiguës, des infections nosocomiales et des nuisances pour le personnel de santé et de collecte (odeurs, exposition, manque d'équipements de protection, absence de suivi médical, etc.).

Pour ce qui concerne les infections, les catégories suivantes sont identifiées :

- Les maladies virales telles que le HIV/SIDA l'Hépatite Virale B(HVB) et l'Hépatite Virale A sont principalement exposés à ces pathologies le personnel de santé, les accompagnants, le personnel d'entretien et les populations riveraines des décharges (enfants, récupérateurs, etc.) ;
- Les maladies microbiennes ou bactériennes, telles que la tuberculose, les streptocoques, la fièvre typhoïde, etc. ;
- Les maladies parasitaires, (issues des selles provenant des centres de santé et rejetées dans les dépotoirs publics situés près des habitations) telles que la dysenterie, les ascaris, etc.
- Les infections nosocomiales dues à l'émanation des gaz toxiques, fumées, odeurs nauséabondes au niveau des caniveaux,
- La contamination de la chaîne alimentaire : les animaux domestiques en quête de nourriture au niveau des décharges publiques ou sauvages peuvent ingérer ces types de déchets, ce qui peut entraîner une propagation potentielle des maladies et de contaminants chimiques à travers la chaîne alimentaire.
- Pollution de l'eau (déversements accidentels des poches de sang, liquide de laboratoires et excréta) ;
- Pollution du sol (encombrement des déchets, déversements des déchets dans la nature),
- Risque de pollution de la nappe phréatique (HB d'Abong-Mbang, HR de Bertoua),
- Risque d'eutrophisation,
- Bioaccumulation des éléments lourds dans les cours affectant la faune (HR de Bertoua)

- Risque d'infection, brûlures, d'intoxication

d) Impacts socio-culturels :

Il convient de souligner que les populations riveraines sont très sensibles face à certains types de déchets, notamment anatomiques (amputations, placentas, etc.). Elles sont le plus souvent très exigeantes quant aux modalités de leur élimination. Il serait inacceptable de rejeter ces types de déchets dans les décharges d'ordures.

Dans la plupart des formations sanitaires enquêtés dans le cadre du « projet des appui aux investissements dans le secteur de la santé », ces déchets sont remis aux patients ou aux membres de la famille.

2. LIMITES DES SOLUTIONS EXISTANTES SERVANT D'ALTERNATIVE À LA GESTION DES DÉCHETS BIOMÉDICAUX :

Plusieurs actions visant à apporter des solutions à cette problématique tentent désespérément de proposer des systèmes de traitement servant d'alternative à l'incinérateur moderne, il s'agit principalement des incinérateurs artisanaux, ces derniers sont beaucoup plus semblables à des fours de combustion qu'à des incinérateurs. En effet, plusieurs déficiences sur son efficacité ont été répertoriées ; nous citons entre autres :

- ✓ Une combustion incontrôlée et donc une inefficacité certaine,
- ✓ La structure mécanique du four est construite avec des simples briques de terre ne supportant pas de fortes températures,
- ✓ Les jonctions entre ces briques sont faites avec du ciment utilisé dans les constructions des ménages,
- ✓ La capacité du four n'est pas connue ce qui justifie l'absence d'une balance pour la mesure des quantités entrantes dans l'incinérateur,
- ✓ Aucune spécification technique de ces fours fonctionnant dans un environnement aussi délicat n'est connue,
- ✓ La hauteur des cheminés est généralement inférieur à 1m, ce qui relâche rapidement les gaz dans l'environnement, ce qui représente un petit temps de rétention de ces derniers dans le système, entraînant une émission élevée des poussières de combustion qui se répartie dans l'atmosphère de l'hôpital et augmente les risques de contaminations.
- ✓ L'absence d'un système de régulation de la température a comme conséquence une combustion incontrôlé et incomplète.



Figure 2- Briques de terre, ciment non adapté ce qui engendre les cassures[13]



Figure 3- Hauteur de la cheminée inférieure à 3m[13]

3. INTERET DE NOTRE TRAVAIL :

La situation qui prévaut à l'heure dans notre pays dans la gestion des DBM a induit un plan d'urgence de gestion des déchets biomédicaux et a été mis sur place pour une durée de 3ans par le MINSANTE et rédigé par : **DJOCGOUE Pierre François Socio-environmentaliste** dans lequel le budget pour la mise en place du plan d'action global des activités pour la gestion des déchets biomédicaux dans les formations sanitaires du Cameroun s'élève à **765.000.000 (Sept cent soixante-cinq millions Fcfa)**.

La maîtrise de la gestion des déchets biomédicaux, ainsi que leur traitement se présentent donc comme une urgence vue l'ampleur de la problématique au sein de nos établissements hospitaliers, car ces hôpitaux sont censés fournir un service de qualité dans un cadre saint et doivent donner de l'espoir aux malades qui y vont. La question est donc de savoir : comment améliorer concrètement la gestion des déchets dangereux dans notre pays ? C'est ainsi que le CURES a initié un projet de conception d'un outil technologique local et moins coûteux pouvant contribuer efficacement à la gestion des déchets biomédicaux dans nos formations sanitaire d'où l'intitulé de ce travail : CONCEPTION D'UN INCINERATEUR POUR HOPITAUX.

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART

INTRODUCTION :

La destruction des ordures par le feu est une pratique très ancienne, mais la première incinération systématique n'a été tentée qu'à la fin du XIXe siècle : «crémation», «incinération» ou «destruction» des ordures ménagères sont des procédés mis en œuvre assez récemment dans les villes et les agglomérations, en raison d'impératifs techniques certes, mais aussi parce que, dans la société moderne industrielle (à la différence de la société agraire traditionnelle), l'immense problème posé par les ordures ménagères a nécessité la mise en place de vastes installations.

Pays industriel très urbanisé, la Grande-Bretagne a été le premier pays à pratiquer l'incinération systématique des déchets. Divers facteurs, liés à l'environnement et à l'économie, incitèrent ingénieurs et techniciens britanniques à mettre au point ce « **destructor** », les autres méthodes posant de sérieux problèmes. Il n'était en effet pas possible de constituer des décharges dans un pays où l'étendue de la campagne est si réduite ; déverser les déchets dans la mer représentait une source éventuelle de conflits avec les voisins d'outre-Manche. De plus, la population anglaise était suffisamment dense pour rendre pratiques des systèmes centralisés de destruction d'ordures, telle l'incinération. Quel que soit le dispositif adopté, il devait fonctionner efficacement pour éviter de porter atteinte à la santé du grand public, et économiquement pour ne pas imposer une trop lourde charge financière aux citoyens. Nombre d'ingénieurs pensaient que les **destructors** pourraient remplir ces conditions et que, conçus pour brûler les déchets sans l'apport d'un autre combustible, ils contribueraient aussi à économiser le charbon et autres précieuses sources d'énergie [14].

Entre 1865 et 1910, le **destructor** britannique passe par trois phases de développement :

1. fours à basse température et à combustion lente ;
2. destructors à ventilation artificielle fonctionnant à température plus élevée, dotés d'une plus grande puissance d'incinération et capables de produire de la vapeur pour de multiples usages ;
3. destructors suffisamment puissants pour produire de l'électricité ou pomper divers liquides.

Les fours de la première génération sont conçus uniquement pour brûler les déchets ; on ne veille guère à leur efficacité, non plus qu'à d'éventuelles utilisations secondaires, comme l'emploi de la chaleur produite. Dès 1865, on implante un four sur le rocher de Gibraltar pour détruire les déchets de la garnison britannique. Vers 1870, le premier four municipal est mis en service à Paddington, un faubourg de Londres. La combustion est assurée par ventilation

naturelle, mais l'installation fonctionne mal et produit des fumées malodorantes. La première incinération systématique de déchets à l'échelon municipal est expérimentée à Nottingham en 1874. En 1874-1875, une batterie de huit fours, connus sous le nom de destructors, est mise en service à Manchester. Ces huit fours brûlent chacun cinq tonnes d'ordures ménagères par vingt-quatre heures. Suite à l'expérience de Manchester, Albert Fryer construit en 1876 un destructor amélioré (composé de deux unités) au dépôt de Water Street. D'autres incinérateurs ne tardent pas à être implantés à Ealing, Birmingham, Leeds, Bradford, Derby, etc.

I. RAPPELS SUR LA COMBUSTION [15]:

La combustion est une réaction d'oxydation classique du type :

« Comburant + combustible → produits + chaleur »

Du fait du dégagement de chaleur, la température de la flamme est élevée. Les produits de la combustion solides (suies) se comportent comme des corps noirs. La longueur d'onde émise dépend de la température ($T_{bleu} > T_{jaune}$).

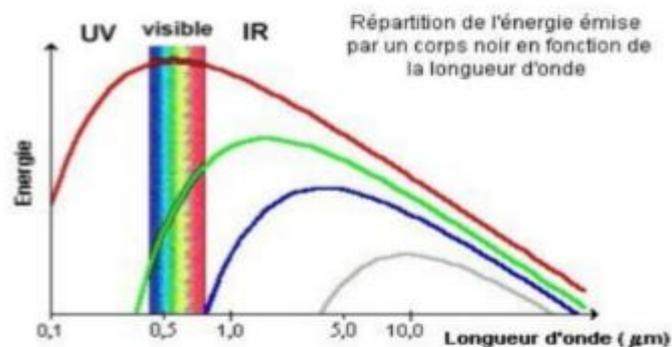


Figure 4- Répartition de l'énergie émise par un corps noir en fonction de la longueur d'onde

1. COMBURANT :

Très souvent, le comburant est l'air. Il contient l'oxygène qui est l'agent oxydant.

Composition de l'air standard			
Composant	Fraction molaire (%)	Masse molaire (g/mol)	Fraction massique (%)
N_2	78.1	28	75.6
Ar + CO_2	0.9	40	1.2
O_2	21	32	23.2
Azote atmosphérique	79	28.15	76.8

Air = 3.76 moles d'azote atmosphérique pour 1 mole d'oxygène.

2. COMBUSTIBLES :

C'est le corps contenant l'agent réducteur. Il peut être gazeux, solide ou liquide

Gaz : mélange d'hydrocarbures gazeux avec éventuellement de l'azote et/ou du dioxyde de carbone. Exemple : gaz naturels, butane et propane commerciaux, air propane, essence...

Liquide : mélange d'hydrocarbures liquides : diesel, fioul domestique, fiouls lourds... contenant des atomes de C, S, H, O, N ; alcools ; ...

Solide : charbons, bois, ...pouvant contenir les mêmes atomes que précédemment.

3. PRODUITS DE COMBUSTION :

Principalement :

- Dioxyde de carbone (CO_2)
- Vapeur d'eau (H_2O)
- Azote (N_2)
- Anhydride sulfureux (SO_2)

Eventuellement :

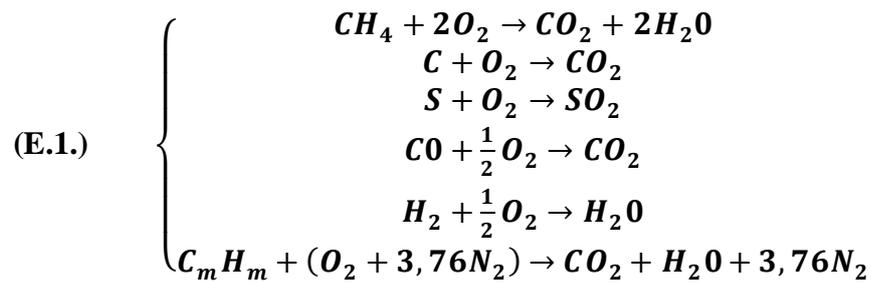
- Dioxygène (O_2)
- Monoxyde de carbone (CO)
- NO_x (NO et NO_2),
- Dihydrogène (H_2)
- Imbrûlés solides (suies...) ou gazeux (hydrocarbures).

Certains de ces produits sont neutres vis-à-vis de l'environnement ou de la santé. D'autres sont considérés comme polluants.

4. COMBUSTION STœCHIMÉTRIQUE :

La combustion est stœchiométrique (neutre) lorsqu'il y'a exactement assez de comburant pour oxyder totalement le combustible ce qui implique que les fumés ne contiennent ni oxygène, ni combustible.

Exemple :



La combustion stœchiométrique conduit à la température de combustion la plus élevée. Par conséquent, elle est considérée comme combustion idéale.

5. COMBUSTION NON STœCHIO MÉTRIQUE :

Dans la pratique, les combustions sont non-stœchiométriques. On veut éliminer les imbrûlés, il faut qu'en tout point, suffisamment d'oxygène soit disponible pour la combustion ce qui implique qu'on opère le plus souvent avec un grand excès d'air ($\lambda > 1$)

Les réactions sont caractérisées par le facteur d'air λ :



L'analyse des fumées sur site permet de définir la qualité de la combustion. Notamment, la présence d'oxygène caractérise une combustion en excès d'air.

6. COMBUSTION NON COMPLÈTE :

On parle de combustion non complète quand il reste des espèces non oxydées (les imbrûlés).

Les causes principales de la présence d'imbrûlés dans les fumées sont :

- Mélange carburant-comburant non homogène soit un manque local d'oxygène
- Température trop basse soit combustion peu réactive (cinétique lente).

II. LES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS DE TRAITEMENT THERMIQUES DES DECHETS [16] :

Plusieurs technologies sont actuellement disponibles en ce qui concerne les procédés d'incinération des déchets médicaux. Ces procédés de traitement thermiques peuvent être classés en plusieurs catégories :

- Les procédés de combustion oxydante fonctionnant à l'air,
- Les procédés d'oxycombustion,
- Les procédés d'oxydation à haute température par plasma,
- Les procédés de pyrolyse,
- Les procédés de gazéification,
- Les procédés d'oxydation en voie humide (OVH).

1. LES PROCÉDÉS D'OXYCOMBUSTION :

Ces procédés, appliqués en traitement thermique des déchets, sont des procédés d'incinération basés sur l'utilisation d'air enrichi ($O_2 > 21\%$), ou bien d'oxygène pur en tant que gaz comburant dans le processus de combustion du déchet. Cette combustion s'effectue à l'intérieur d'un incinérateur. Un incinérateur est un système conçu pour soumettre les matières résiduelles à un traitement thermique afin d'en réduire le volume ou de détruire des substances dangereuses ou pathogènes qui y sont présentes. Il existe deux grands types d'incinérateurs de matières résiduelles : à fonctionnement discontinu et à fonctionnement continu.

Les incinérateurs de matières résiduelles à fonctionnement discontinu sont ceux qui sont chargés avec les matières résiduelles avant que le cycle de combustion ne soit initié, la porte restante fermée jusqu'à ce que les résidus de combustion dans la chambre primaire se refroidissent. La durée du cycle d'un incinérateur de matières résiduelles à fonctionnement discontinu se mesure en heures ; au cours de ce processus, plusieurs paramètres sont importants et doivent être pris en considération afin d'optimiser l'oxydation thermique pour améliorer le rendement de l'incinérateur, notamment :

- **La température** : elle doit être supérieure au point d'auto-inflammation. Mais pas trop élevée pour limiter la production de NO_x .
- **L'énergie d'activation** : elle peut être diminuée en présence d'un catalyseur,

- **La teneur en oxygène** : elle doit être toujours suffisante pour que la réaction puisse se produire (mélange homogène).
- **La turbulence** : elle améliore la convection thermique et assure une répartition homogène de la température évitant ainsi la création de points froids.
- **Le temps de séjour** : il doit être suffisant pour une bonne oxydation.

2. LES PROCÉDÉS D'OXYDATION HAUTE TEMPÉRATURE PAR PLASMA :

Le plasma thermique consiste en un milieu gazeux, partiellement ionisé, réducteur ou oxydant, porté à températures élevées (3000 – 8000⁰ C) par décharge d'arc appliqués dans un gaz en mouvement, à partir d'une électrode (torche à arc transféré), ou entre deux électrodes (torche à arc soufflé).

3. LES PROCÉDÉS D'OXYDATION EN VOIE HUMIDE :

Ces procédés de traitement permettent l'oxydation complète de la fraction organique d'un effluent aqueux ou d'une suspension, par sa mise en contact réactionnelle, au sein d'un réacteur pressurisé, avec un agent oxydant (air, oxygène, peroxyde d'hydrogène), sans vaporisation de l'eau incluse. Ils permettent le traitement de charge organiques comprises entre 1 et 150 g/L. la réaction d'oxydation étant exothermique, les procédés OVH deviennent autothermiques à partir des concentrations de 15 à 20g// en matière organique.

4. LA PYROLYSE :

La pyrolyse des déchets également appelée thermolyse, consiste en un traitement thermique endothermique ($\Delta H > 0$), température modérée, au cours duquel la fraction organique du déchet est décomposée, en l'absence d'air ou en atmosphère réductrice ($O_2 < 2\%$), pour fournir une phase gazeuse et une phase solide.

Les proportions entre les différentes phases formées, leurs compositions respectives ainsi que la répartition des métaux, du soufre, du chlore entre les phases produites, dépendent de la nature des déchets traités et des conditions de la réaction (température, pression, durée...).

Les réacteurs de pyrolyse sont des fours étanches à l'air, donc maintenus en légère surpression. Ces fours sont de taille modérée, compte tenu du volume spécifique, relativement faible, des gaz produits.

5. LA GAZÉIFICATION :

La gazéification d'un déchet résulte d'un processus thermochimique en deux étapes : une étape de pyrolyse suivie d'une étape de gazéification. Ces deux étapes peuvent être réalisées dans la même enceinte thermique ou dans deux réacteurs séparés. L'étape de pyrolyse produit des matières volatiles sous forme d'hydrocarbures gazeux (goudrons) et du coke, essentiellement constitué de carbone fixe. Les hydrocarbures et le carbone fixe sont convertis en gaz combustible (CO, H₂), dans la seconde étape, dite de gazéification, par réactions thermochimiques certains procédés offrent une possibilité de récupération d'énergie de même qu'un système de purification des fumées de combustion avant leur sortie de la cheminée pour l'environnement.

6. LES PROCÉDÉS DE VALORISATION ÉNERGÉTIQUES :

Les fumées issues de la chambre de combustion doivent être refroidies avant leur traitement et leur rejet dans l'atmosphère. Ce refroidissement est principalement assuré avec ou sans récupération de l'énergie calorifique associée via les deux procédés suivants :

- **Récupération d'énergie calorifique** : la chaleur dégagée par la combustion des déchets est récupérée sous forme d'eau ou de vapeur surchauffée dans une chaudière placée en sortie de foyer ou intégré dans celui-ci.

La vapeur produite peut être valorisée de deux façons et parfois simultanément :

- **Alimentation d'un réseau de chauffage** (voie de valorisation principale en cas d'eau surchauffée),
- **Conversion en électricité**, par l'intermédiaire d'une turbine à vapeur couplée à un alternateur.

Dans le cas d'une pyrolyse, le produit majoritaire est soit un coke (pyrolyse lente), soit un gaz combustible (pyrolyse rapide).

Dans le premier cas, le coke produit peut-être valoriser :

Soit par combustion sur place (pyrolyse intégrée), soit après transport, en valorisation par combustion différée (Co-incinération en cimenteries, par exemple) ou, après épuration, utilisés en tant que combustibles secondaires.

Dans le second cas, le gaz de pyrolyse produit peut-être :

- Soit brûlé sur place (pyrolyse intégrée), la récupération d'énergie étant réalisée par chaudière ;
- Soit craqué puis envoyé, après épuration, en moteur à gaz, lui-même couplé à un alternateur.

En gazéification, le produit majoritaire est un gaz combustible généré à haute pression. Celui-ci est en général d'abord refroidi par un circuit à tubes d'eau, alimentant une chaudière à vapeur, puis épuré avant envoi dans une turbine à gaz couplée à un alternateur.

7. LES PROCÉDÉS DE TRAITEMENT DES FUMÉES :

Les polluants contenus dans les fumées de combustion se présentent sous la forme de solides particulaires (poussières) ou sous forme gazeuse (HCl, SO_x, NO_x, . . .). Il convient donc, après refroidissement, d'effectuer des opérations de dépoussiérage et de neutralisation des fumées, avant leur rejet à l'atmosphère. Ce pendant les dispositifs de traitement de des fumées tel que les filtres électrostatiques, qui pièges les particules sensibles à l'électricité coûtent extrêmement chère, et c'est pour cette raison qu'ils ne sont utilisés que pour les grandes installations d'incinérations telle que les usines d'incinérations des déchets ménagers, ou encore les usines d'incinération des déchets industriels. En ce qui concerne les incinérateurs de petite capacité d'incinération seul la maîtrise de la température à l'intérieur du four est suffisante pour garantir une combustion complète et totale, la valeur minimale de la température à l'intérieur d'un incinérateur à double chambre est de 900°C, toute fois une température de 1200°C garantie un traitement plus efficace et plus rapide.

III. LES TYPES D'INCINÉRATEURS :

L'on peut distinguer les incinérateurs suivant plusieurs critères qui sont : la nature des déchets, la continuité de fonctionnement ou encore selon la configuration du four.

1. CLASSIFICATION SELON LA NATURE DES DÉCHETS :

Dans cette catégorie, nous avons :

- ✓ **Les incinérateurs de déchets médicaux,**
- ✓ **Les incinérateurs de déchets ménagers,**
- ✓ **Les incinérateurs pour déchets industriels.**

2. CLASSIFICATION SELON LA CONTINUITÉ DE FONCTIONNEMENT :

✓ **Incinérateur à fonctionnement continu :**

Caractérisé par une capacité de charge illimitée c'est le cas des usines d'incinération, dans ce cas les déchets sont incinérés sans interruption et le four approvisionné de façon continue.

✓ **Les incinérateurs à fonctionnement discontinu :**

Caractérisé par une capacité de charge limitée et donc l'incinération se fait par cycle.

3. CLASSIFICATION SELON LA CONFIGURATION DU FOUR :

Le tableau ci-dessous présente les différents cas de figure qu'on peut avoir en fonction des options qu'offrent le four de combustion.

CARACTERISTIQUES	TYPE
Nombre de chambre	✓ A une chambre (avec brûleur de post combustion) ✓ A deux chambres - Excès d'air dans la chambre primaire - Défaut d'air dans la chambre primaire et excès d'air dans la chambre secondaire
Mode d'alimentation des matières résiduelles	✓ Charge (une charge par cycle) ✓ Intermittent avec système d'injection des matières résiduelles
Mode de retrait des cendres	✓ Charge
Dispositif d'antipollution d'air	✓ Non ✓ Oui (oui diverse technologie)
Utilisation de soufflantes et de ventilateurs	✓ Air forcé (soufflante fournissant l'air à la chambre ou aux chambres de combustion). ✓ Combinaison (soufflante et ventilateur nécessaire pour les systèmes antipollution d'air)
Système de récupération de chaleur	✓ Oui ✓ Non

Tableau.3: Classification selon la configuration du four

4. CAS PARTICULIER DES INCINÉRATEURS POUR HÔPITAUX :

Les technologies de traitement et d'élimination des déchets de soins médicaux peuvent être regroupées en six catégories spécifiques organisées en fonction des catégories de déchets qu'ils permettent de traiter, on distingue ainsi :

- ☞ L'incinération dans les fours rotatifs ou incinérations à doubles chambres ;
- ☞ L'incinération dans les incinérateurs à chambre unique,
- ☞ Le traitement thermal humide (autoclavage) ;

- ☞ La désinfection chimique ;
- ☞ L'irradiation par micro-onde ;
- ☞ Décharges d'ordures sanitaires, y compris la neutralisation et l'encapsulation.

Le tableau ci-dessous présente les différentes technologies de nos jours d'incinérateurs sous le critère du type de déchet pris en compte :

Catégories de déchets	Four rotatif	Incinérateur pyrolytique à double chambre	Incinérateur à chambre unique	Traitement thermique (autoclave)	Désinfection chimique	Irradiation par micro-onde	Décharge sanitaire
A déchets médicaux de soins non dangereux	/	/	/	/	/	/	/
Déchets anatomiques humains	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non
Tranchants ou piquants	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Déchets pharmaceutiques classe B32 et B33	Oui	Pour des petites quantités	Non	Non	Non	Non	Non
Déchets pharmaceutiques à cytotoxique	Oui	Non/oui Pour celle qui sont moderne	Non	Non	Non	Non	Non/oui pour des petites quantités
Déchets infectieux	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Déchets hautement infectieux	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non/oui Après traitement thermique
Autres déchets infectieux	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non/oui Si spécialement conçus
Déchets de soins radioactif	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Spécialement conçu

Tableau.4: Etude comparative des performances des différentes technologies

Nous constatons que l'incinérateur à four rotatif engrange la meilleure performance car il répond oui à la destruction de beaucoup plus de type de déchets que les autres.

IV. TRAVAUX PERTINANTS SUR LA CONCEPTION D'INCINÉRATEUR :

Plusieurs études de conception d'incinérateur ont été réalisées dans le monde en général, nous allons nous attarder ici aux études les plus récentes.

Une étude de conception d'un incinérateur pour hôpitaux a été effectuée par le CURES à l'université de Yaoundé 1 (Cameroun) dans le cadre du mémoire de fin d'étude (voir [13]). La technologie qui a été choisie est celle d'un incinérateur à double chambre car présentant des avantages technico-économiques supérieures aux autres technologies. L'approche adoptée est l'approche de régulation classique utilisée dans presque la totalité des études de conception de systèmes à réguler. Partant de là, une imposante fonction de transfert du système a été établie prenant en compte le maximum de paramètres possibles. Les avantages de cette approche sont : le système est plus ou moins précis et robuste mais les inconvénients de la modélisation ici sont : le système n'est pas généralisable ce qui est un handicap quand on sait que les paramètres de l'environnement peuvent changer à tout moment, la fonction de transfert du système est vraiment lourde ce qui requiert un microcontrôleur robuste donc onéreux sans compter le fait que sa programmation n'est pas une petite affaire. Ci-dessous nous avons les équations relatives au système proposé :

$$\begin{aligned}
 \text{(E.2.)} \quad (\sum_1^5 C_i C_{vi}) \frac{dT}{dt} = & W_{fuel} \left((98,75T + 0,145T^2) - (98,75T_{ref} + \right. \\
 & \left. 0,145T_{ref}^2) \right) + W_{air} \left(\left(a_i T + \frac{b_i}{2} T^2 + \frac{c_i}{3} T^3 + \frac{d_i}{4} T^4 \right) - \left(a_i T_{ref} + \frac{b_i}{2} T_{ref}^2 + \frac{c_i}{3} T_{ref}^3 + \right. \right. \\
 & \left. \left. \frac{d_i}{4} T_{ref}^4 \right) \right) - W_{out}^{gas} \sum_i \frac{M_i}{\sum_k M_k} \left(\left(a_i T + \frac{b_i}{2} T^2 + \frac{c_i}{3} T^3 + \frac{d_i}{4} T^4 \right) - \left(a_i T_{ref} + \frac{b_i}{2} T_{ref}^2 + \right. \right. \\
 & \left. \left. \frac{c_i}{3} T_{ref}^3 + \frac{d_i}{4} T_{ref}^4 \right) \right) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_{in}^4) - hS(T - T_{in}) - (T - T_{ref}) \left(\sum \frac{C_{vi} dC_i}{dt} \right) + Q_{de} - \\
 & M_C C_{PC} (T - T_{ref})
 \end{aligned}$$

$$\text{(E.3.)} \quad \frac{dT_{in}}{dt} = \frac{h_{in} S}{\rho V C_0} (T - T_{in})$$

$$\text{(E.4.)} \quad Q_{de} = m_{dei}(t) X C_{dei}$$

Avec : C_{dei} : chaleur massique de chaque type de déchets, h : le coefficient d'échange convectif, T_{in} : température de la paroi interne du four d'incinération, T_{gaz} : la température des gaz de combustion à l'intérieur du four, S : la surface d'échange convectif (surface latérale et de base de l'incinérateur), ε : émissivité du corps,

σ : constante de Stefan, $C_p(T)$: Chaleur massique à pression constante, T : température à l'intérieur du four d'incinération ; a, b, c, d : représentent les chaleurs massiques

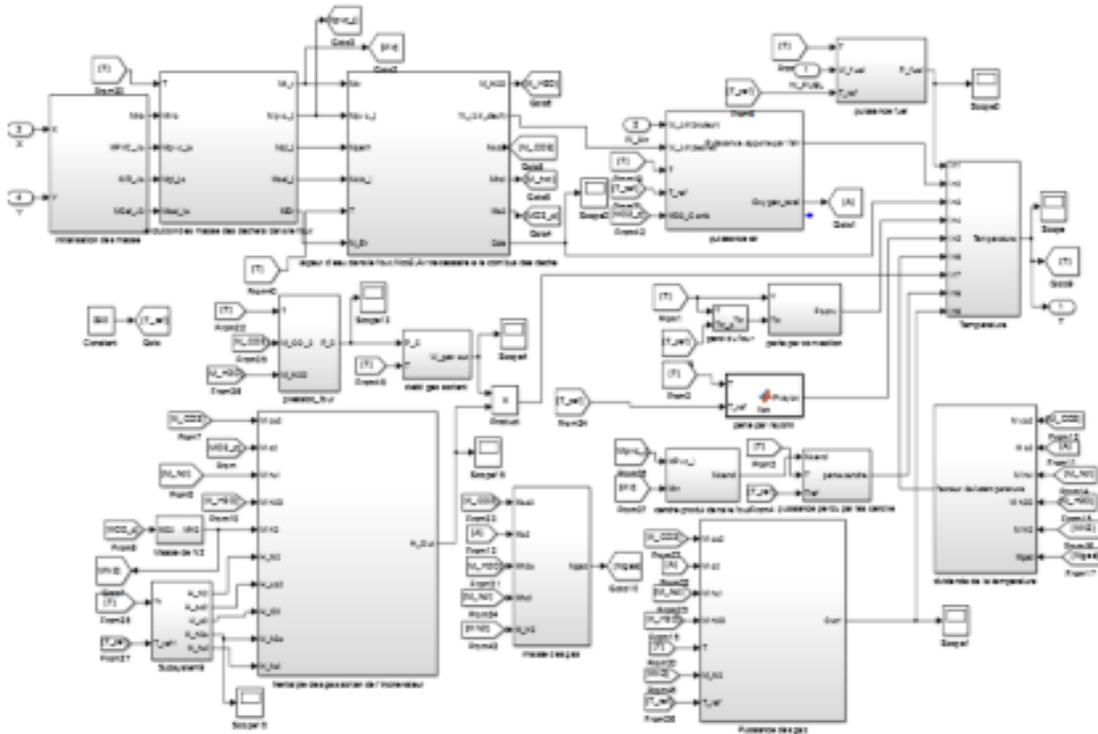
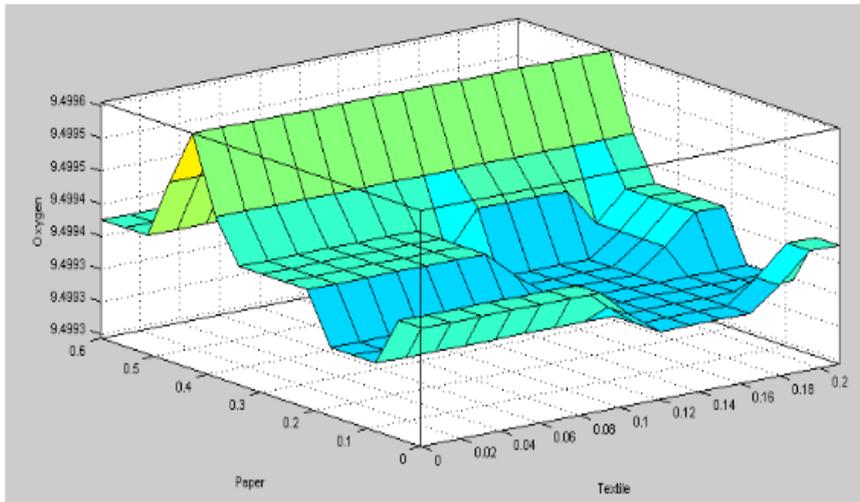
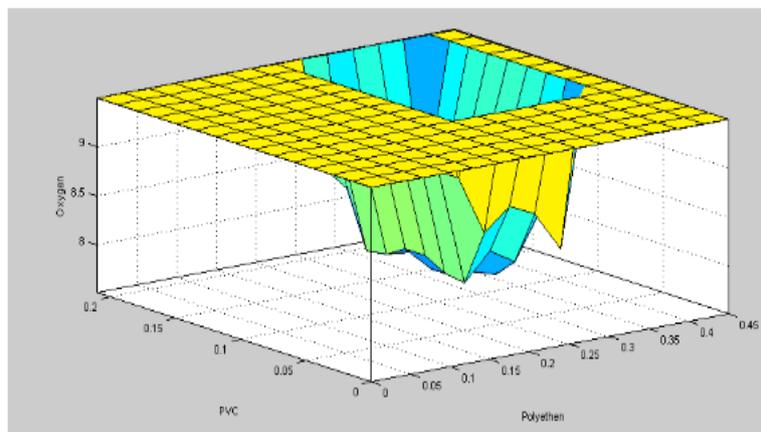


Figure 5- Modèle chambre primaire [13]

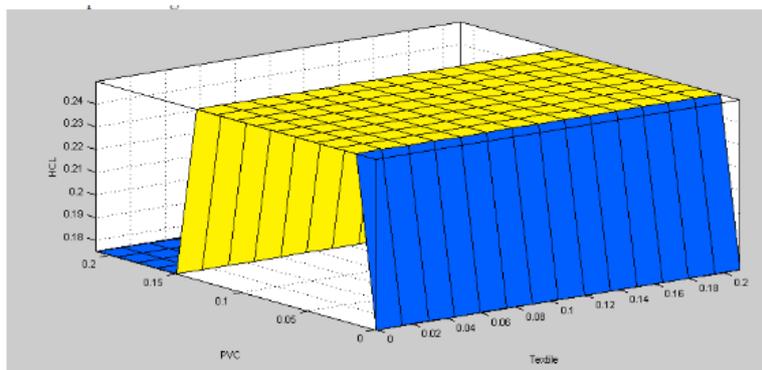
Durant nos lectures, nous avons porté une énorme attention sur les travaux [17]. Dans ce document, il est question de la conception d'un incinérateur à double chambre dont l'étude est basée sur les estimations des quantités des réactifs de la combustion et des quantités des gaz toxiques émis dans la nature après la combustion. Les résultats obtenus sont les suivants :



8.a



8.b



8.c

Figure 6- Estimation des réactifs de la combustion et des émissions en fonction du type de déchet en utilisant la logique floue [17]

Les résultats obtenus aident les opérateurs à faire des prévisions et dont mieux s'organiser sur la gestion des déchets mais ils ne se sont pas attardé un seul instant sur la méthode de régulation pour garantir une température toujours constante dans les chambres de combustion. Cette approche peut être complémentaire à ce que nous allons faire dans ce travail.

Les travaux dans [18] sur l'application de la logique floue sur un système de contrôle de température dans un four on susciter beaucoup d'intérêt dans ce travail. Dans un premier temps un contrôleur classique PID a été utilisé pour le contrôle, puis dans un second temps un régulateur basé sur la logique floue à une entrée puis à deux entrées. Les résultats obtenus dans [18] permettent de montrer que le contrôleur floue fournit de meilleurs performances en rapidité que le régulateur classique avec des erreurs dans le même ordre de grandeur.

V. CONCLUSION :

L'ensemble des solutions que nous avons exploré pour la conception d'incinérateur nous on finalement orienté vers l'utilisation de la logique floue comment moyens de contrôle de la température car si nous utilisons la logique classique, la fonction de transfert robuste de la combustion dans la chambre primaire de notre incinérateur rendre le système lent et même si nous pouvons contourner ce problème en acquérant une unité de calcul très rapide, cela rendra le coût de conception encore plus élevé.

CHAPITRE II : METHODES ET OUTILS

I. LOGIQUE FLOUE UTILISÉE POUR LE CONTRÔLE

INTRODUCTION :

Les méthodes conventionnelles de réglage sont basées sur une modélisation adéquate du système à régler et un traitement analytique à l'aide de la fonction de transfert ou d'équations d'état. Malheureusement, celles-ci ne sont pas toujours disponibles.

Ces techniques de commande ont prouvé leur efficacité dans de nombreux problèmes de régulation industrielle. Les méthodes de commande avancées (Régulateur adaptatif, commande prédictive, commande robuste...) permettent de répondre aux exigences d'un certain nombre de systèmes fortement non linéaires. C'est dans ce même créneau que les méthodes de modélisation et de commande floues se positionnent [19].

La majorité des systèmes industriels complexes sont difficiles à contrôler automatiquement. Cette difficulté provient de :

- Leur non-linéarité,
- La variation de leurs paramètres,
- La qualité des variables mesurables.

Ces difficultés ont conduit à l'avènement et au développement de nouvelles techniques telles que la commande floue particulièrement intéressante lorsqu'on ne dispose pas de modèle mathématique précis du processus à commander ou lorsque ce dernier présente de forts non linéarités ou imprécisions. [20]

Dans plusieurs applications, les résultats obtenus avec un contrôleur flou sont meilleurs que ceux obtenus avec un algorithme de contrôle conventionnel. En particulier, la méthodologie du contrôle flou apparaît utile quand les processus sont très complexes à analyser par les techniques conventionnelles. Plusieurs travaux dans le domaine de commande ont montré qu'un régulateur par logique floue est plus robuste qu'un régulateur conventionnel.

Dans ce chapitre nous allons présenter les contours de la logique floue partant de sa définition passant par le principe de fonctionnement, la méthodologie de conception d'un système floue, présenter les différences entre la commande classique et la commande floue.

DÉFINITION :

La **logique floue** (fuzzy logic, en anglais) est une logique polyvalente où les valeurs des vérités des variables au lieu d'être vrai ou faux sont des réels compris entre 0 et 1. En ce sens, elle étend la logique booléenne classique avec des valeurs de vérités partielles. Elle consiste à tenir compte de divers facteurs numérique pour aboutir à une décision qu'on souhaite acceptable.¹

1. HISTORIQUE DE LA LOGIQUE FLOUE [21]:**Apparition de la logique floue :**

Le terme d'ensemble flou apparaît pour la première fois en 1965 lorsque le professeur Lofti A. Zadeh, de l'université de Berkeley aux USA, publie un article intitulé « Ensembles flous » (Fuzzy sets). Il a réalisé depuis de nombreuses avancées théoriques majeures dans le domaine et a été rapidement accompagné par de nombreux chercheurs développant des travaux théoriques.

Première application :

Parallèlement, certains chercheurs se sont penchés sur la résolution par logique floue de problèmes réputés difficiles. Ainsi en 1975, le professeur Mamdani à Londres développe une stratégie pour le contrôle des procédés et présente les résultats très encourageants qu'il a obtenus sur la conduite d'un moteur à vapeur. En 1978, la société danoise F.L. Smidth réalise le contrôle d'un four à ciment. C'est la première véritable application industrielle de la logique floue.

Essor :

C'est au Japon, où la recherche n'est pas seulement théorique mais également très applicative, que la logique floue connaît son véritable essor. A la fin des années 1980, c'est d'un véritable boum qu'il faut parler. Les produits grand public, machines à laver, appareils photographiques et autres caméscopes estampillés « Fuzzy logic » ne se comptent plus. Dans l'industrie, le traitement des eaux, les grues portuaires, les métros, les systèmes de ventilation et de climatisation sont touchés. Enfin, des applications tels que la finance ou le diagnostic médical.

A partir de 1990, c'est en Allemagne que des applications apparaissent en grand nombre ainsi qu'à une moindre échelle aux USA. Enfin en France, la logique floue devient aujourd'hui une réalité.

2. THÉORIE DES ENSEMBLES FLOUS [21] :

a) Notion d'appartenance partielle :

Dans la théorie des ensembles, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble. La notion d'ensemble est à l'origine de nombreuses théories mathématiques. Cette notion essentielle ne permet cependant pas de rendre compte de situations pourtant simples et rencontrés fréquemment. Parmi les fruits, il est facile de définir l'ensemble des pommes. Par contre, il sera plus difficile de définir l'ensemble des pommes mûres. On conçoit bien que la pomme mûrit progressivement...la notion de pomme mûre est donc graduelle.

C'est pour prendre en compte de telles situations qu'a été créée la notion d'ensembles flous. La théorie des ensembles flous repose sur la notion d'appartenance partielle : chaque élément appartient partiellement ou graduellement aux ensembles flous qui ont été définis. Les contours de chaque ensemble flou ne sont pas « nets », mais « flous » ou « graduels ».

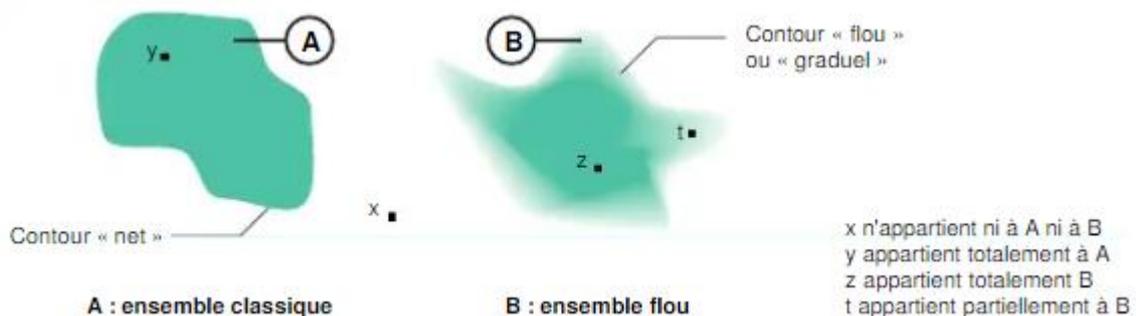


Figure 7- Différence entre un ensemble classique et un ensemble flou[21].

b) Fonction d'appartenance :

Un ensemble flou est défini par sa « fonction d'appartenance », qui correspond à la notion de « fonction caractéristique » en logique classique.

Supposons que nous voulions définir l'ensemble des personnes de « taille moyenne ». En logique classique, nous conviendrons par exemple que les personnes de taille moyenne sont celles dont la taille est comprise entre 1,60 et 1,80. la fonction caractéristique de l'ensemble donne « 0 » pour les tailles hors de l'intervalle [1,60m ; 1,80m] et « 1 » dans cet intervalle. L'ensemble flou des personnes de « taille moyenne » sera défini par une « fonction d'appartenance » qui diffère d'une fonction caractéristique par le fait qu'elle peut prendre n'importe quelle valeur dans l'intervalle [0, 1]. A chaque taille possible correspondra un « degré d'appartenance » à l'ensemble flou des « tailles moyennes », compris entre 0 et 1.

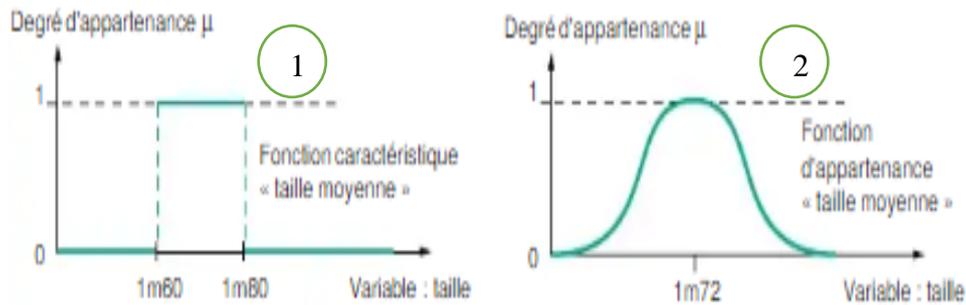


Figure 8- 1-fonction caractéristique — 2- fonction d'appartenance[21]

Plusieurs ensembles flous peuvent être définis sur la même variable, par exemple les ensembles « taille petite », « taille moyenne » et « taille grande », notions explicitées chacune par une fonction d'appartenance.

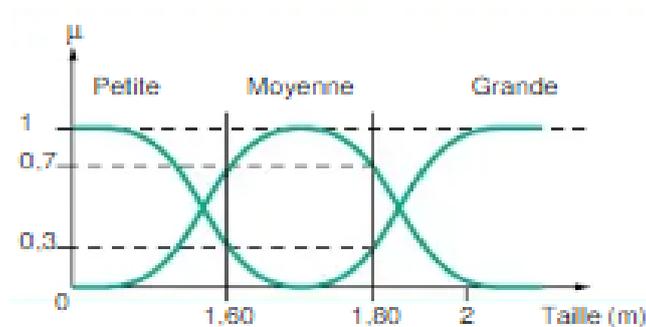


Figure 9- Fonction d'appartenance, variable et terme linguistique[21]

Cet exemple montre la gradualité que permet d'introduire la logique floue. Une personne de 1,80m appartient à l'ensemble « taille grande » avec un degré de 0.3 et à l'ensemble « taille moyenne » avec un degré de 0.7. En logique classique, le passe de moyen à grand serait brusque. Une personne de 1.80 m serait par exemple de taille moyenne alors qu'une personne de 1,81m serait grande, ce qui choque l'intuition. La variable (par exemple taille) ainsi que **termes** (par exemple moyenne, grande) définis par les fonctions d'appartenance portent respectivement les noms de **variable linguistiques** et **termes linguistiques**.

On distingue de nombreuses formes de fonctions d'appartenance parmi lesquelles on peut citer : Les Gaussiennes, les triangulaires, singleton, ...

3. PRINCIPE DE LA LOGIQUE FLOUE :

La commande floue permet de traiter des commandes de processus uniquement à partir des connaissances de comportement qui sont formulées par des spécialistes du procédé en langage naturel (forme linguistique). Cela se fait en trois étapes développées dans la suite.

On part d'entrées physiques pour les transformer en variables linguistiques (langage naturel). Cette opération s'appelle la **fuzzification**.

Les variables linguistiques sont soumises au moteur d'inférence qui se chargera d'appliquer les **règles d'inférences**. Ces règles, dictées par les experts, représentent les connaissances que l'on a du système ou du processus.

La dernière étape est la **défuzzification** qui consiste à transformer les variables linguistiques (flou) produites par les règles d'inférence via le moteur d'inférence en une sorte de commande physique (numérique).

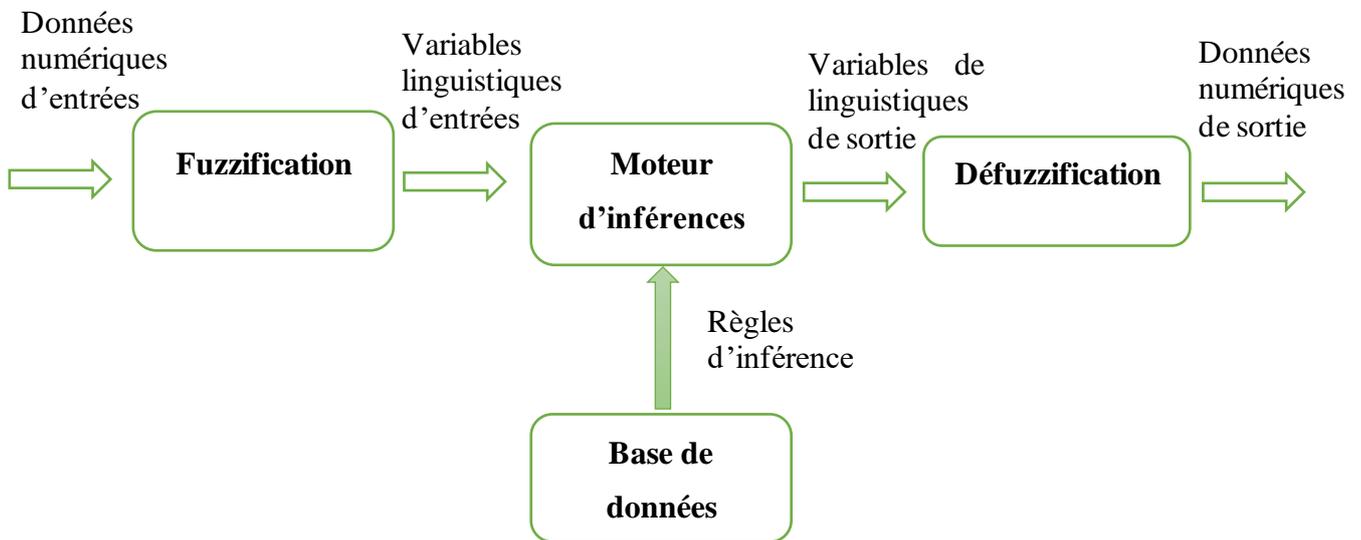


Figure 10- Principe de la logique floue

4. ETAPES DE MISE EN ŒUVRE D'UN CONTRÔLEUR FLOU

a) **Fuzzification [22]:**

L'étape de fuzzification consiste à définir des ensembles flous pour les variables d'entrée et de sortie.

Pour chacune de ces variables, on doit connaître a priori son intervalle de définition. Dans la plupart des cas, le régulateur flou reçoit comme variable d'entrée, l'erreur entre la sortie du processus et le signal de consigne ainsi que la variation de cette erreur.

La dérivée de cette erreur suffit pour représenter sa variation.

Ainsi la loi de commande peut être schématisée comme suit :

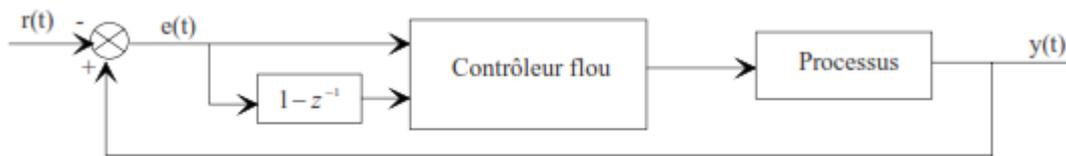


Figure 11- Processus contrôlé par contrôleur flou [22]

Si le contrôleur flou du système est de type PI [22]:

$$(E.5.) \quad \begin{cases} u(k) = u(k-1) + \Delta u \\ \Delta u = K_p \cdot \Delta e + K_i \cdot e \\ e = y - r \\ \Delta e = e(k) - e(k-1) \end{cases}$$

Avec :

- $u(k)$: la commande à l'instant k
- Δu : la variation de la commande
- e : l'erreur ($e(k)$, l'erreur à l'instant k)
- Δe : la variation de l'erreur ($e(k)-e(k-1)$)
- r : la consigne à respecter
- y : la mesure de la réponse du système à la consigne donnée

Ici, on attribue aux différentes variables linguistiques d'entrée des fonctions d'appartenance convenables selon le jugement de l'expert. Cette opération est nécessaire vu que la mesure de la sortie y et la donnée de la référence ou consigne sont toujours exprimées en des variables qui sont nettes et précises et que le régulateur flou ne peut traiter que des variables floues.

b) **Inférence :**

L'inférence est le processus par lequel des actions ou opérations sont prises au fur et à mesure que des informations sur les entrées sont recueillies et ce selon les règles définissant le système. Ils existent plusieurs méthodes d'inférence dont Inférence [23] :

- La méthode d'inférence **max-min** : réalise-le OU reliant les règles par l'opérateur max et le ALORS par l'opérateur min.

- La méthode d'inférence **max-produit** : réalise-le OU reliant les règles par l'opérateur max et le ALORS par l'opérateur produit.
- La méthode d'inférence **somme-produit** : réalise-le OU reliant les règles par l'opérateur somme et le ALORS par l'opérateur produit.

La méthode Mamdani consiste à utiliser l'opérateur min pour le ET et l'opérateur max pour le OU.

[22] Plusieurs règles peuvent être activées en même temps, c'est-à-dire que chacune de leurs prémisses possède un degré d'appartenance non nul. Ceci dépend des types de fonctions d'appartenance utilisées ; en l'occurrence toutes les règles sont, à chaque instant d'échantillonnage, plus ou moins choisit des fonctions d'appartenance de forme Gaussienne.

L'agrégation de ces règles, opération qui doit aboutir à une seule valeur de la variable de sortie, se fait par l'opérateur max, comme si les règles étaient liées par l'opérateur OU.

c) **Défuzzification :**

Lors de la fuzzification, pour chaque variable d'entrée réelle, on calcule ses degrés d'appartenance aux ensembles flous qui lui sont associés.

Dans l'étape de défuzzification, on réalise l'opération inverse, à savoir, obtenir une valeur réelle de sortie à partir des surfaces obtenues dans l'étape d'inférence [22].

Il existe plusieurs méthodes de défuzzification dans la littérature dont la plus souvent efficace que les autres est celle de la **défuzzification par centre de gravité**.

- **La défuzzification par centre de gravité** : cette méthode calcule la loi de commande non flou u^* en tant que l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance de la loi de commande $\mu_{RES}(u)$:

$$(E.6.) \quad u^* = \frac{\int_{-1}^1 u \mu_{RES}(u) du}{\int_{-1}^1 \mu_{RES}(u) du}$$

La loi de commande par la méthode de défuzzification par centre de gravité se programme difficilement en général. Seul dans le cas où la méthode d'inférence somme-produit est utilisé, la programmation de la loi de commande se simplifie énormément. En effet, dans ce cas, la fonction d'appartenance de la loi de commande est donnée par :

$$(E.7.) \quad \mu_{RES}(u) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mu_{ci} \mu_{oi}(u)$$

μ_{ci} : le facteur d'appartenance de la condition i

$\mu_{oi}(\mathbf{u})$: le facteur d'appartenance de l'opération i

m : nombre total de règles

Règle i : Si Condition i Alors Opération i

- **Défuzzification par la moyenne des maximas** : elle correspond à un simple calcul de moyenne arithmétique des valeurs ayant le plus grand degré d'appartenance ;
- **Défuzzification par bissecteur de la surface** :
- **Défuzzification par le plus petit des maximas en valeur absolue,**
- **Défuzzification par le plus grand des maximas en valeur absolue,**

d) Amélioration d'un régulateur flou :

Afin de tester un système avec régulateur flou, l'on doit choisir au préalable les opérateurs logiques et la méthode de défuzzification à utiliser.

Une fois ces paramètres fixés, l'on peut chercher les plages de variation de l'erreur e , de la variation de l'erreur Δe et la variation de la commande $\Delta \mathbf{u}$ des fonctions d'appartenance afin de trouver le réglage qui correspond le mieux à notre cahier des charges.

Afin d'améliorer le régulateur flou, l'on peut agir sur :

- Le changement des formes des fonctions d'appartenances,
- Le rajout des variables linguistiques en entrée (terme linguistique),
- Le rajout des variables linguistiques en sortie,
- Le rajout ou la modification des règles d'inférences.

5. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DU CONTRÔLE FLOU [24]:

Le tableau suivant présente les avantages et les inconvénients qu’il y’a dans l’utilisation du contrôle flou dans la régulation des procédés :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Pas besoin de modèle mathématique • Une théorie simple pour les systèmes complexes • Très performant pour les systèmes pouvant être fortement non linéaire • Pas besoin d’être un expert en automatique (connaissance en automatiques réduites font l’affaire) • Une robustesse de commande vis-à-vis des incertitudes • Une possibilité de commande auto-adaptative aux variations du procédé. 	<ul style="list-style-type: none"> • Une technique de réglage essentiellement empirique • La performance dépend de l’expertise • Pas de certitude d’avoir des réglages optimaux • Pas de théorie générale qui caractérise la stabilité et la robustesse

Tableau.5: Avantages et inconvénients de la logique floue

Pour la mise sur pieds de notre incinérateur, nous aurons besoin des logiciels suivants :

II. METHODE DE CONCEPTION DE L’INCINERATEUR :

La méthodologie de conception de notre incinérateur peut être résumé par l’organigramme qui suit :

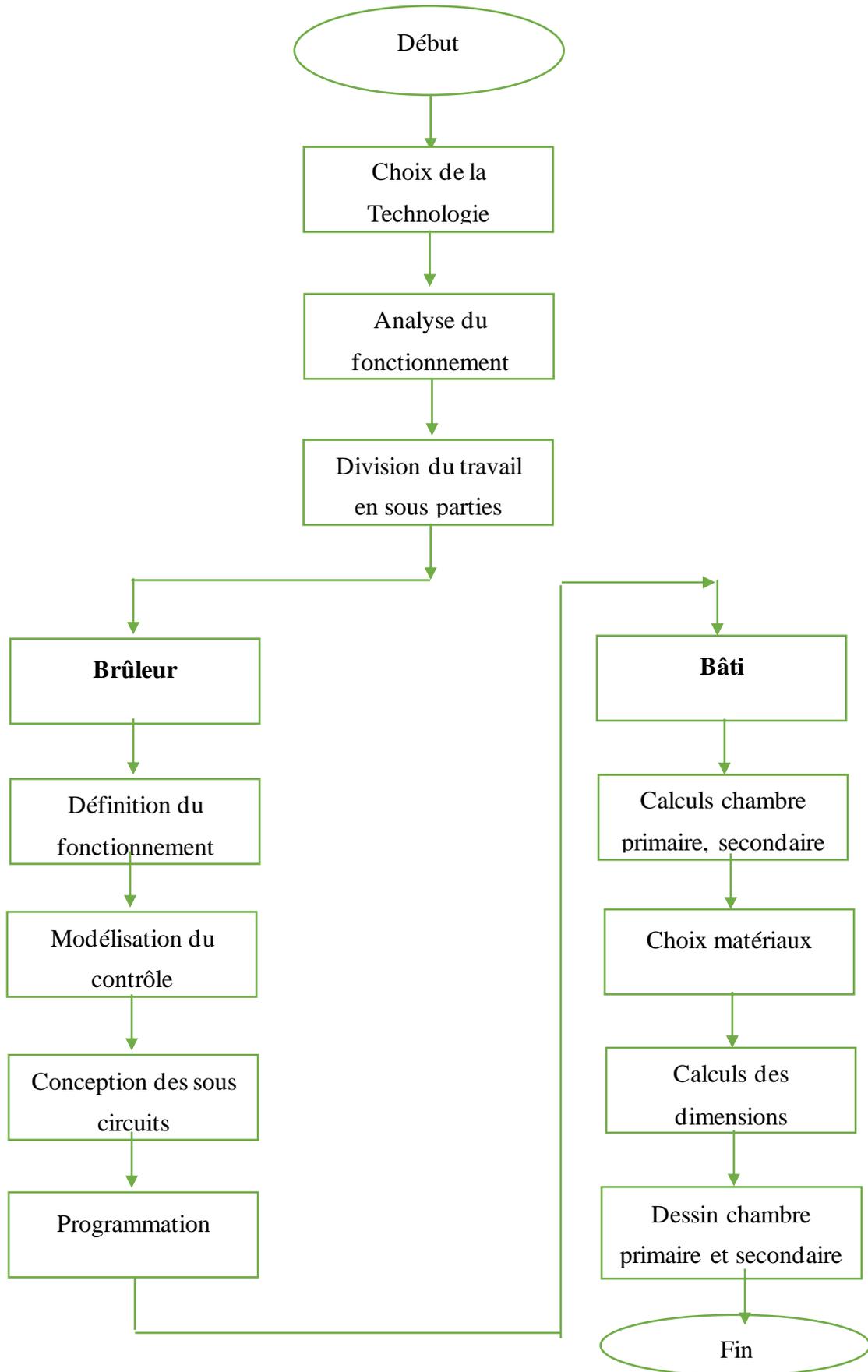


Tableau.6: Méthodologie de conception de notre incinérateur

1. CHOIX DE LA TECHNOLOGIE D'INCINÉRATEUR :

Le tableau ci-dessous n'indique que seules les technologies d'incinérateur à fours rotatifs, à doubles chambres et à chambre unique (technologies se rapprochant le plus de nos objectifs) :

INCINERATION	AVANTAGES	INCONVENIENTS
INCINÉRATEUR PYROLYTIQUE À DOUBLE CHAMBRE (incinération 800-900°C)	<ul style="list-style-type: none"> • Elimination des risques sanitaires grâce à la destruction complète des déchets. Les déchets ne sont pas reconnaissables • Détruits totalement les microorganismes et les déchets tranchants ou piquants 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût de fonctionnement élevé nécessite un personnel qualifié pour son fonctionnement
FOURS ROTATIF (incinération de 1200°C et plus)	<ul style="list-style-type: none"> • Détruits tous les types de déchets organiques. • Des quantités importantes de déchets peuvent être incinérer 	<ul style="list-style-type: none"> • Coûts de maintenance élevés • Durée de vie réduite, • Coûts d'exploitation relativement élevé • Émission des gaz de cheminé toxiques
INCINÉRATEUR À CHAMBRE UNIQUE (Incinération à basse températures 300-400°C)	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne efficacité de désinfection • Réduits efficacement le volume et le poids des déchets • Ne nécessite pas d'opérateur hautement qualifié 	<ul style="list-style-type: none"> • Emission significative de polluant atmosphérique, • Inefficacité dans la destruction des substances chimiques ou des médicaments thermiques résistant. • Ne détruit pas les déchets piquants ou tranchants

Au regard des avantages et inconvénients qu'offrent les différentes technologies d'incinérateur, celle qui a été retenue pour notre projet est la technologie d'incinération à double chambre car elle permet la destruction de presque tout type de déchets à des températures très élevées tout en étant plus économique que la technologie à four rotatif.

2. DESCRIPTION DU FONCTIONNEMENT DE L'INCINÉRATEUR À DOUBLE CHAMBRE :

L'image ci-dessous donne une vue d'ensemble d'un incinérateur à double chambre :

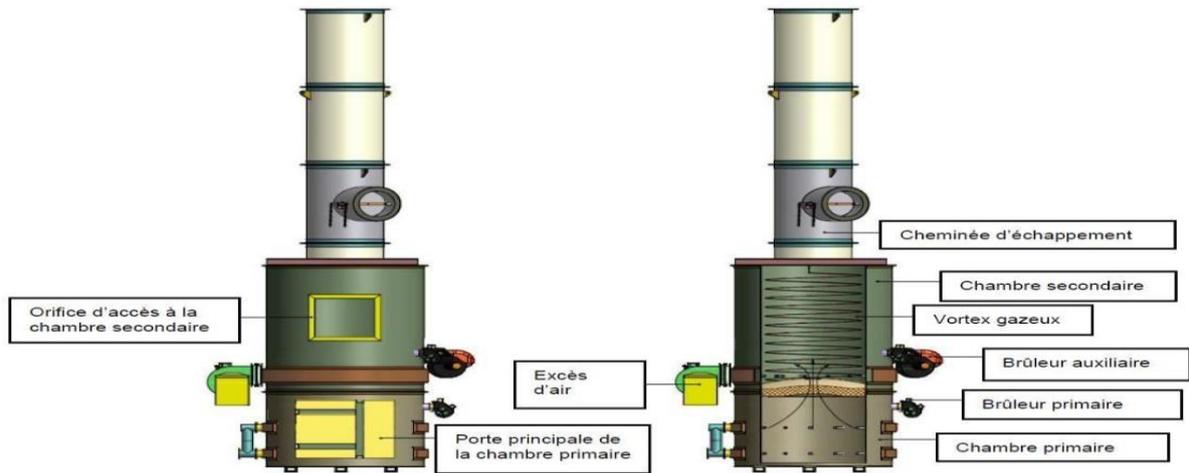


Figure 12- Incinérateur à double chambre[25]

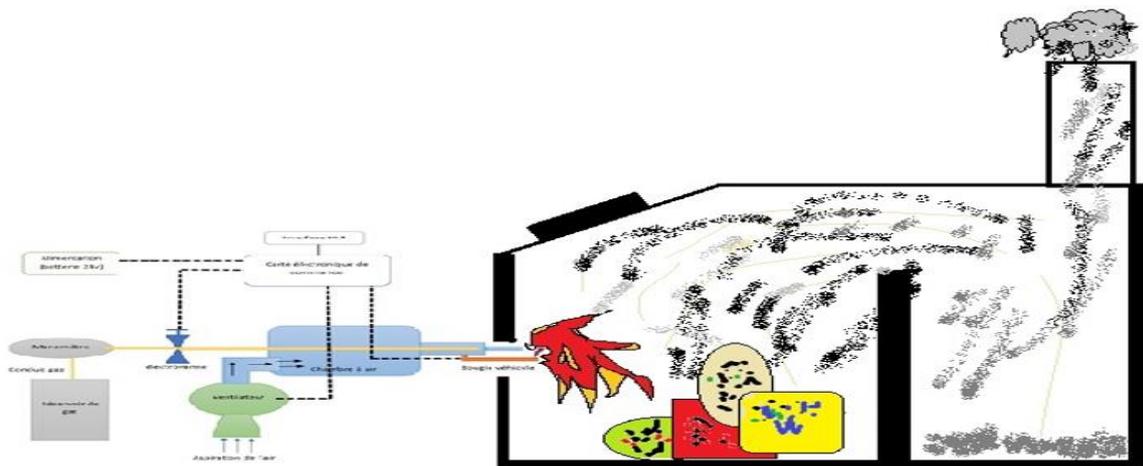


Figure 13- Dessin simplifié d'un incinérateur à double chambre en fonctionnement avec brûleur présent dans la chambre primaire

Tout commence par un tri, une collecte des déchets hospitaliers qui seront ensuite stocker dans des emballages spécifiques, suivant une codification des couleurs, ces emballages fournissent des informations sur la nature des déchets, leurs constitutions et même leur niveau de dangerosité ; ces déchets sont chargés dans le four de l'incinérateur à proportions mesurés, une fois ceci fait, la porte est refermée et le cycle de combustion démarre de façon automatique après verrouillage de la porte.

Chambre primaire : elle a pour fonction de brûler les déchets. En effet, la température de combustion des déchets est amenée à près de 800°C.

Chambre secondaire : elle a pour fonction de brûler les fumées à plus de 1200°C.

Après une durée correspondante à un cycle de fonctionnement ; la température diminue dans les deux chambres et les brûleurs sont mis à l'arrêt. La combustion des fumées est nécessaire dans la mesure où il n'existe pas un dispositif adéquat de traitement de fumées pour des incinérateur de faible capacité ; la combustion dans la chambre secondaire vise à réduire les pourcentages de composants nocifs contenus dans les fumées après combustion (dioxine et de furane). La température est la plus fondamentale des mesures associées au fonctionnement de l'incinérateur dans la mesure où aucun système de purification des fumées n'est utilisé. Une température de combustion de 1200°C garantie des émissions peu dangereuse.

3. LE BRULEUR :

Ci-dessous, nous avons l'image d'un brûleur conçu par une entreprise Allemande et plus loin la constitution interne d'un brûleur typique au fioul :



Figure 14- Brûleur weishaupt fioul [26]

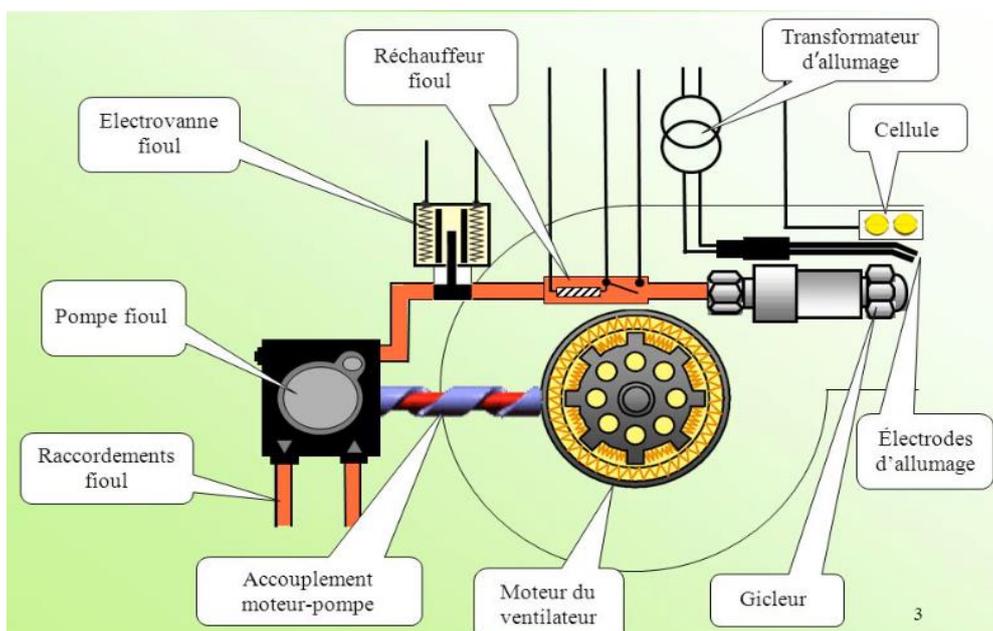


Figure 15- Exemple constitution interne brûleur fioul [27]

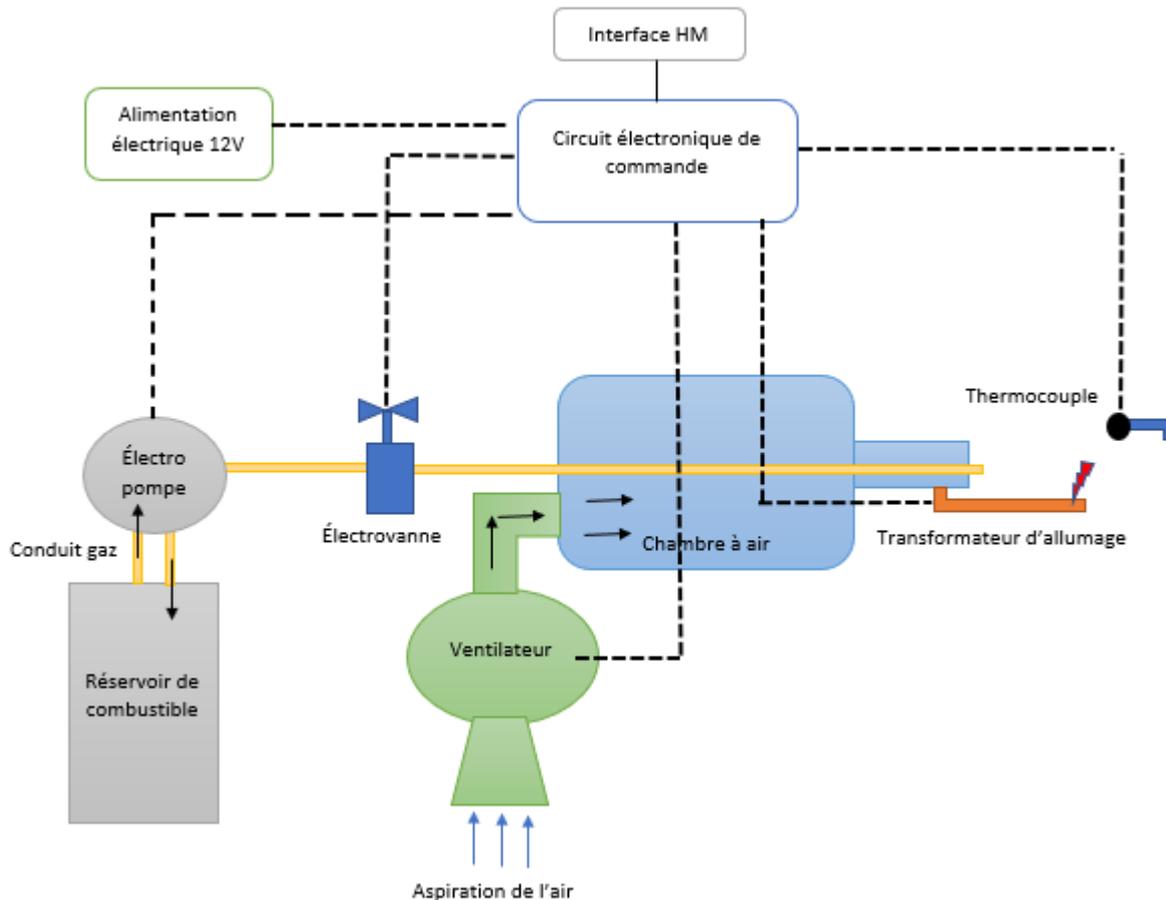


Figure 16- Schéma simplifié de notre brûleur

Un brûleur est un équipement qui permet de créer, développer et entretenir une flamme à la tête de combustion dans des conditions : économiques, automatique, sécuritaire et peu polluante.

Fonctionnement : pour créer la flamme, il faut réaliser le triangle de feu (combustible, comburant, chaleur). Il faudra donc : propulser le combustible, propulser de l'air, mélanger le combustible et l'air dans de bonnes proportions. Créer la flamme grâce à une source de chaleur et porter la combustion à la température désirée.

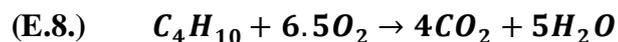
Pour entretenir la flamme, le brûleur mélange continuellement l'air et le combustible dans de bonnes proportions. Afin de faire des économies, il faudra contrôler de façon continue la quantité de combustible injectée.

NOM		FONCTION
RESERVOIR DE COMBUSTIBLE	DE	Contient le combustible utilisé pour la combustion
ELECTROPOMPE		Pompe le combustible du réservoir de combustible à la sortie du gicleur
ELECTROVANNE		Permet de régler la pression avec laquelle le combustible sort du gicleur
TRANSFORMATEUR D'ALLUMAGE		Crée l'étincelle pour le départ de la combustion
VENTILATEUR		Aspire l'air du milieu extérieur pour le refouler à l'intérieur de la chambre à air puis à la tête de combustion
CHAMBRE A AIR		Réserve d'air pour la combustion
ALLUMEUR		Produit l'étincelle pour le départ de flamme
CAPTEUR DE FLAMME		Détecte la présence de la flamme et envoi l'information à l'unité de commande
CAPTEUR DE TEMPERATURE	DE	Capte la valeur de la température de la flamme et envoi l'information à l'unité de commande
CIRCUIT DE COMMANDE	DE	Assure le bon fonctionnement séquentiel du système et la régulation de température
ALIMENTATION		Fournit l'énergie au système de contrôle, commande et régulation
INTERFACE HM		Permet à l'opérateur d'entrer des consignes

Tableau.7: Parties du brûleur

▪ **Variable d'entrée de commande pour faire varier la température de sortie :**

Pour choisir la variable sur laquelle agir pour faire varier la température en sortie, nos réactifs sont le butane C_4H_{10} (combustible) et le dioxygène de l'air O_2 (comburant), la formule de réaction est :



L'enthalpie d'une combustion représente l'énergie libérée lors de la combustion d'une mole de réactif (butane)

Dans notre cas, la réaction est exothermique et nous admettons les conditions standard de réaction qui sont :

- la pression est constante $P=1\text{bar}$
- la réaction a lieu dans une enceinte adiabatique avec $T=25^\circ\text{C}=298\text{k}$
- le système est dit fermé
- L'enthalpie de réaction est donc calculée par :

$$(E.9.) \quad \Delta H = \sum r_i H_{i_{\text{produits}}} - \sum r_i H_{i_{\text{réactifs}}}$$

Avec les données suivantes : $\Delta_f H^0(\text{CO}_2) = -393,51 \text{ kJ/mol}$, $\Delta_f H^0(\text{H}_2\text{O}) = -241,83 \text{ kJ/mol}$, $\Delta_f H^0(\text{O}_2) = 0 \text{ kJ/mol}$ car le dioxygène est un corps pur

Soit : $\Delta H = 4\Delta_f H^0(\text{CO}_2) + 5\Delta_f H^0(\text{H}_2\text{O}) - \Delta_f H^0(\text{C}_4\text{H}_{10}) - 6.5\Delta_f H^0(\text{O}_2) = -2657,56 \text{ kJ/mol}$

Pour déterminer la température finale de réaction de :

réactif à $T_0 \rightarrow$ produits à T_f

Dans les conditions standards, la loi de Kirchhoff en thermodynamique nous permet d'écrire :

$\Delta H = 0$ (Adiabatique), soit :

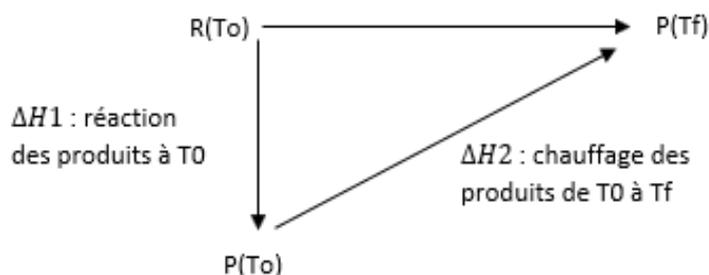
$$(E.10.) \quad \Delta H = \int_{T_0}^{T_f} C_p \cdot dT + \Delta rH \cdot x_f = 0$$

C_p : Capacité thermique du système à pression constante

ΔrH : enthalpie de la réaction de combustion

x_f : avancement final de réaction donné par le réactif limitant

Nous admettons pour simplifier nos calcul les hypothèses suivantes :



$$\Delta H1 = \Delta rH \cdot x_f$$

$$\Delta H2 = \int_{T_0}^{T_f} C_p(\text{système final}) \cdot dT$$

Nous avons donc : $\int_{T_0}^{T_f} C_p(SF).dT + \Delta_r H . x_f = 0$

Le calcul de la capacité thermique du système final se fait de la manière suivante :

$$C_p(SF) = 5C_p(H_2O) + 4C_p(CO_2) + 16C_p(N_2)$$

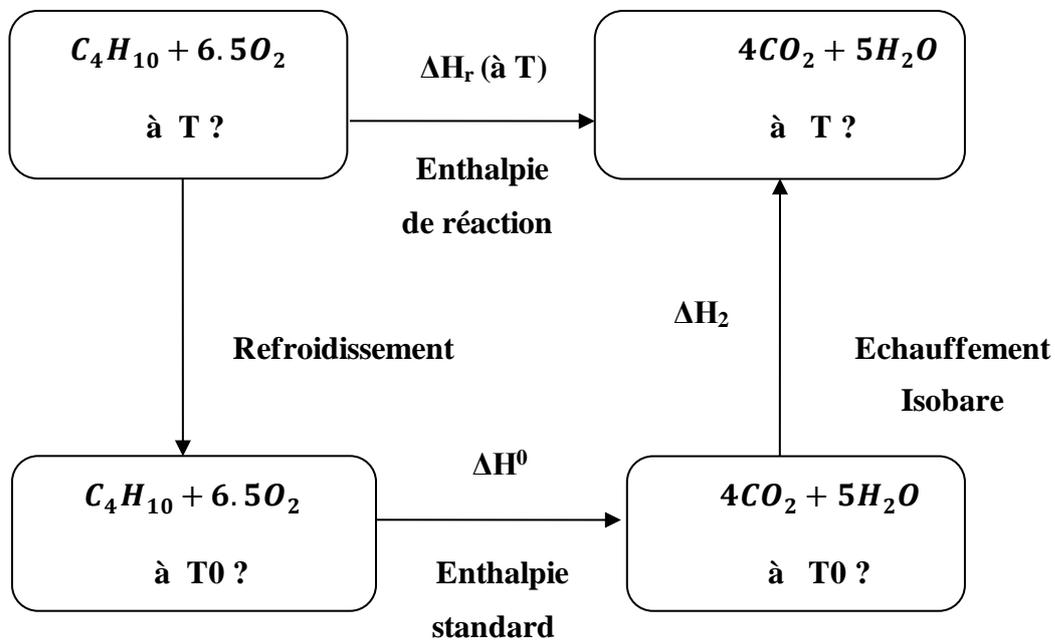
On tient compte de la capacité thermique du diazote parce que ce dernier est contenu dans et va subir lui aussi le chauffage, c'est ainsi qu'on détermine la température finale de la réaction par :

$$(E.11.) \quad T_f = \frac{C_p(SF).T_0}{c_p} - \frac{\Delta_r H}{c_p} . x_f$$

D'après l'équation ci-dessous, nous constatons aisément que la température finale de combustion du butane dans les conditions standards dépend de **l'avancement de réaction** soit, **le volume du réactif limitant** lors de la réaction chimique de combustion.

C'est ainsi que notre variable de contrôle est le volume de combustible injecté dans la chambre de combustion.

Dans notre cas, la combustion se déroulera dans des conditions de températures supérieures aux conditions standards soit : $T > 25^{\circ}C$. Etant donné que l'enthalpie ne dépend pas du chemin suivi, le schéma suivant est établi :



$$\Delta_r H(T) = \Delta_r H^0(T_0) + \Delta H_1 + \Delta H_2$$

Or

$$\Delta H_1 = n_{C_4H_{10}} \int_T^{T_0} C_{P_{C_4H_{10}}}(T) dT + n_{O_2} \int_T^{T_0} C_{P_{O_2}}(T) dT + n_{N_2} \int_T^{T_0} C_{P_{N_2}}(T) dT$$

Soit : $\Delta H_1 = \int_T^{T_0} C_{P_{C_4H_{10}}}(T) dT + 6,5 \int_T^{T_0} C_{P_{O_2}}(T) dT + 24,5 \int_T^{T_0} C_{P_{N_2}}(T) dT$

$$\Delta H_2 = n_{CO_2} \int_{T_0}^T C_{P_{CO_2}}(T) dT + n_{H_2O} \int_{T_0}^T C_{P_{H_2O}}(T) dT + n_{N_2} \int_{T_0}^T C_{P_{N_2}}(T) dT$$

Soit :

$$\Delta H_2 = 4 \int_{T_0}^T C_{P_{CO_2}}(T) dT + 5 \int_{T_0}^T C_{P_{H_2O}}(T) dT + 24,5 \int_{T_0}^T C_{P_{N_2}}(T) dT$$

Soit au final :

$$\begin{aligned} \Delta_r H(T) &= 4\Delta_f H^0(CO_2) + 5\Delta_f H^0(H_2O) - \Delta_f H^0(C_4H_{10}) - 6,5\Delta_f H^0(O_2) \\ &\quad + \int_T^{T_0} C_{P_{C_4H_{10}}}(T) dT + 6,5 \int_T^{T_0} C_{P_{O_2}}(T) dT + 24,5 \int_T^{T_0} C_{P_{N_2}}(T) dT \\ &\quad + 4 \int_{T_0}^T C_{P_{CO_2}}(T) dT + 5 \int_{T_0}^T C_{P_{H_2O}}(T) dT + 24,5 \int_{T_0}^T C_{P_{N_2}}(T) dT \end{aligned}$$

a) Séquence de fonctionnement brûleur :

Nous définissons les séquences de fonctionnement de notre brûleur comme il suit :

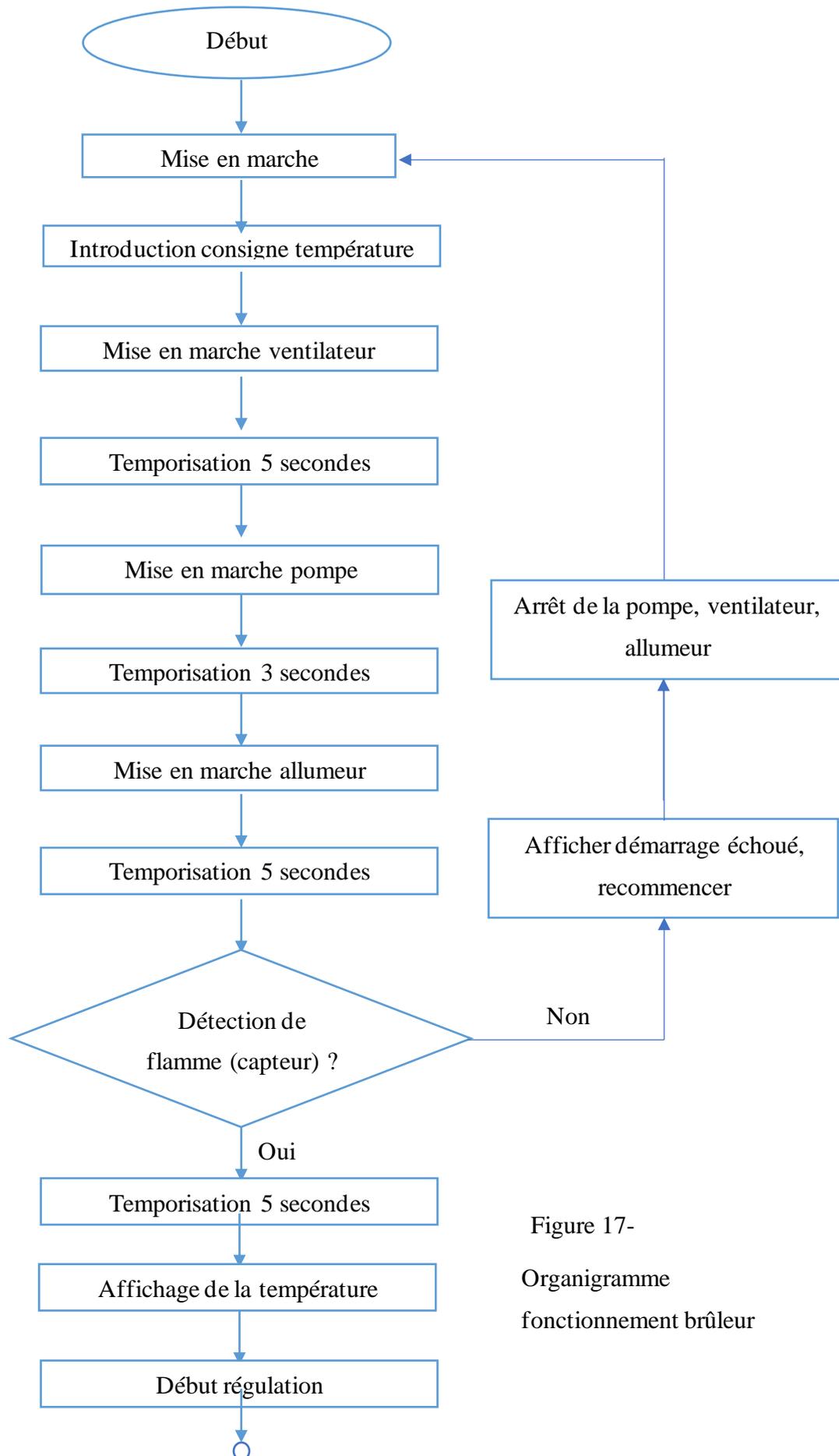


Figure 17-
Organigramme
fonctionnement brûleur

SEQUENCE	ACTION
0	Mise en marche du processus de combustion en appuyant sur le bouton marche
1	Introduction de la consigne de température
2	Mise en marche du ventilateur
3	Temporisation de 5 secondes
4	Mise en marche de la pompe à combustible à vitesse maximale
5	Temporisation de 2 secondes
6	Mise en marche de l'allumeur
7	Détection de la présence de la flamme par le détecteur de flamme
8	Arrêt de l'allumeur
9	Affichage de la température de combustion
10	Temporisation de 10 secondes
11	Régulation floue de température (boucle)
12	Arrêt système en appuyant sur le bouton arrêt

Tableau.8: Séquences de fonctionnement brûleur

b) Modélisation de la régulation du brûleur :

La principale fonction de notre brûleur est la régulation de température de la flamme. Pour ce faire, nous avons opter pour le contrôle floue à cause évidemment des avantages qu'il nous offre par rapport au contrôle classique. Le schéma bloc de régulation de température de notre système est le suivant :

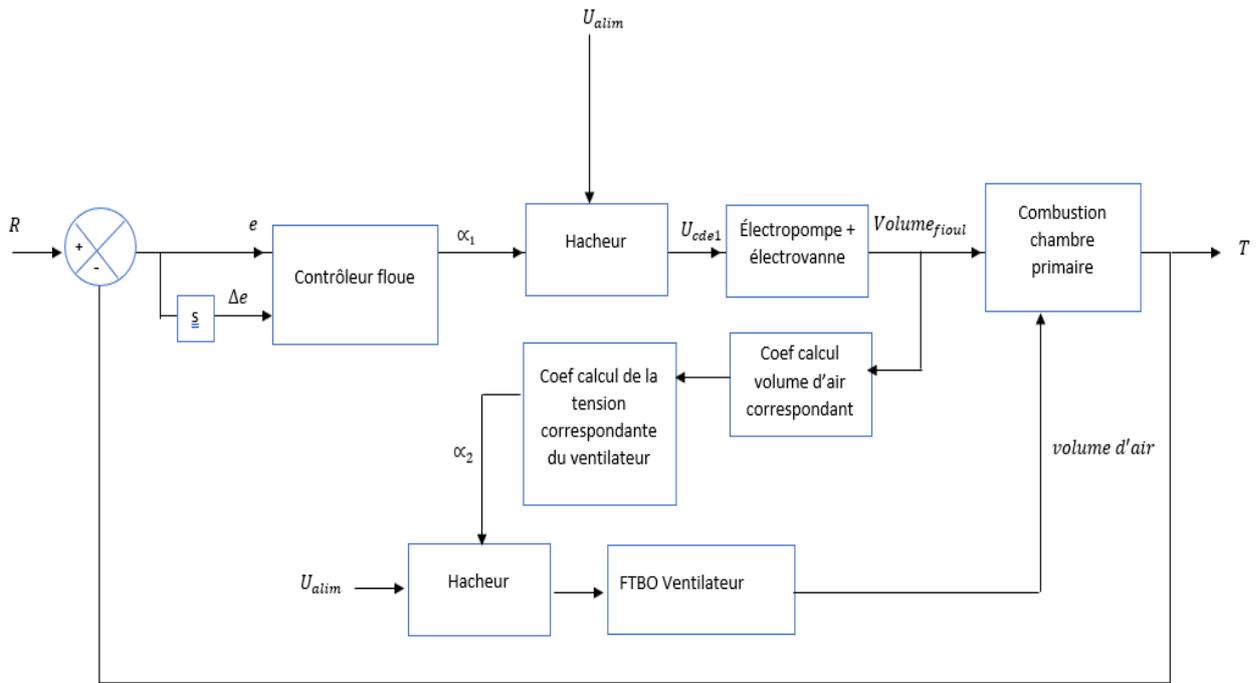


Figure 18- Schéma bloc régulation de température de combustion incinérateur chambre primaire

Nous avons développé les différents blocs de notre boucle de régulation :

➤ **Contrôleur flou :**

Il prend en entrée l'erreur sur la température et la variation de cette erreur. Nous avons procédé maintenant aux différentes étapes de conception du contrôleur flou

Fuzzification :

Nous avons l'intervalle $[-600 \ 600]$ comme valeur possible de l'erreur et de sa variation (variation possible entre la consigne de température et la température à la sortie),

Les fonctions d'appartenance de nos deux entrées sont de choisi de nature Gaussienne pour des raison de précision

- Nous paramétrons la première variable d'entrée (erreur) dans l'interface Matlab et nous avons :

```
>> getfis(sys_flou, 'input', 1)
Name =      err
NumMFs =    3
MFLabels =
    Negative
    Zero
    Positive
Range =    [-600 600]

ans =

Name: 'err'
NumMFs: 3
mf1: 'Negative'
mf2: 'Zero'
mf3: 'Positive'
range: [-600 600]
```

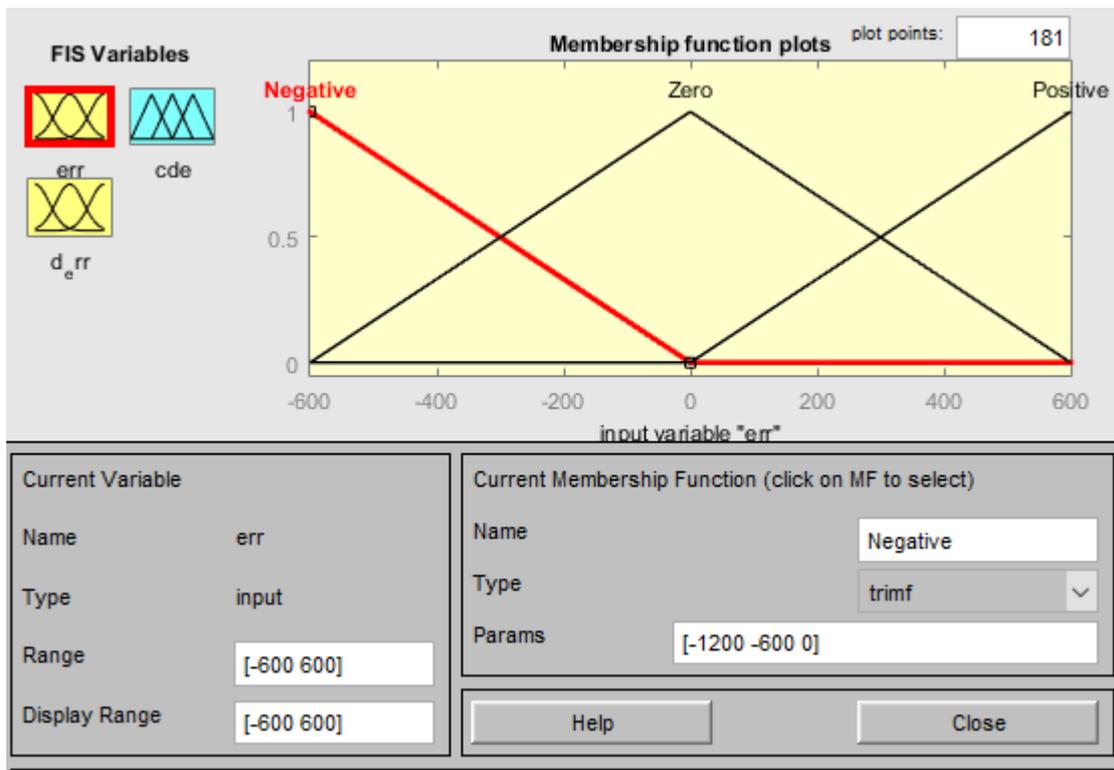


Figure 19- Fonction d'appartenance de l'erreur

- Nous paramétrons également la variable variation de l'erreur (d_err):

```

Name =      d_err
NumMFs =    3
MFLabels =
    Negative
    Zero
    Positive
Range =     [-600 600]

ans =

Name: 'd_err'
NumMFs: 3
mf1: 'Negative'
mf2: 'Zero'
mf3: 'Positive'
range: [-600 600]
    
```

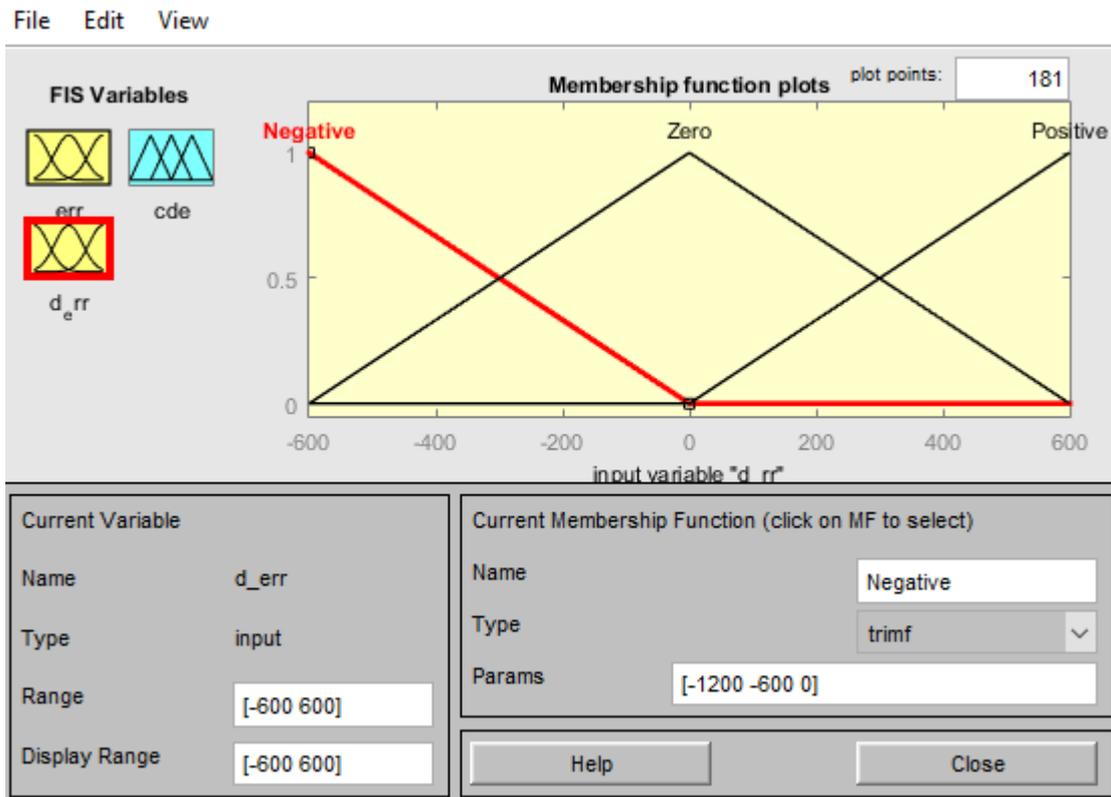


Figure 20- Fonction d'appartenance variation de l'erreur

- Variable de sortie :

L'actionneur est une pompe électrique commandé par un hacheur dévolteur. La valeur de la tension est dictée par le rapport cyclique de l'hacheur que nous pouvons commander ;

Soit le moteur qui pompe le combustible est calibré pour une tension nominale max de fonctionnement de 12V (électropompe proportionnelle), cela implique que le moteur peut être alimenté dans la plage de tension [0 12V]. La variable à commander est le rapport cyclique de l'hacheur qui est soumis aux variables linguistiques : très petit, petit, moyen, grand, très grand avec des fonctions d'appartenance de forme triangulaires :

```
Name =      cde
NumMFs =    5
MFLabels =
    Tres_petit
    Petit
    Moyen
    Grand
    Très_Grand
Range =     [0 1]
```

ans =

```
Name: 'cde'
NumMFs: 5
mf1: 'Tres_petit'
mf2: 'Petit'
mf3: 'Moyen'
mf4: 'Grand'
mf5: 'Très_Grand'
range: [0 1]
```

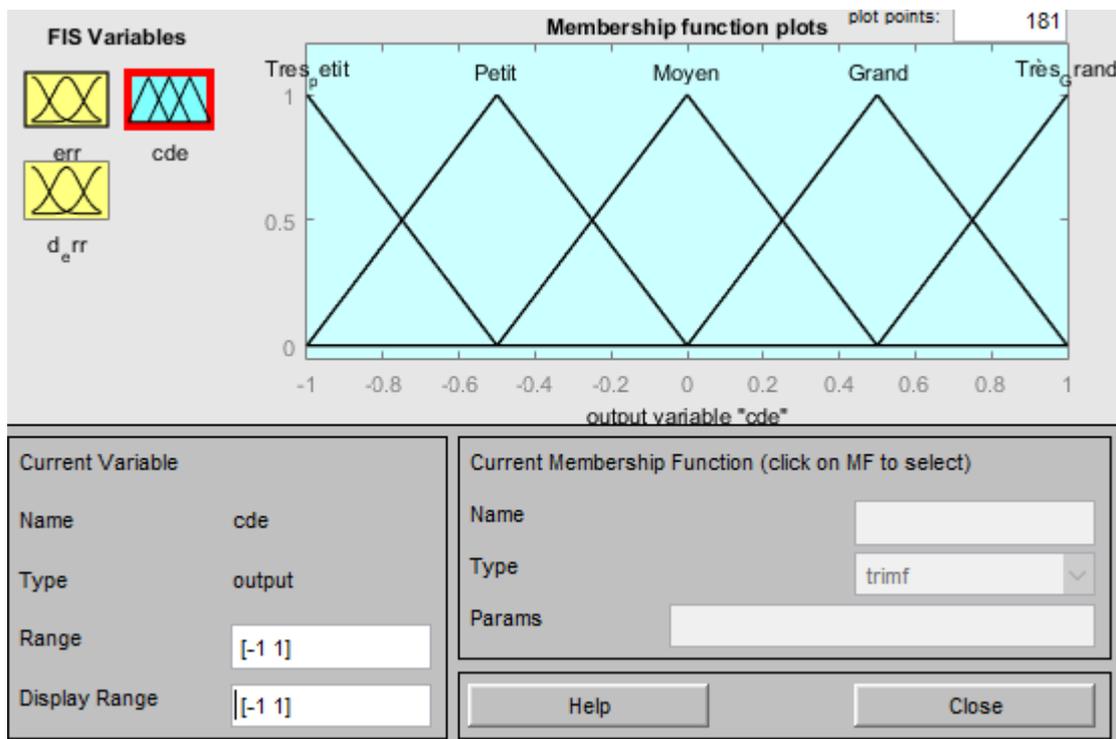


Figure 21- Fonction d'appartenance commande

Fuzzification

- Établissement des règles flous :

Nous éditons les règles d'inférence dans Matlab de notre système flou nommé « sys_flou »

```
>> showrule(sys_flou)
```

```
ans =
```

```
1. If (err is Negative) and (d_err is Negative) then (cde is Très_Grand) (1)
2. If (err is Negative) and (d_err is Zero) then (cde is Grand) (1)
3. If (err is Negative) and (d_err is Positive) then (cde is Moyen) (1)
4. If (err is Zero) and (d_err is Negative) then (cde is Grand) (1)
5. If (err is Zero) and (d_err is Zero) then (cde is Moyen) (1)
6. If (err is Zero) and (d_err is Positive) then (cde is Petit) (1)
7. If (err is Positive) and (d_err is Negative) then (cde is Moyen) (1)
8. If (err is Positive) and (d_err is Zero) then (cde is Petit) (1)
9. If (err is Positive) and (d_err is Positive) then (cde is Tres_petit) (1)
```

Commentaires :

L'exemple de la ligne 1 nous dit que si l'erreur est négative et que sa variation est également négative, appliquer une commande très grande (commande sur la dernière fonction d'appartenance). Cela revient à dire pomper beaucoup plus de combustible. Par contre la ligne 9 demande une très petite commande lorsque l'erreur est positive et sa variation également.

Défuzzification

-Nous pouvons voir maintenant notre système dans Matlab :

```
[System]
Name='regulateur_flou_'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=2
NumOutputs=1
NumRules=9
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'
```

```
[Input1]
Name='err'
Range=[-600 600]
NumMFs=3
```

```

MF1='Negative': 'trimf', [-1200 -600 0]
MF2='Zero': 'trimf', [-600 0 600]
MF3='Positive': 'trimf', [0 600 1200]

[Input2]
Name='d_err'
Range=[-600 600]
NumMFs=3
MF1='Negative': 'trimf', [-1200 -600 0]
MF2='Zero': 'trimf', [-600 0 600]
MF3='Positive': 'trimf', [0 600 1200]

[Output1]
Name='cde'
Range=[0 1]
NumMFs=5
MF1='Tres_petit': 'trimf', [-0.25 0 0.25]
MF2='Petit': 'trimf', [0 0.25 0.5]
MF3='Moyen': 'trimf', [0.25 0.5 0.75]
MF4='Grand': 'trimf', [0.5 0.75 1]
MF5='Très_Grand': 'trimf', [0.75 1 1.25]

[Rules]
1 1, 1 (1) : 1
1 2, 2 (1) : 1
1 3, 3 (1) : 1
2 1, 2 (1) : 1
2 2, 3 (1) : 1
2 3, 4 (1) : 1
3 1, 3 (1) : 1
3 2, 4 (1) : 1
3 3, 5 (1) : 1

```

Nous saisissons la commande qui nous permet de voir tous les paramètres de notre système flou et nous lisons tout simplement la méthode choisie pour la défuzzification : ‘Centroid’

➤ **Le hacheur commande combustible :**

Dans notre système de régulation, le hacheur commande combustible choisi est un hacheur dévolteur dont le schéma est le suivant (pour simulation) :

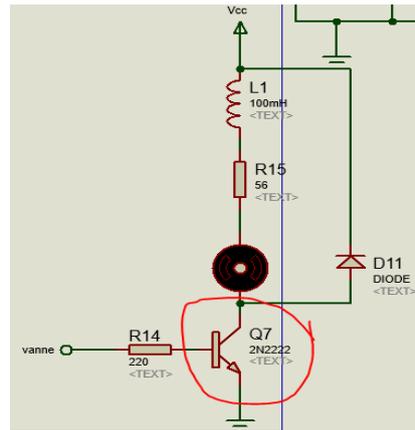


Figure 22- Commande moteur via hacheur (transistor 2N2222)

La fonction de transfert de notre hacheur est :

$$(E.12.) \quad U_{electrovanne} = \alpha U_{alimentation} = 12\alpha$$

Etant donné que l'électrovanne que nous allons utiliser est commandé en courant, nous avons en négligeant la résistance interne de l'électrovanne le courant donné par :

$$(E.13.) \quad I_{electrovanne} = \frac{12\alpha}{R} = 0,21\alpha$$



Figure 23- Hacheur dévolteur

Nous avons les électrovanne SMC de la série PVQ sur le marché qui font des ouvertures proportionnelles au courant injecté :

Modèle	PVQ13				PVQ31		PVQ33	
Type de raccordement	Montage sur embase				Montage en ligne		Montage sur embase	
								
Principe	Clapet à commande directe				Clapet à commande directe			
Fonction	N.F.				N.F.			
Taille de l'orifice (mm)	0.3	0.4	0.6	0.8	1.6	2.3	4	
Pression d'utilisation max. (MPa)	0.7	0.45	0.2	0.1	0.7	0.35	0.12	
Débit (l/min)	0 à 5		0 à 6		0 à 5		0 à 100	0 à 75
Courant appliqué (Alimentation)	0 à 85 mA (24 Vcc) 0 à 170 mA (12 Vcc)				0 à 165 mA (24 Vcc) 0 à 330 mA (12 Vcc)			
Raccordement	M5				1/8			

SMC Caractéristiques 2

Figure 24- Catalogue d'électrovanne SMC série PVQ[28]

L'électrovanne entouré en rouge est adaptée à commande de notre processus car elle peut laisser passer un débit allant jusqu'à 100 l/min.

➤ **Electropompe combustible :**

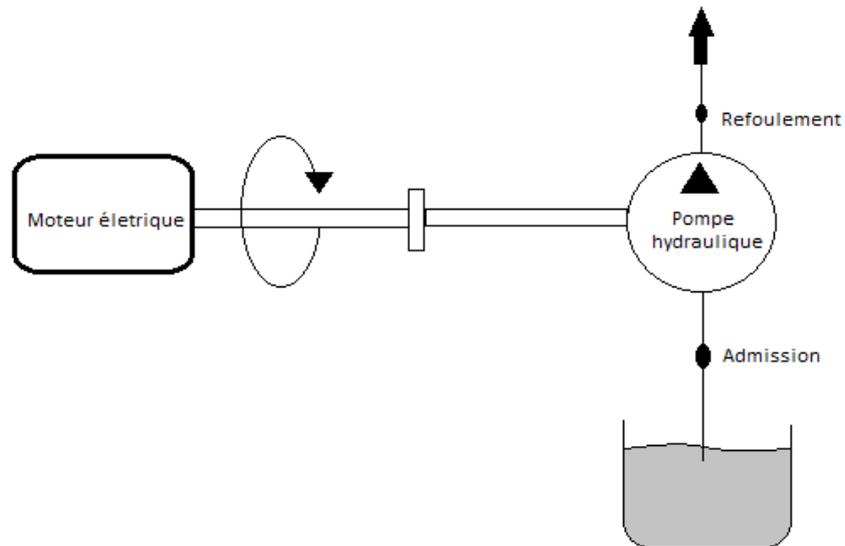


Figure 25- Schéma fonctionnement électropompe



Figure 26- Electropompe 12V utilisé pour notre prototypage

➤ **Bloc Débit d'air en fonction du débit de combustible :**

En supposant que le combustible est le butane, l'équation stœchiométrique de combustion est :



D'après cette équation, pour une combustion complète d'une mol de butane, il faut 6,5 mol de dioxygène. Le volume de dioxygène correspondant est calculé par :

$$(E.15.) \quad V_{O_2} = \frac{6,5M_{O_2} \cdot \rho_{C_4H_{10}}}{M_{C_4H_{10}} \cdot \rho_{O_2}} V_{C_4H_{10}}$$

Or $V_{O_2} = 0,21 V_{air}$ soit : $V_{air} = \frac{V_{O_2}}{0,21}$ soit : $V_{air} = \frac{6,5M_{O_2} \cdot \rho_{C_4H_{10}}}{0,21 \times M_{C_4H_{10}} \cdot \rho_{O_2}} V_{C_4H_{10}}$

Soit le débit d'air :

$$(E.16.) \quad Q_{air} = \frac{6,5M_{O_2} \cdot \rho_{C_4H_{10}}}{0,21 \times M_{C_4H_{10}} \cdot \rho_{O_2}} Q_{C_4H_{10}}$$

AN: $Q_{air} = \frac{6,5 \times 32 \times 580}{0,21 \times 58,12 \times 1,308} Q_{C_4H_{10}} = 7211,7 Q_{C_4H_{10}}$

$$Q_{air} > 7556,81 Q_{C_4H_{10}} \text{ En l/min}$$

Le paramètre du bloc débit air en fonction du débit combustible est 170,7 lorsque le combustible est le butane.

➤ **Bloc calcul tension correspondante hacheur :**

En supposant le ventilateur pouvant suivre la variation du débit de combustible :

Pour un ventilateur dont le volume d'air brassé est proportionnel à la tension d'alimentation :

$$(E.17.) \quad Q_{ventilateur} = k_v \cdot \alpha_2 \cdot U_{alim}$$

$$(E.18.)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{k_v \cdot U_{alim}} Q_{ventilateur} = \frac{1}{12k_v} Q_{ventilateur}$$



Figure 27- Ventilateur utilisé pour le prototypage (ventilateur pc)

Notre schéma de régulation devient :

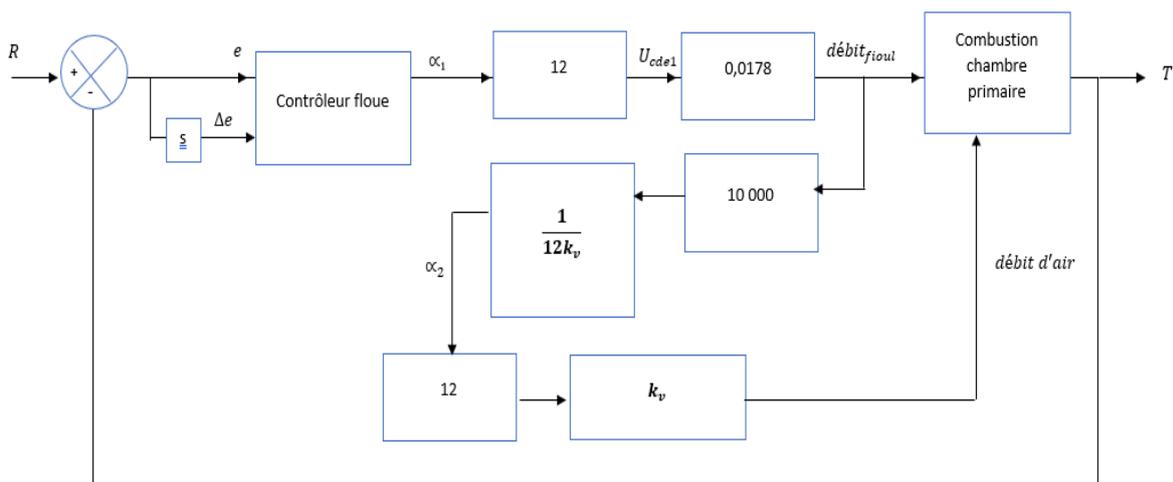


Figure 28- Schéma régulation système déterminé

Le schéma de simulation de notre brûleur est :

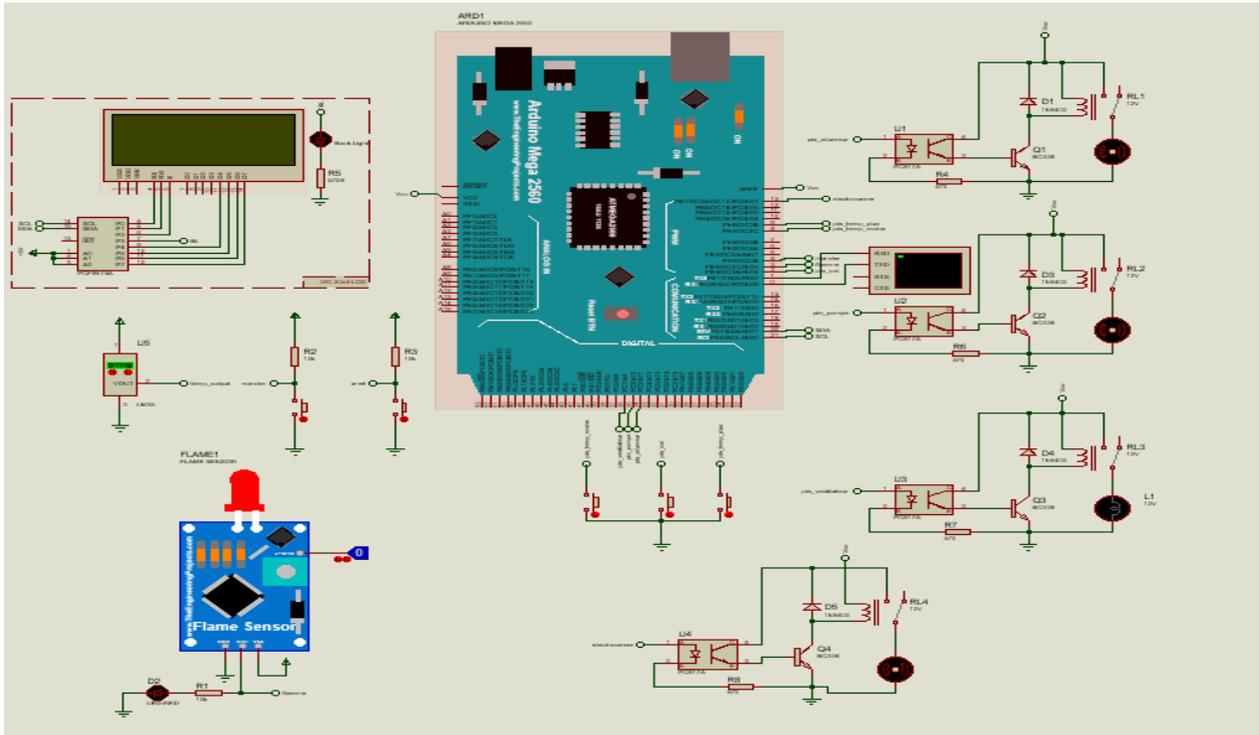


Figure 29- Schéma de simulation des circuits du brûleur

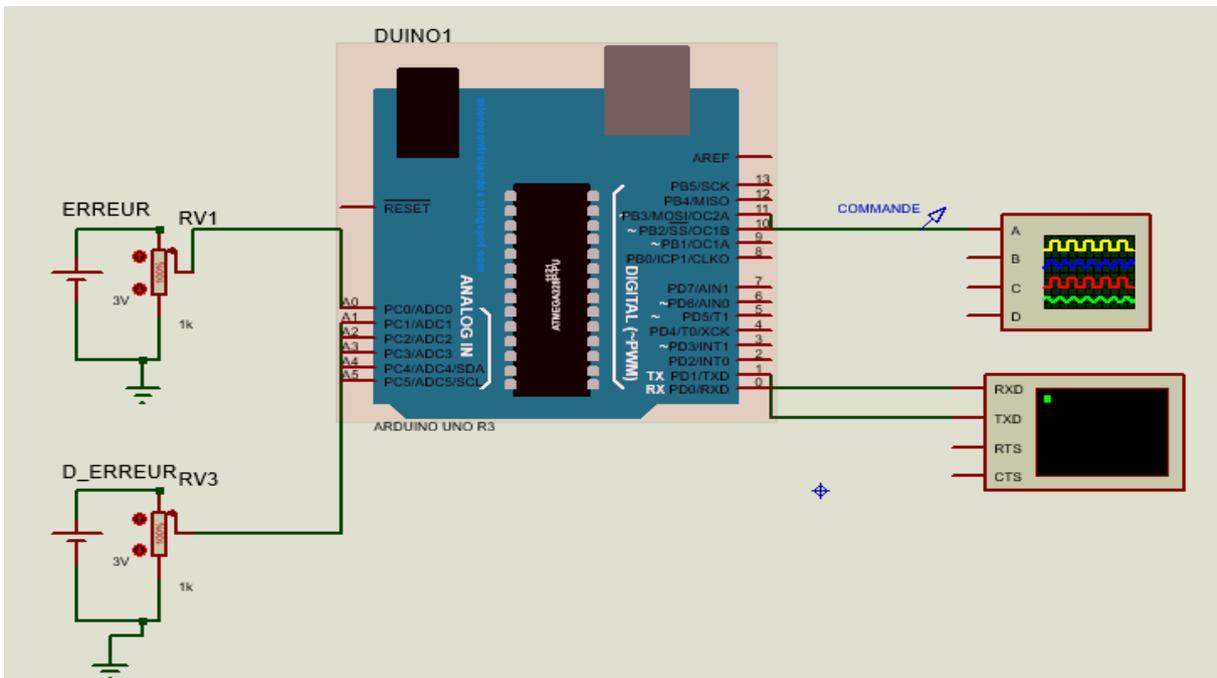


Figure 30- Schéma de simulation de la régulation floue du brûleur

4. LE BÂTI :

Le bâti est la structure mécanique dans laquelle se déroule la combustion. C'est ainsi qu'elle doit satisfaire à certaines contraintes pour tenir sur la durée. La chambre primaire du bâti doit pouvoir consommer une certaine quantité de déchets par cycle de combustion.

L'incinérateur a été conçu pour être chargé manuellement avec une porte et un cendrier qui permettent de retirer facilement les cendres. Les déchets sont enflammés à l'aide d'un brûleur situé dans la chambre primaire. Le brûleur auxiliaire dans la chambre secondaire sert à rebrûler les produits provenant de la chambre primaire.

Nous allons nous inspirer des données fournis par le ministère de l'environnement de l'Ontario (USA) qui a effectué des études statistiques sur la destruction des déchets par incinération.

➤ **Chambre primaire :**

La chambre primaire est conçue pour avoir un dégagement de chaleur de 900 000 kJ.h⁻¹.m⁻³ (Ministère de l'environnement, Ontario, 1986). Le dégagement total de chaleur attendu des déchets est de 1 101 471,85 kJ (voir tableau suivant). Le volume calculé pour la chambre primaire est environ de 1,2 m³ en utilisant la formule de calcul du volume du cylindre, où l est la longueur et r est le rayon :

$$(E.19.) \quad v = \pi r^2 h$$

h= 1m, r = 0,6 m

	Constituent	Percentage	Mass (Kg)	Higher Heating Value (KJ/kg)	Total heat (MQ) (KJ)
1	Food	53.39	32.03	19,228	615,876.84
2	PVC	7.45	4.47	22,630	101,156.1
3	Polythene	13.15	7.88	46,304	364,875.52
4	textile	3.03	1.8	9,270	16,686
5	Paper	22.89	13.73	18,119	24,877.39
	Total	100	60		1,101,471.85

Source: (Ministry of Environment, Ontario, 1986)

Tableau.9: Composition statistique des déchets (Ontario, Canada) en pourcentage de masse et énergie maximale de combustion par kg

➤ **Chambre secondaire :**

La chambre secondaire est conçue pour permettre un temps de séjour des gaz de 1 secondes. En supposant que les produits ont les propriétés de gaz parfaits (hypothèse simplificatrice), la loi des gaz parfaits a été utilisée pour calculer le volume d'air dans la chambre secondaire.

$$(E.20.) \quad PV = nRT$$

$$\text{Soit : } V = \frac{nRT}{P} = \frac{8.314 \times 1000 \times 1273}{101325 \times 44} = 2,36 \text{ m}^3$$

Avec : P= 101325 Pa la pression atmosphérique,

R= 8,314 J/mol/K la constante des gaz parfaits,

T= 1273 K la température en kelvin,

$n = \frac{500}{44} = 22,72$ mol : quantité de matière des gaz présents (supposons que le dioxyde de carbone

est le produit dominant et que la chambre secondaire peut en contenir 0,5kg)

$$V = \pi r^3 h \text{ Soit : } h = \frac{V}{\pi r^3} = \frac{2,36}{\pi \times 0,6^3} = 1,73 \text{ m}$$

$$\text{Soit le débit de gaz calculé par : } Q_{gaz} = \frac{V}{t} = \frac{2,36}{2} = 1,18 \text{ m}^3 / \text{s}$$

➤ **Epaisseur d'isolation :**

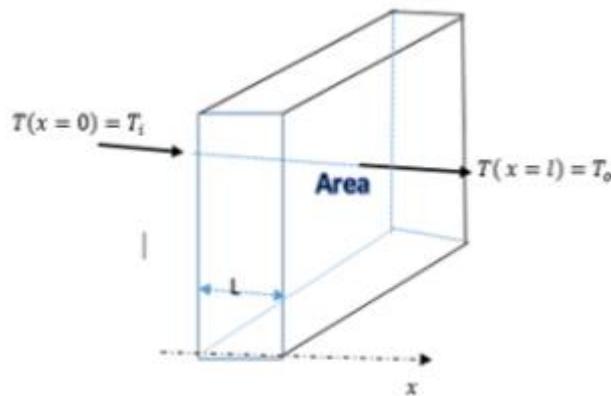


Figure 31- Transfert de chaleur à travers une brique

Pour éviter les pertes de chaleur et maintenir la température extérieure à 31°C (prise comme température ambiante), nous utilisons des briques réfractaires (argile réfractaire). Selon le

principe de base, le flux de chaleur par conduction à travers une surface homogène, le taux de transfert de chaleur selon la loi de Fourier est :

$$Q = \frac{(T_1 - T_2)}{R} \text{ Pour : } R = \frac{e}{A.K}$$

R : résistance thermique de la paroi

e : épaisseur de la paroi

K = 0,81 W/m/K conductivité thermique briques réfractaires

A : surface de la paroi

Calcul de A :

$$(E.21.) \quad A = r.h \int_0^{2\pi} d\theta = 2\pi r h = 2\pi \times 0,6 \times 1 = 3,8 \text{ m}^2$$

Supposons que nous souhaitons maintenir la température à l'extérieur de la paroi à 30°C

$$(E.22.) \quad Q = \frac{(T_1 - T_2)}{R} = \frac{A.k.(T_1 - T_2)}{e}$$

$$\text{Soit : } e = \frac{A.k.(T_1 - T_2)}{Q} = \frac{3,8 \times 0,81 \times 770}{1\,101\,471,85 \times 3 \times 3600} = 23,8 \text{ mm}$$

Nous choisissons l'épaisseur : e = 30 mm

Récapitulatifs structure métallique :

Capacité : 60 kg

Vitesse chargement : 20 kg/min

Chambre primaire : 1,2 m³

Chambre secondaire : 2 m³

Épaisseur d'isolation : 30 mm

Température primaire : 600-800°C

Température secondaire : 1000-1200°C

Température extérieure : 31°C

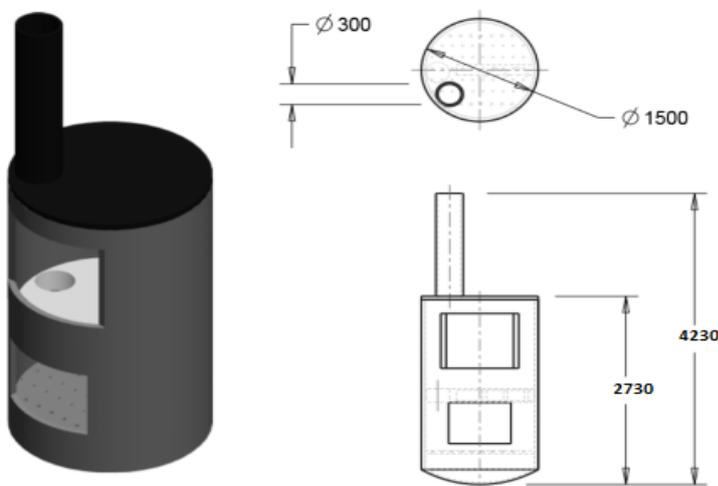
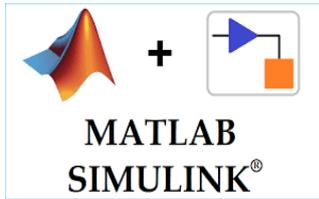
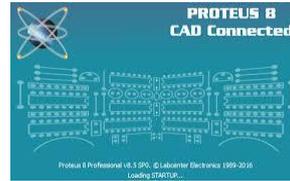


Figure 32- Schéma Incinérateur double chambre

III. LES OUTILS :



Pour la mise sur pieds et la simulation du contrôle floue



Pour l'édition et la simulation des circuits électroniques du brûleur



L'IDE Arduino pour la programmation du microcontrôleur Arduino



Pour le dessin de la structure mécanique

Cette partie s'achève avec la conception des différentes parties de notre incinérateur à savoir le brûleur et le bâti. Nous avons maintenant passé à la présentation et discussion des résultats des simulations.

CHAPITRE III : RESULTATS ET COMMENTAIRES

I. RÉSULTATS :

1. SIMULATIONS MATLAB :

Le schéma ci-dessous est la représentation symbolique de notre système flou dans Matlab :

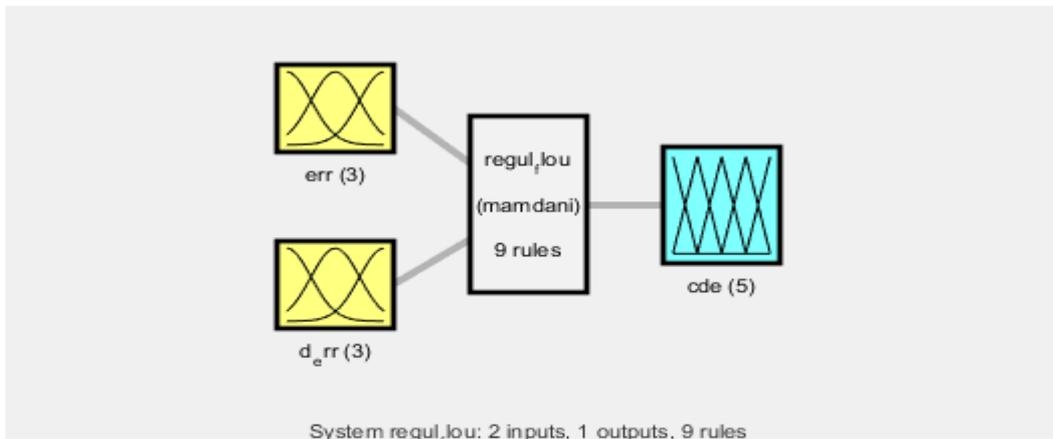


Figure 33- Représentation du système flou dans Matlab

Les paramètres de notre contrôleur flou sont :

- Principe d'inférence de Mandami,
- Défuzzification par la méthode du centroïd,
- L'agrégation par le max et l'implication par le min.

Une commande sous Matlab nous permet de générer le graphe 3D suivant qui est l'évolution de la commande en fonction de l'erreur et de sa variation :

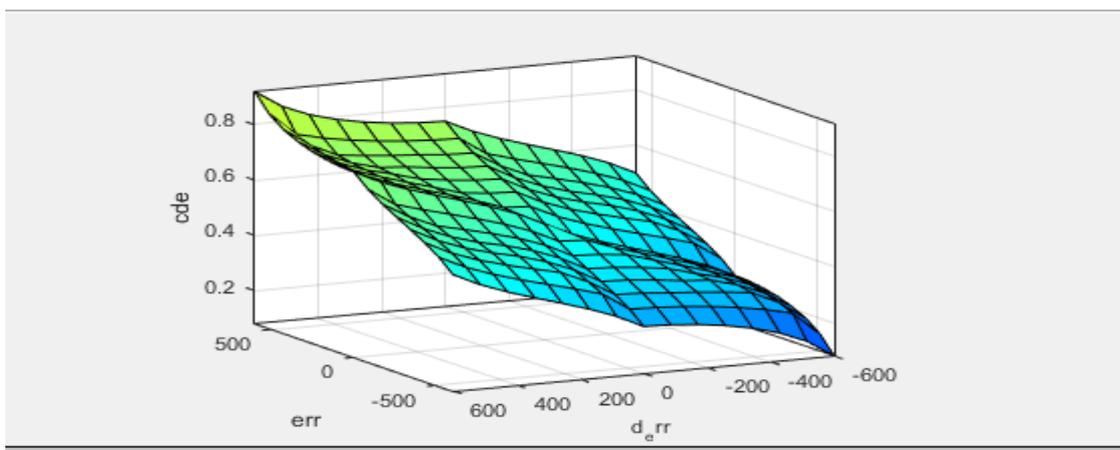


Figure 34- Graphe 3D commande fonction de err et d_err

Nous exécutons une simulation en paramétrant l'erreur et sa variation à leurs valeurs minimales (-600) :

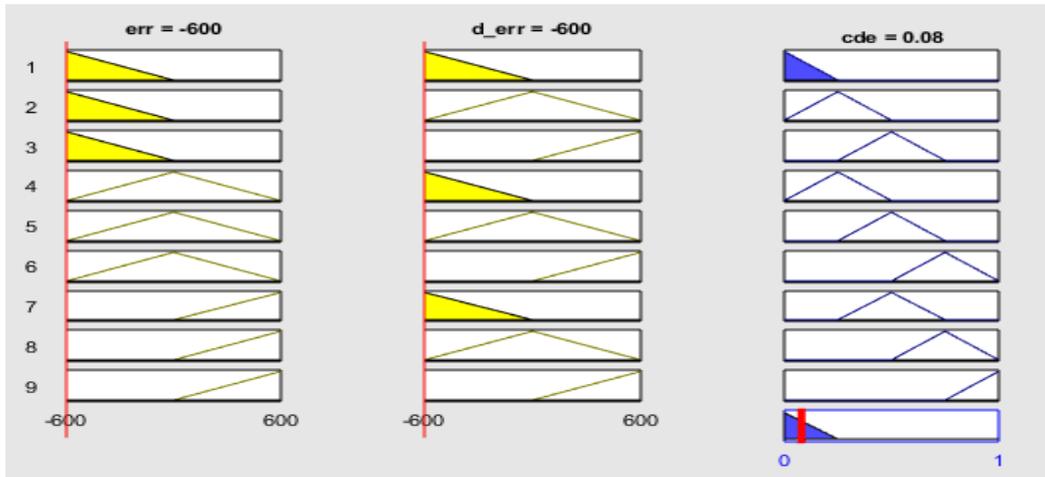


Figure 35- Test 1 sur Matlab

Cette figure nous permet de voir que si l'erreur et sa variation arrivent tous à -600, le système commande un rapport cyclique presque nul soit une tension correspondante de 0V. concrètement cela veut dire que la température en sortie du système est bien plus élevée que la consigne et pour résoudre ce problème, le système arrête de pomper le combustible ($U \sim 0V$, l'électrovanne se ferme) pour que la température diminue.

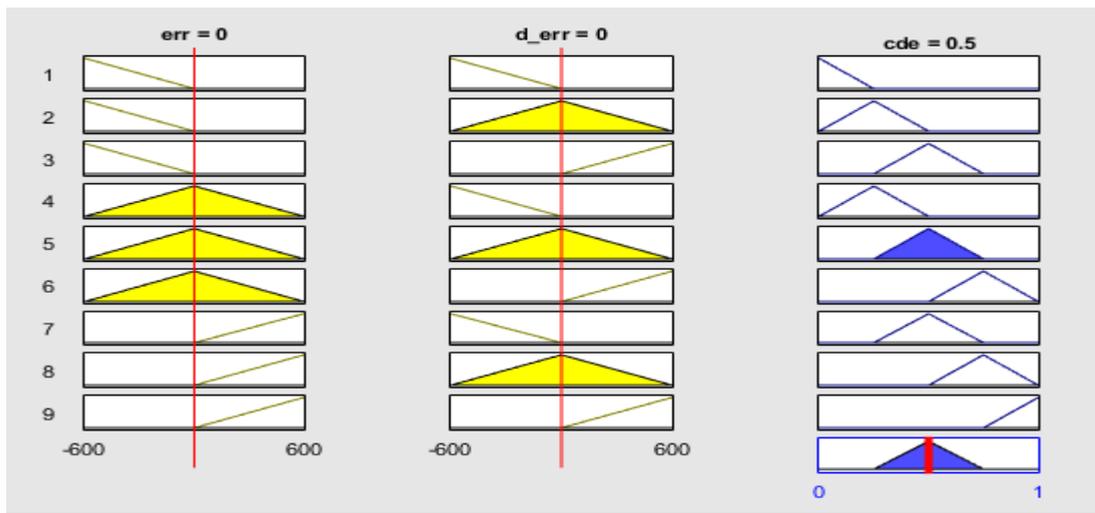


Figure 36- Test 2 Matlab

Cette figure nous oriente sur une pompe qui pourra atteindre le point d'équilibre à la moitié de sa vitesse maximale de pompe en fonction de la température de consigne.

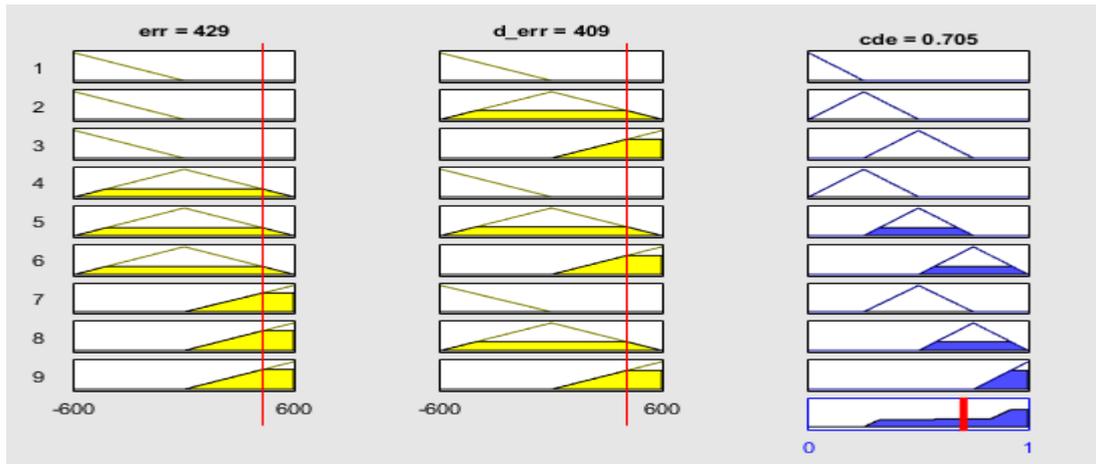


Figure 37- Test 3 Matlab

Ici, nous voyons qu'il n'y a que les règles 4, 5, 6, 8 et 9 qui sont activés car l'erreur et sa variation ont des degrés d'appartenances non nuls dans les fonctions d'appartenance correspondantes. L'on peut aussi observer l'agrégation qui est faite pour obtenir la courbe de commande. Le moteur flou évalue donc le centre de gravité de cette courbe par la défuzzification pour nous fournir le rapport cyclique correspondant.

2. SIMULATION PROTEUS :

Les simulations sur proteus nous permettent de voir la tension de commande aux bornes du moteur

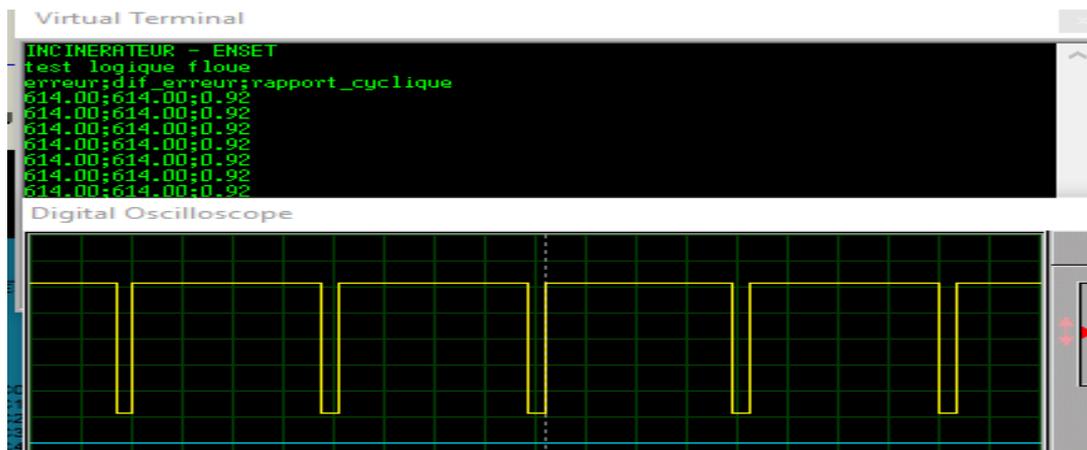


Figure 38- Erreur=600, d_erreur=600, commande=0,92

Sur le graphe ci-dessus, nous avons la pompe qui est à son maximum soit un à un rapport cyclique correspondant de 0,92. Ce rapport cyclique est obtenu par le moteur d'inférence floue. Concrètement, cela signifie que la température mesurée à la sortie du système est très inférieure à la consigne et pour pouvoir la rattraper, le système ordonne de pomper plus de combustible.

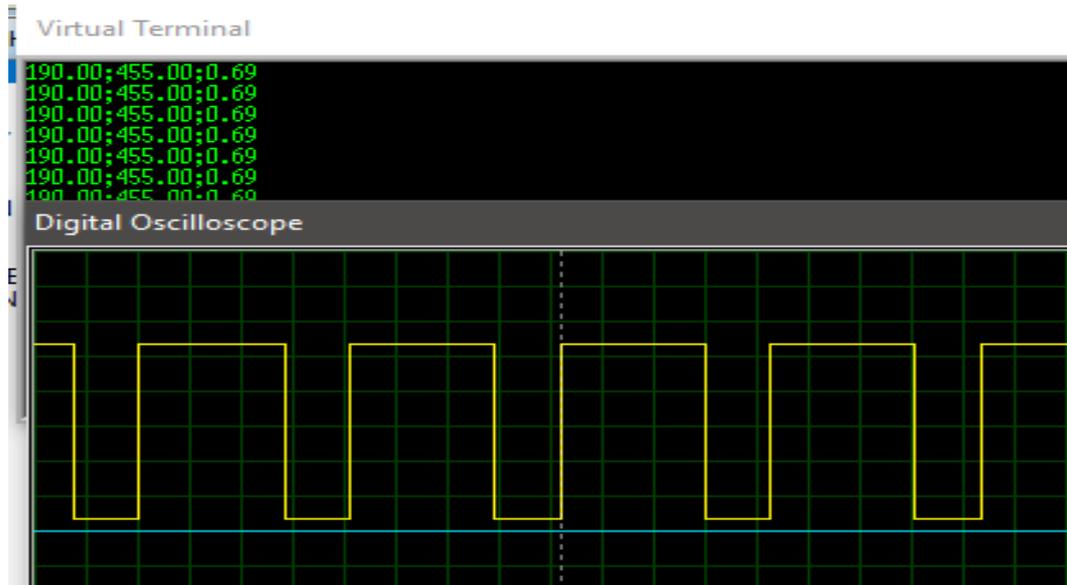


Figure 39- Erreur=190, d_erreur=455, commande=0,69

Ici nous fixons deux valeurs aléatoires de l'erreur et de sa variation et nous pouvons observer que le rapport cyclique vari effectivement grâce au moteur floue.

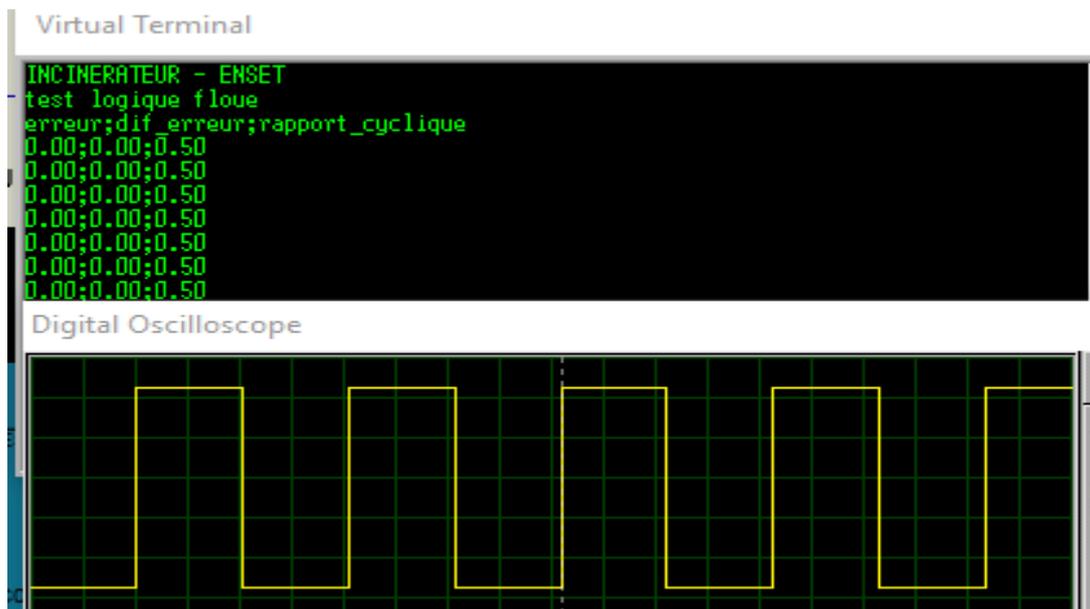


Figure 40- Erreur=0, d_erreur=0, commande=0,5

Le schéma ci-dessus nous signale que notre système est à son point d'équilibre lorsque le rapport cyclique est à moitié. Nous devons donc choisir l'électrovanne en conséquence.

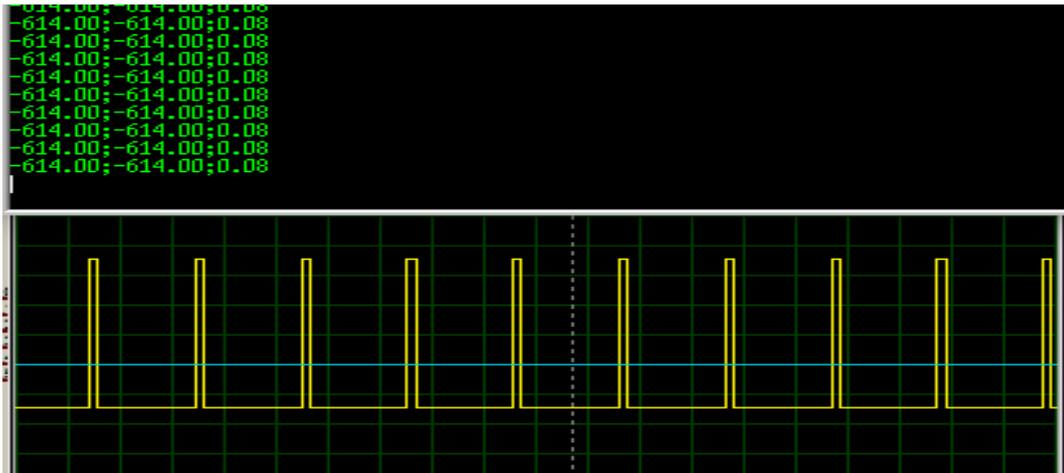


Figure 41- Erreur=-600, d_erreur=-600, commande = 0,08

Ce graphe correspond à la tension minimale que peut délivrer notre moteur floue. Ceci se produit lorsque l'erreur et sa différence sont à leurs valeurs négatives minimale. Concrètement, cela signifie que la température à la sortie du système est largement supérieure à la consigne et pour diminuer la température de combustion, le moteur floue commande la fermeture de la vanne presque en totalité.

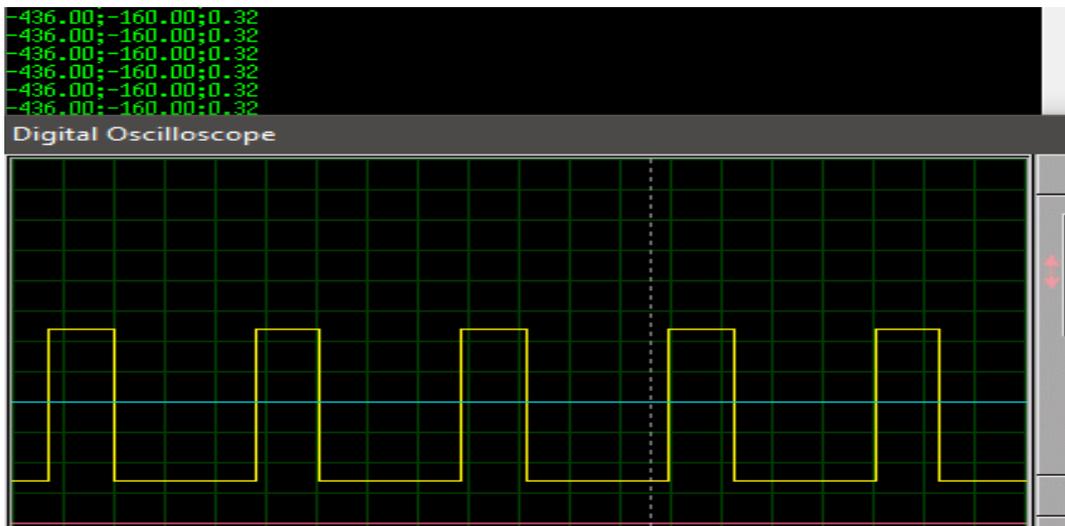


Figure 42- Erreur = -436, d_erreur=-160, commande = 0,32

Une fois de plus, nous fixons deux valeurs des paramètres d'entrée et nous pouvons observer la commande correspondante imposée par le contrôleur floue.

Commentaires : Nous constatons effectivement que le moteur d'inférence floue effectue bien la régulation du débit en fonction de la température et de sa variation. Pour étalonner notre système, il faudrait réaliser les tests en grandeur nature et ajuster les paramètres de notre contrôleur pour garantir de meilleures performances.

II. EVALUATION DU COÛT DU PROJET GRANDEUR NATURE :

Nous évaluons ici, le coût d'investissement d'implémentation grandeur nature d'un tel projet de conception d'incinérateur avec les contraintes de production dans notre environnement local. Pour ce faire, nous procéderons à l'évaluation du coût du brûleur puis du bâti.

- Brûleur :

Matériel	Quantité	Prix unitaire	Prix total
Ventilateur brasseur d'air	1	90 000	90 000
Électropompe à combustible 42L/h	1	170 000	170 000
Vanne	2	10 000	20 000
Électrovanne commandée proportionnellement	1	70 000	70 000
Transformateur d'allumage	1	35 000	35 000
Gicleur	2	10 000	20 000
Thermocouple	1	20 000	20 000
Capteur de flamme	1	10 000	10 000
Raccordements	1	20 000	20 000
Structure métallique en acier inoxydable	1	150 000	150 000
Électronique de commande	1	200 000	200 000
Accessoires utiles	1	150 000	150 000
Coût de conception			300 000
Total			1 255 000Fcfa

Tableau.10: Evaluation coût brûleur

Etant donné que pour un incinérateur à double chambre, nous avons un brûleur primaire et secondaire, ce coût doit être multiplié par deux soit : 2 510 000 Fcfa

- Bâti :

Matériel	Quantité	Prix unitaire	Prix total
Briques réfractaires	600	1200	720 000
Ciment réfractaire	10	12 000	120 000
Cheminée en acier inoxydable	1	60 000	60 000
Sable	1	90 000	90 000
Gravier	20	2000(brouette)	40 000
Porte en acier inoxydable sur mesure	2	130 000	260 000
Autres accessoires utiles	1	200 000	200 000
Total			1 490 000
Main d'œuvre à 30%			447 000

Tableau.11: Evaluation coût du bâti

En prenant en compte la rémunération des honoraires de l'expertise à 20 000 Fcfa par heures pour une consultation de cinq heures par jour pendant dix jours pour l'installation de l'incinérateur : 1 000 000 Fcfa

TOTAL : 5 447 000 Fcfa

NB : les coûts pratiqués ici sont des coûts d'articles consultés sur internet, il faut donc prendre en compte les coûts liés à l'acheminement de ce matériel surplace (Dans le cas où l'on ne serait pas en mesure de se fournir localement) et concernant le bâti, il faudra encore avoir l'avis d'un expert en construction pour des chiffres plus précis

CONCLUSION:

En vue d'accompagner le gouvernement dans sa politique de gestion des déchets biomédicaux, le CURES a initié la conception d'un incinérateur pour hôpitaux qui est l'objet de ce travail. Les principaux objectifs de ce travail étaient : s'approprier une technologie de conception d'incinérateur, contrôler les températures des chambres de combustion, optimiser la consommation de combustible, optimiser le coût de conception. Les paramètres de l'incinérateur conçu sont : incinérateur à double chambre, de capacité 60kg, parois interne fait de brique réfractaires et parois externe faite de brique cuite (afin de permettre la meilleure isolation possible), contrôle de température par logique floue, temps moyen d'un cycle de combustion correspond à trois heures. Aux vues des résultats obtenus, nous pouvons dire que les objectifs visés ont été atteint car nous avons conçu une maquette de brûleur avec les moyens disponibles qui permet de générer et d'entretenir la combustion. Le coût de conception de notre produit s'élève à environ 6 millions de Fcfa ce qui est raisonnable comparé aux prix pratiqués par les incinérateurs occidentaux (de l'ordre de 15 millions de Fcfa) et en plus la technologie est maîtrisée cela implique que nous pourrions garantir sa maintenance et l'amélioration continue de ses performances. Le contrôle par logique floue étant une méthode de régulation essentiellement empirique, il est essentiel de passer à un étalonnage pratique des paramètres du contrôleur afin d'avoir de meilleures précisions. Le contrôleur floue ne garantissant pas toujours une robustesse et stabilité du système à toute épreuve, nous pouvons envisager une hybridation du contrôleur en associant la logique floue et le réseau de neurone artificielle (contrôleur neuro-floue) ce qui indéniablement rendra le système beaucoup plus fiable. Etant donné que le processus d'incinération produit de la fumée à haute pression possédant une grande d'énergie, celle-ci pourrait être valorisée en l'utilisant pour la stérilisation du matériel médical, la production d'eau chaude ou encore la production d'électricité tout ceci pour le bien-être de l'hôpital.

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] R. L. Longo, « La gestion des déchets dangereux au Cameroun », Mémoire de Master, Université de Yaoundé II - IRIC, Soa, Cameroun, 2012.
- [2] J.-P. Beurier et A. Kiss, *Droit international de l'environnement*, Pedone. 2017.
- [3] MINEP, « Strategie Nationale Gestion Dechets - [PDF Document] », *fdocuments.in*. <https://fdocuments.in/document/strategie-nationale-gestion-dechets.html> (consulté le juin 27, 2020).
- [4] Collectif, *Dictionnaire Hachette encyclopédique 2001*. Paris: Hachette Éducation, 2000.
- [5] A. Dounian, « Le régime juridique de la gestion des déchets au Cameroun », Thèse de Doctorat/PHD en Droit public, Université de Yaoundé II, Cameroun, Soa, 2009.
- [6] G. Bertolini, « Approche socio-économique des déchets », *Ref: TIP800WEB - « Environnement »*, janv. 10, 2000. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-environnement-tiag0/archive-1/approche-socio-economique-des-dechets-g2300/> (consulté le juin 27, 2020).
- [7] M. Kamto, *Droit de l'environnement en Afrique*. EDICEF, 1996.
- [8] F. Ouguerouz, « La convention de Bamako sur l'interdiction d'importer en Afrique des déchets dangereux et sur le contrôle des mouvements transfrontaliers et la question des déchets dangereux produits en Afrique », *Annu. Fr. Droit Int.*, vol. 38, n° 1, p. 871-884, 1992, doi: 10.3406/afdi.1992.3099.
- [9] « les nanotechnologies en Afrique ». Consulté le: juin 27, 2020. [En ligne]. Disponible sur: https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen_nano_booklet-fr.pdf.
- [10] « Cameroun - Loi n° 96/12 du 5 août 1996 portant loi-cadre relative à la gestion de l'environnement. » http://www.ilo.org/dyn/natlex/natlex4.detail?p_lang=fr&p_isn=96986&p_country=CMR (consulté le juin 27, 2020).
- [11] F. Mbaye Mbengue, « Plan de gestion des déchets hospitaliers », Banque Mondiale, avr. 2008. [En ligne]. Disponible sur: <http://documents1.worldbank.org/curated/pt/843821468016448889/pdf/E18580FRENCH0C1nagement0Plan0REPORT.pdf>.
- [12] P. F. Djocgoue, « Elaboration du plan de gestion des déchets biomédicaux du projet d'appui des investisseurs dans le secteur de la santé », Banque Mondiale, 2016. [En ligne]. Disponible sur: <http://documents1.worldbank.org/curated/pt/203341468215383603/pdf/SFG1871-EA-FRENCH-P156679-PUBLIC-Disclosed-2-25-2016.pdf>.
- [13] D. Nkoa, « Incinérateur pour hôpitaux », Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique-Université de Yaoundé I, Yaoundé, Cameroun, 2017.
- [14] M. Melosi et B. Loyer, « Le "destructor" britannique. Transfert des techniques et destruction des déchets », *Ann. Rech. Urbaine*, vol. 23, n° 1, p. 103-113, 1984, doi: 10.3406/aru.1984.1100.
- [15] O. Bonnefoy, « Combustion, Eléments de cours ». 2015 2014, [En ligne]. Disponible sur: <https://www.emse.fr/~bonnefoy/Public/Combustion-EMSE.pdf>.
- [16] *Document de référence sur les meilleures techniques disponibles (BREF) : grandes installations de combustion (LCP) | AIDA*. 2006.
- [17] J. Akpe, O. Oyelaran, et I. Abdulmalik, « The Design of a Portable Municipal Waste Incinerator With Fuzzy Logic Based Support for Emission Estimation », *Aceh Int. J. Sci. Technol.*, vol. 5, déc. 2016, doi: 10.13170/aijst.5.3.5748.

- [18] O. El Alaoui Jamal, « Application de la logique de floue », Mémoire de fin d'études, Ecole Marocaine des Sciences de l'Ingénieur, Maroc, 2010.
- [19] K. Benmansour, « Etude et implantation de contrôleurs robustes et flous d'une machine synchrone à aimants permanents avec pilotage vectoriel " », Mémoire de Master, 1999.
- [20] K. Zinser et R. Schreiber, « " La logique floue : une nouveauté prometteuse de la technique d'automatisation », *Tech. Mod. Paris 1908*, vol. 86, n° 1-2, p. 19-25, 1994.
- [21] F. Chevré et F. Guély, *CT191 : La logique floue*. Schneider Electric, 1998.
- [22] N. Martaj et M. Mokhtari, *MATLAB R2009, SIMULINK et STATEFLOW pour Ingénieurs, Chercheurs et Etudiants*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [23] S. Ndjakomo Essiane, « Cours IA PNS », Université de Douala-IUT, non publié.
- [24] « Tutoriel Logique Floue et Arduino ». [En ligne]. Disponible sur: http://psl.ibidouille.net/Images_forum/LF/tutoriel_LF_Arduino_0_4.pdf.
- [25] E. Bagaimana, « Cara Kerja Incinerator », *Ensiklopedi Bagaimana*, oct. 18, 2017. <https://bagaimana.web.id/bagaimana-cara-kerja-incinerator/> (consulté le juin 28, 2020).
- [26] « Brûleur Fioul Monobloc | Catégories | ». <http://casamazout.com/categories/bruleur-fioul-monobloc/> (consulté le juin 28, 2020).
- [27] « Fonctionnement Brûleur Petite Puissance ». <https://slideplayer.fr/slide/4078156/> (consulté le juill. 03, 2020).
- [28] SMC, « Electrovanne proportionnelle compacte ». [En ligne]. Disponible sur: http://content2.smcetech.com/pdf/PVQ_FR.pdf.

ANNEXES :

Annexe 1- Fabrication de la maquette du brûleur



Annexe 2- Test du brûleur



Annexe 3- Images montrant la gestion des DBM à différents endroits du Cameroun[12]



DBM de la rigole HR de Bertoua



EU de l'HR de Bertoua



utilisation de l'eau souillé riverains



Proximité de l'école primaire (CMA LAINDE)



Proximité du marché (CSIBOUMDJERE)



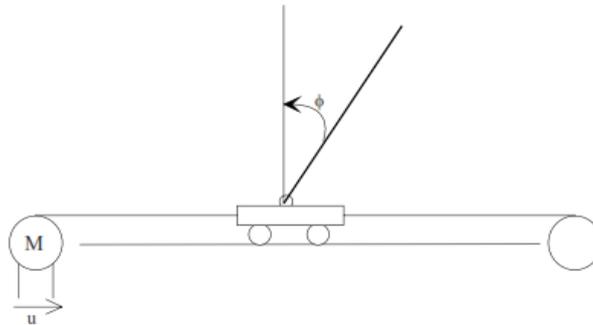
Hôpital Central de Ngaoundéré (Décharge DBM)



H R de Garoua (récupérateurs informels)

Annexe 4- Exemple d'application de la logique floue

Considérons le pendule inversé suivant :

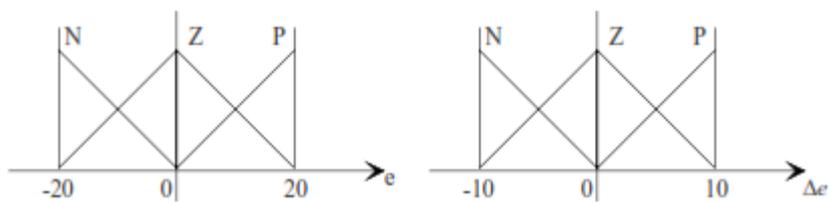


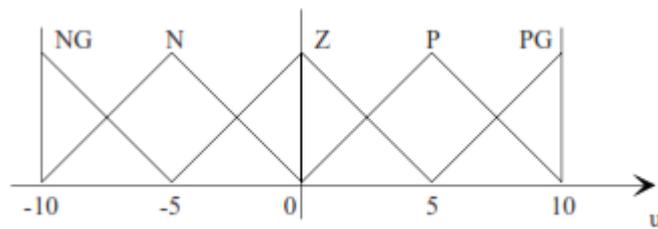
On considère que le pendule n'est pas récupérable s'il sort du domaine $[-20 \text{ degrés}, 20 \text{ degrés}]$, que la variation maximale de l'angle est de 10 degrés en valeur absolue. On définit chacune de ces variables par trois ensembles flous définis par des fonctions d'appartenance triangulaires (N pour négative, Z pour zéro et P pour positive).

Si la tension appliquée à l'induit du moteur, qui est la sortie du régulateur, est limitée à l'intervalle $[-10 \text{ V} ; 10 \text{ V}]$, on choisit de la définir par cinq ensembles flous (NG : négative grande, N : négative, Z : zéro, P : positive et PG : positive grande) de formes triangulaires. L'étape de fuzzification consiste à avoir une définition floue des entrées-sorties.

L'erreur sera l'écart angulaire entre le signal de sortie et le signal de consigne imposé (angle nul). La variation de l'erreur est la différence entre l'erreur à l'instant kT à celle de l'instant précédent $(k-1) T$.

Si on estime que les valeurs maximales, en valeur absolue, de l'erreur et de sa variation, sont respectivement égales à 20 et à 10, nous obtenons les ensembles flous suivants qui définiront les entrées-sorties du régulateur.





Étant donné que les deux variables d'entrée sont définies, chacune, par trois ensembles flous, on aboutit à 9 règles floues, lesquelles, dans le cas particulier du pendule inversé sont données par la table, dite d'inférence, suivante :

$\Delta e \backslash e$	N	Z	P
N	PG	P	Z
Z	P	Z	N
P	Z	N	NG

Il faut remarquer que dans le cas de cette table, le régulateur flou fournit un incrément de commande que l'on ajoute, à chaque pas d'échantillonnage, à la commande appliquée précédemment. Les 3 cas où la commande est Z, sont ceux où l'on doit garder la même commande, soit :

- L'erreur est Z et sa variation est Z (pendule à la position de consigne),
- L'erreur est P mais sa variation est N,
- L'erreur est N mais sa variation est P.

Dans les deux derniers cas, le pendule revient de lui-même à la position de consigne.

Après l'édition des règles, il reste à calculer les degrés d'appartenance de la variable de sortie à tous les ensembles flous qui lui sont associés.

Aux 5 ensembles flous de la variable de sortie correspondent 5 déductions floues.

1. Si (e est N) ET (Δe est N) ALORS u est PG,
2. Si $\{(e \text{ est N}) \text{ ET } (\Delta e \text{ est Z})\}$ OU $\{(e \text{ est Z}) \text{ ET } (\Delta e \text{ est N})\}$ ALORS u est P,
3. Si $\{(e \text{ est Z}) \text{ ET } (\Delta e \text{ est Z})\}$ OU $\{(e \text{ est P}) \text{ ET } (\Delta e \text{ est N})\}$ OU $\{(e \text{ est N}) \text{ ET } (\Delta e \text{ est P})\}$ ALORS u est Z,

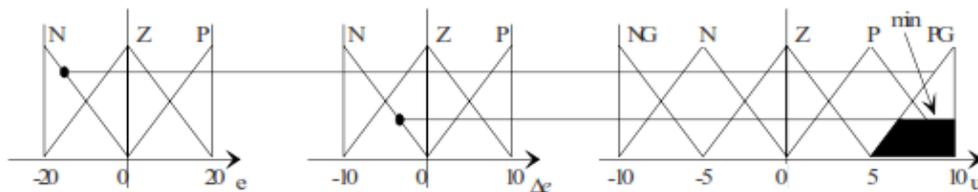
4. Si $\{(e \text{ est } P \text{ ET } (\Delta e \text{ est } Z)) \text{ OU } \{(e \text{ est } Z) \text{ ET } (\Delta e \text{ est } P)\}$ ALORS u est N

5. Si $(e \text{ est } P) \text{ ET } (\Delta e \text{ est } P)$ ALORS u est NG.

Chaque règle est composée de prémisses liées par les opérateurs ET, OU et donne lieu à une implication par l'opérateur ALORS.

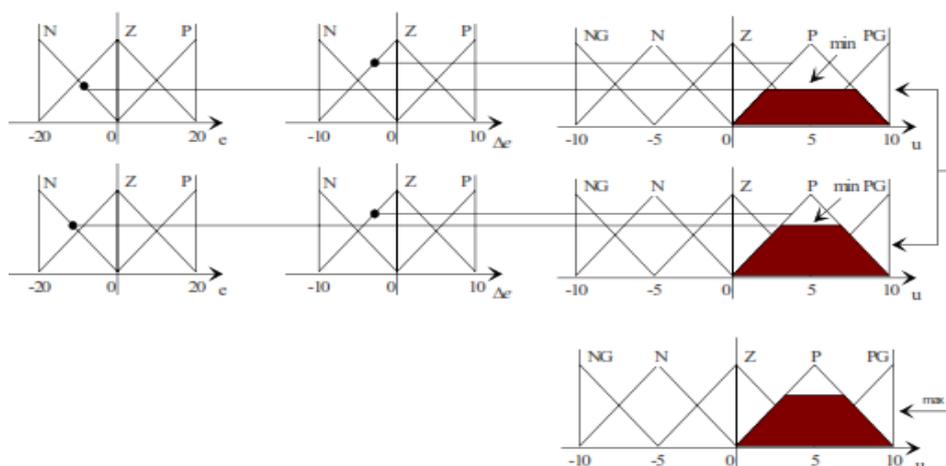
Chaque prémisses de la règle 1 est mise en évidence par l'écrêtage de la fonction d'appartenance PG soit par le degré d'appartenance de e à l'ensemble N, soit par celui de Δe à l'ensemble N.

Comme les clauses de la prémisses de la règle sont liées par l'opérateur ET, on écrête l'ensemble PG de la variable u par le minimum des deux degrés d'appartenance, comme le montre la figure suivante :

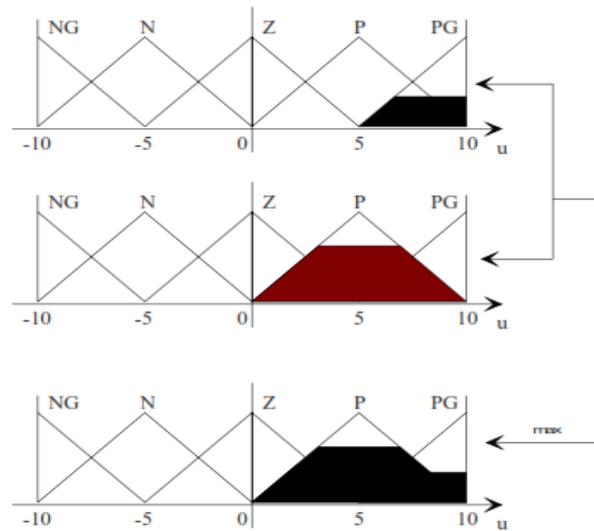


La règle 2 possède deux prémisses liées par l'opérateur OU. Pour chacune de ces prémisses, on réalise la même opération que pour la règle 1.

L'opérateur OU étant remplacé par l'opérateur max, on prendra le maximum des deux surfaces obtenues :



L'agrégation des règles 1 et 2 se fait en prenant en chaque point de l'ensemble de définition de la variable de sortie (univers de discours), le maximum des surfaces obtenues.



Si les règles 1 et 2 sont activées en même temps, la fonction d'appartenance de la variable de sortie est symbolisée par la surface pleine ci-dessus.

Cette méthode est dite « inférence max-min ». Une autre méthode, dénommée « som-prod » consiste à utiliser le produit pour le ET et la demi-somme pour le OU.
