



UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR

UFR : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département de Physique

Mention : Physique et Applications

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de **MASTER**

Spécialité : Physique des Matériaux

SUJET :

Instrumentation et mesures de température, des émissions de CO et de particules de matière (PM) dans un générateur d'air chaud à biomasse

Présenté par

Georges Ambouor DIEDHIOU

Sous la direction de

Dr. Lat Grand NDIAYE

Soutenu publiquement le 15 Juin 2021 devant le jury composé de :

Nom Prénom (s)	Grade	Qualité	Établissement
KOBOR Diouma	Professeur titulaire	Président de jury	UASZ
THIAO Sérigne	Assistant	Rapporteur	UASZ
DIATTA Joseph Sambasene	Maître assistant	Examineur	UASZ
DRAME Papa Elimane	Technicien supérieur	Examineur	SCPL, SA
HIMBANE Philippe Bernard	Docteur	Examineur	INVITE
NDIAYE Lat Grand	Maître de conférences	Directeur de recherches	UASZ

Année universitaire 2019-2020

DÉDICACES

Je rends grâce à DIEU de m'avoir donné la force, la volonté et le courage de surmonter toutes les difficultés rencontrées lors de mon cursus scolaire.

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents : mon père Omar DIEDHIOU et ma mère Marie Rose DIEDHIOU

Grand-mère je me souviens de vos mots, « N'oublie pas une chose DIATTA, ton oncle t'a récupéré pour t'inscrire à l'école, il ne faut jamais le décevoir,... » Repose en paix grand-mère.

À mon oncle Moussa DIEDHIOU et sa femme Marie Louise BASSENE

À mes chers frères et sœurs

À Aloïse DIEDHIOU et sa femme Aïssou DIEDHIOU

À toute ma famille

À tous mes enseignants depuis le préscolaire jusqu'à l'université

À tous les membres de l'Amicale des Etudiants Ressortissant du département d'Oussouye à Ziguinchor (AEROZ)

À tous les membres de l'Amicale des Jeunes Elèves et Etudiants du village de Sigandar (AJEES)

À Dr. Philippe Bernard HIMBANE

À tous mes amis

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé par le soutien de plusieurs personnes dont j'ai l'honneur de remercier.

Je remercie tout d'abord DIEU le tout puissant, le miséricordieux de m'avoir donné la possibilité d'arriver à terme de ce projet.

Dans ces quelques lignes qui suivent, mes remerciements vont à l'encontre de toutes les personnes qui ont contribué de prêt ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je tiens profondément à remercier mon encadrant Dr. Lat Grand NDIAYE, d'abord pour le choix du sujet mais aussi pour sa patience, sa disponibilité et ses encouragements. J'ai pu bénéficier de ses compétences scientifiques et de sa disponibilité pour résoudre les difficultés rencontrées lors de la réalisation du projet. Il m'a fait saisir pas mal d'opportunités durant mon cursus universitaire. Grâce à sa confiance, je suis arrivé à terme de ce travail, MERCI.

Mes vifs remerciements vont aux membres du jury pour la pertinence de leurs remarques et suggestions : au Pr. Diouma KOBOR d'avoir accepté de présider le jury et d'évaluer ce travail, aux Dr. Joseph Sambasene DIATTA, Dr. Philippe Bernard HIMBANE et Mr Papa Elimane DRAME qui ont bien voulu accepter d'examiner le travail et à Dr. Sérigne THIAO d'avoir accepté de rapporter ce présent travail.

J'adresse mes remerciements à tous les enseignants de l'université Assane Seck de Ziguinchor plus particulièrement à ceux des filières PC et MPI qui ont participé à ma formation. Je remercie également tous les étudiants et doctorants du département de physique surtout mes camarades de promotion.

Je tiens également à remercier Mr. Dioncounda YOCK et Mr. Lahat SOW (techniciens de Laboratoire au département de Physique) pour leur soutien précieux. Mes remerciements vont aussi à l'endroit du Dr. Mamadou Seydou Ba qui n'a cessé de m'encourager. Je remercie également Mr. Boubacar DIATTA et son équipe pour leur aide.

Je remercie infiniment mon oncle Moussa DIEDHIOU et sa femme Marie Louise BASSENE de m'avoir donné une bonne éducation. Je ne trouve même pas les mots exacts pour vous remercier de m'avoir élevé et tout donné depuis le bas âge jusqu'à aujourd'hui, MERCI.

J'exprime enfin ma gratitude à mes chers parents, amis et familles en reconnaissance de leurs aides, soutiens et encouragements tout au long de mon cursus. Vous étiez toujours là pour moi, que les relations continuent et que Dieu nous bénisse. Amen !

Résumé

Les générateurs d'air chaud sont des technologies utilisées pour la production d'air chaud pour le séchage ou le chauffage. Ils sont constitués d'un foyer de combustion alimenté en biomasse par des dispositifs classiques : silos de stockage, systèmes d'extraction et de transfert de la biomasse. Dans certains dispositifs l'alimentation se fait manuellement. Deux types de générateurs d'air chaud se distinguent : les générateurs d'air chaud « direct » et ceux « indirect ». Dans les systèmes « direct » l'air est en contact direct avec les fumées produites alors que dans les systèmes « indirect » l'énergie des fumées produites est transmise à l'air ambiant par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur. Comme dans les chaudières à biomasse, la combustion de la biomasse dans les générateurs d'air chaud est émettrice de polluants gazeux et de particules fines. Dans ce travail de Master, à l'absence du capteur de particules de matière PMS5003 qui n'était pas disponible, le générateur d'air chaud « indirect » a été instrumenté avec des capteurs de température (MAX6675) et un analyseur de gaz (RASI 700 Bio) dans le but de mesurer les températures et les émissions de gaz (particulièrement CO et NO_x) générées lors de la combustion de trois biomasses locales (coques d'arachide, coques de noix de cajou et briquettes de charbon). De ce fait, quatre capteurs de température ont été programmés sur une carte Arduino à l'aide du logiciel Arduino. L'étude a montré que la combustion des trois types de biomasse étudiée permet d'atteindre une température d'air chaud comprise dans la gamme 70-200 °C. Autrement dit, les combustibles étudiés peuvent être utilisés comme source d'énergie pour des applications de séchage de matériaux (tuile, briqueterie, biomasse,...) ou de produits agroalimentaires (fruits et légumes, céréales,...). Du point de vue, émissions de gaz, les concentrations en monoxyde de carbone (CO) étaient très élevées pour tous les combustibles étudiés. Les coques de noix de cajou demeuraient les plus polluantes avec une concentration moyenne en CO de 15 286 mg/m³. Toutes les concentrations en CO mesurées étaient au-dessus du seuil de 200 mg/m³ fixé par la norme sénégalaise (NS 05 062) en CO pour les chaudières à puissance thermique inférieure à 50 MW. Pour ce qui est des émissions de NO_x, les concentrations mesurées répondaient aux exigences de la norme sénégalaise en NO_x (valeur limite de 600 mg/m³). Les coques de cajou restaient également le combustible le plus polluant avec une concentration moyenne en NO_x de 247,7 mg/m³.

Mots clés : Générateur d'air chaud, Biomasse, Combustion, Cartes Arduino, Température, Emissions.

Abstract

Hot air generators are technologies used to generate hot air for drying or heating. They consist of a combustion chamber supplied with biomass by conventional devices: storage silos, biomass extraction and transfer systems. In some devices the feeding is done manually. There are two types of hot air generators: "direct" hot air generators and "indirect" hot air generators. In "direct" systems the air is in direct contact with the produced fumes while in "indirect" systems the energy of the produced fumes is transmitted to the ambient air through a heat exchanger. As in biomass boilers, the combustion of biomass in hot air generators emits gaseous pollutants and fine particles. In this Master thesis, in the absence of the material particle sensor PMS5003 which was not available, the "indirect" hot air generator was instrumented with temperature sensors (MAX6675) and a gas analyzer (RASI 700 Bio) in order to measure the temperatures and gas emissions (particularly CO and NO_x) generated during the combustion of three local biomasses (peanut shells, cashew shells and charcoal briquettes). As a result, four temperature sensors were programmed onto an Arduino board using the Arduino software. The study showed that the combustion of the three types of biomass studied achieves a hot air temperature in the range 70-200 ° C. In other words, the fuels studied can be used as an energy source for applications for drying materials (tiles, brickyards, biomass, etc.) or agrifood products (fruits and vegetables, cereals, etc.). From a gas emissions point of view, carbon monoxide (CO) concentrations were very high for all fuels studied. Cashew nut shells remained the most polluting with an average CO concentration of 15 286 mg / m³. All the CO concentrations measured were above the threshold of 200 mg / m³ set by the Senegalese standard (NS 05 062) in CO for boilers with thermal power below 50 MW. With regard to NO_x emissions, the measured concentrations met the requirements of the Senegalese NO_x standard (limit value of 600 mg / m³). Cashew shells also remained the most polluting fuel with an average NO_x concentration of 247.7 mg / m³.

Keywords: Hot air generator, Biomass, Combustion, Arduino boards, Temperature, Emissions.

Liste des abréviations

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie
AO	Analog Output (sortie analogique)
CLK	Clock (horloge)
CNSL	Cashew Nut Shell Liquid (Liquide de coques de noix de cajou)
CO	Monoxyde de carbone
CO₂	Dioxyde de carbone
COV	Composés Organiques Volatils
CS	Chip Select (sélection de circuit)
CSV	Comma-Separated Values (Valeurs séparées par des virgules)
CVC	Chauffage, Ventilation et Climatisation
DO	Data Out (sortie de donnée)
EDI	Espace ou Environnement de Développement Intégré
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory (mémoire en lecture seule programmable effaçable électriquement)
GND	Ground (masse)
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
HCI	Hydrocarbures imbrulés
ICSP	In-Circuit Serial Programme (programmation série en circuit)
LCPM	Laboratoire de Chimie et de Physique des Matériaux
LSB	Least Significant Byte (bit de poids faible)
NO_x	Oxydes d'azote
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
PM	Particules de matière
PPM	Partie Par Million
PUF	Particules ultrafines
PWM	Pulse Width Modulation (module de largeur d'impulsion)
ROM	Read-Only Memory (mémoire en lecture seule)
SDA	Serial Data (données en série)
SCK	Serial Clock (horloge série)
SO₂	Dioxyde de soufre
SPI	Serial Peripheral Interface (interface série périphérique)
SRAM	Static Read Access Memory (mémoire d'accès en lecture statique)
UASZ	Université Assane Seck de Ziguinchor
USB	Universal Serial Bus (bus universel en série)

Listes des figures et tableaux

Liste des figures

Figure 1.1 : Schéma de principe d'un générateur d'air chaud direct à biomasse [4]	5
Figure 1.2 : Schéma de principe d'un générateur d'air chaud indirect à biomasse [4]	6
Figure 2.1 : Coques de noix de cajou	14
Figure 2.2 : Coques d'arachide.....	15
Figure 2.3 : Briquettes de charbon	15
Figure 2.4 : Schéma du principe de fonctionnement du générateur d'air chaud indirect.....	18
Figure 2.5 : Image réelle du générateur d'air chaud indirect utilisé.....	19
Figure 2.6 : Images réelles de la carte Arduino Uno.....	21
Figure 2.7 : Images réelles de la carte Arduino Nano	21
Figure 2.8 : Connectiques ou éléments composant la carte Arduino Uno	22
Figure 2.9 : Présentation de la structure générale du logiciel Arduino	23
Figure 2.10 : Présentation en détail des boutons et les fonctions de l'interface de programmation d'Arduino	24
Figure 2.11 : Organigramme d'acquisition des données	25
Figure 2.12 : Capteur de température MAX6675 et ses composants	26
Figure 2.13 : Images de test d'étalonnage du capteur MAX6675 sur de l'eau chaude.....	27
Figure 2.14 : Schéma électrique des quatre capteurs de température de type MAX6675.....	28
Figure 2.15 : Image réelle du schéma de câblage des quatre capteurs de température de type MAX6675.....	28
Figure 2.16 : Photo de l'analyseur de gaz RASI 700 Bio et ses composants.....	29
Figure 2.17 : Capteur de particules de matière (PM) PMS5003 [23].....	30
Figure 2.18 : Photo du générateur d'air chaud indirect équipé d'appareils de mesure	32
Figure 2.19 : Système de mesure et de contrôle du générateur d'air chaud à échangeur de chaleur	33
Figure 2.20 : Image de la chambre de combustion en flamme.....	34
Figure 3.1 : Température de l'eau affichée par le MAX6675 et par le thermomètre TP101 en fonction du temps (mn)	37
Figure 3.2 : Corrélation entre les températures $T_{MAX6675}$ et T_{TP101}	38
Figure 3.3 : Variation temporelle des températures à différents endroits du générateur d'air chaud indirect : cas de la combustion des coques d'arachide sous clapet ouvert	39
Figure 3.4 : Variation des concentrations de gaz en fonction du temps : cas de la combustion des coques d'arachide sous clapet ouvert.....	40
Figure 3.5 : Variation temporelle des températures à différents endroits du générateur d'air chaud : cas de la combustion des coques d'arachide sous clapet fermé	42
Figure 3.6 : Variation des concentrations de gaz en fonction du temps : cas de la combustion des coques d'arachide sous clapet fermé.....	43
Figure 3.7 : Variation des températures à différents endroits du générateur d'air chaud en fonction du temps : cas de la combustion des briquettes de charbon sous clapet ouvert.....	45
Figure 3.8 : Variation des concentrations de gaz en fonction du temps : cas de la combustion des briquettes de charbon sous clapet ouvert	46
Figure 3.9 : Variation des températures à différents endroits du générateur d'air chaud en fonction du temps : cas de la combustion des briquettes de charbon sous clapet fermé.....	47
Figure 3.10 : Variation des concentrations de gaz en fonction du temps : cas de la combustion des briquettes de charbon sous clapet fermé	48
Figure 3.11 : Variation des températures à différents endroits du générateur d'air chaud en fonction du temps : cas de la combustion des coques de noix de cajou sous clapet fermé.....	50

Figure 3.12 : Variation des concentrations de gaz : cas de la combustion des coques de noix de cajou sous clapet fermé 51

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Effets cliniques associés à la concentration du CO dans l'air ambiant en fonction de la durée d'exposition [13] 10

Tableau 2.1 : Synthèse des trois biomasses utilisées avec quelques données de la littérature [19] 16

Tableau 3.1 : Tableau résumant les valeurs moyennes du CO et de NO_x et celles maximales de la température d'air de sortie pour les différents tests réalisés. 52

Sommaire

DÉDICACES	ii
REMERCIEMENTS	iii
Résumé	iv
Abstract	v
Liste des abréviations	vi
Listes des figures et tableaux.....	vii
Sommaire	ix
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre 1 : Étude bibliographique sur le mode opératoire et les émissions polluantes dans un générateur d'air chaud alimenté par la biomasse.....	3
Introduction	4
1.1 Définition et caractéristiques d'un générateur d'air chaud à biomasse	4
1.1.1 Générateur d'air chaud à biomasse	4
1.1.2 Effet de la température sur un générateur d'air chaud à biomasse.....	6
1.2 Combustion de la biomasse dans les générateurs d'air chaud.....	6
1.3 Émissions de polluants engendrés lors de la combustion d'une biomasse dans un générateur d'air chaud	8
1.3.1 Les émissions de CO	9
1.3.2 Les émissions de CO ₂	10
1.3.3 Les émissions des particules de matière (PM)	11
1.3.4 Les émissions d'oxydes d'azote (NO _x)	11
Conclusion.....	12
Chapitre 2 : Présentation du matériel et méthodes utilisés pour la caractérisation des biomasses dans un générateur d'air chaud indirect	13
Introduction	14
2.1 Présentation des biomasses utilisées.....	14
2.1.1 Coques de noix de cajou.....	14
2.1.2 Coques d'arachide	15
2.1.3 Briquettes de charbon.....	15
2.2 Présentation du dispositif expérimental.....	16
2.3 Mise en place du programme pour la mesure de la température à différents endroits du générateur d'air chaud indirect	20
2.3.1 Présentation du système de programmation Arduino	20
2.3.2 Présentation du capteur de température de type MAX6675.....	25
2.3.3 Étalonnage des capteurs de température MAX6675	27

2.3.4	Câblage des quatre (4) capteurs de température MAX6675 utilisés pour les mesures 27	
2.4	Présentation de l'analyseur de gaz.....	28
2.5	Présentation du capteur de particules de matière (PM) PMS5003	29
2.6	Instrumentation du générateur d'air chaud.....	31
2.6.1	Installation des thermocouples	31
2.6.2	Installation et réglage du protocole d'analyse de l'analyseur	31
2.7	Protocole de démarrage des tests.....	33
	Conclusion.....	34
	Chapitre 3 : Mesures de température, des émissions de monoxyde de carbone CO, de dioxyde de carbone CO₂ et des oxydes d'azote NO_x dans le générateur d'air chaud à biomasse	35
	Introduction	36
3.1	Résultats et discussions	36
3.1.1	Résultats du test d'étalonnage des capteurs de température MAX6675	36
3.1.2	Émissions de gaz issus de la combustion des coques d'arachide.....	38
3.1.2.1	Fonctionnement du générateur d'air chaud indirect sous clapet ouvert	38
3.1.2.2	Fonctionnement du générateur d'air chaud indirect sous clapet fermé	41
3.1.3	Émissions de gaz issus de la combustion des briquettes de charbon	44
3.1.3.1	Fonctionnement du générateur d'air chaud indirect sous clapet ouvert	44
3.1.3.2	Fonctionnement du générateur d'air chaud indirect sous clapet fermé	47
3.1.4	Émissions de gaz issus de la combustion des coques de noix de cajou	49
	Conclusion.....	52
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	53
	Références bibliographiques	xi
	ANNEXES.....	xiv

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui le monde est frappé par une crise sanitaire et climatique liée à la production de l'énergie nécessitant de hautes températures. Selon l'OMS en 2018, les émissions polluantes étaient un grand risque environnemental pour la santé humaine. Il était estimé que l'exposition à la pollution de l'air provenant des industries, du transport et autres pourrait conduire à 4,2 millions de morts par an dans le monde. En outre, près de 90 % de décès dans les pays sous-développés sont liés à la pollution atmosphérique [1]. Chaque jour, les personnes inhalent un volume important d'air qui peut contenir plusieurs polluants liés à la santé. Cette pollution de l'air est un mélange mixte de polluants chimiques (monoxyde de carbone, dioxyde de soufre, oxydes d'azote, composés organiques volatiles,...), physiques (particules fines, poussières,...) ou biologiques (pollens, moisissures...) provenant en majorité des activités humaines [2]. Les sources principales de ces émissions sont souvent le pétrole, les gaz ou le charbon minéral. Ces énergies fossiles ; non seulement elles ne peuvent pas se renouveler grandement à l'échelle du temps humain, mais elles dégagent des gaz nocifs et nuisibles à la santé.

Cependant, ces énergies fossiles ne sont pas les seules responsables des émissions des gaz à effet de serre. Beaucoup de personnes associent la pollution atmosphérique à la seule utilisation des combustibles fossiles dans les pays industrialisés dont le niveau élevé de développement économique se traduit par une forte consommation d'énergie par habitant [3]. Or les énergies dites renouvelables sont également responsables d'une partie de la pollution de l'air atmosphérique en cas de mauvaise valorisation, en atteste le cas de la combustion de la biomasse. A l'instar des autres sources d'énergies, propres, inépuisables, la biomasse ne connaît pas aussi de limite finie ; elle peut se renouveler si on lui laisse le temps et l'espace nécessaire. Dans le domaine de l'énergie, la biomasse peut se définir comme une source d'énergie renouvelable provenant de la matière organique d'origine végétale ou animale de la plus petite à la plus grande espèce. La valorisation énergétique de la biomasse peut produire plusieurs formes d'énergies utiles telles que les gaz, la chaleur ou l'électricité. La chaleur est produite en général par la combustion de la biomasse ou des gaz dans des technologies telles que les chaudières ou les générateurs d'air chaud. Néanmoins la production de la chaleur par la biomasse dans ces technologies est responsable de certaines émissions polluantes (CO, CO₂, NO_x, particules de matières PM,...). C'est dans cette perspective que porte la problématique de notre étude.

Le présent travail porte sur la caractérisation des fumées de combustion et sur la mesure des températures au sein d'un générateur d'air chaud indirect alimenté par la biomasse.

Dans cette étude de caractérisation, la mesure des émissions de CO₂, de CO, de PM et de NO_x est fondamentale. Les trois derniers font l'objet d'une attention particulière de la part des acteurs de la santé à cause de leurs effets néfastes sur la santé humaine. Dans le cas d'un générateur d'air chaud indirect, la connaissance de la température en sortie de l'échangeur de chaleur est primordiale afin de se prononcer sur le type d'application de séchage. Pour cela, des mesures des températures, dans la chambre de combustion, à l'entrée et à la sortie de l'échangeur de chaleur et dans le conduit des fumées sont nécessaires.

L'intérêt de ce travail est l'étude de combustion de plusieurs types de biomasse dans un générateur d'air chaud indirect en vue de définir la biomasse la moins polluante et permettant d'atteindre une température de séchage adéquate à une application donnée.

Cette présente étude est structurée en trois chapitres.

Le premier chapitre présente une revue succincte sur les générateurs d'air chaud en mettant en avant les différentes technologies de générateurs d'air chaud et les combustibles généralement utilisés dans ces types d'appareils. La notion de combustion ainsi que les émissions polluantes occasionnées ont été également abordées.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des matières premières étudiées et des différents outils et méthodes utilisés lors de la réalisation de cette étude.

Le dernier chapitre concerne l'étude expérimentale. Elle consiste, dans un premier temps, à la présentation des résultats des tests d'étalonnage des capteurs de température utilisés. Puis, dans un second temps, les résultats de mesures de température et d'émissions de gaz sont présentés et discutés.

Une conclusion générale fera l'objet d'une synthèse de ces trois chapitres avant de dégager d'éventuelles perspectives pour de prochaines études.

Chapitre 1 : Étude bibliographique sur le mode opératoire et les émissions polluantes dans un générateur d'air chaud alimenté par la biomasse

Introduction

Dans cette première partie de notre étude, nous avons effectué une brève présentation sur le générateur d'air chaud en mettant en avant les différentes technologies de générateurs d'air chaud et les combustibles généralement utilisés dans ces types d'appareils. Ce chapitre évoque également la notion de combustion de biomasse ainsi que les émissions de gaz et de particules de matière. Le chapitre se termine par une conclusion partielle résumant le travail développé.

1.1 Définition et caractéristiques d'un générateur d'air chaud à biomasse

1.1.1 Générateur d'air chaud à biomasse

a. Définition

Comme les chaudières à biomasse, le générateur d'air chaud à biomasse peut être défini tout simplement comme un système utilisant la biomasse comme combustible pour fournir de l'air chaud destiné à des applications de séchage, de chauffage ou de granulation. Les combustibles pouvant être utilisés sont le bois, les sous-produits du bois (sciure, copeaux, écorces, pellets, granules, etc.), les résidus (paille, coques de fruits, etc.) ou encore les déchets biodégradables agricoles, industriels et ménagers. Un générateur d'air chaud produit de la chaleur grâce à la combustion de ces matières organiques d'où sa différence avec une chaudière classique alimentée par du gaz ou du fioul.

b. Caractéristiques et fonctionnement

Un générateur d'air chaud alimenté par la biomasse fonctionne presque de la même manière qu'une chaudière à biomasse classique. En réalité le combustible est brûlé dans la chambre de combustion (foyer) du générateur afin de produire de la chaleur (air chaud) utilisée pour l'alimentation de séchoirs, de fours ou le chauffage des locaux. Cette production de l'énergie thermique est nécessaire pour différentes étapes de production dans les unités de transformation, surtout le séchage des produits locaux. En ce qui concerne le logement dans les pays européens où il fait froid, le générateur d'air chaud à biomasse peut procurer un confort thermique à l'ensemble d'un bâtiment. En effet nous pouvons distinguer deux types de générateur d'air chaud fonctionnant avec de la biomasse [4] :

- ◆ Les générateurs d'air chaud « direct » : pour ces types de générateur, l'air d'entrée (air ambiant) est en contact direct avec les fumées de combustion produites dans la chambre de combustion (foyer). Ce mélange (air-fumées de combustion) est utilisé directement dans les process avec ou sans dilution. Ces générateurs sont principalement appliqués ou utilisés dans les process à haute température et pour lesquels la propreté de l'air chaud pour le process n'est pas une limite ;

- ◆ Les générateurs d'air chaud « indirect » ou générateurs d'air chaud à échangeur de chaleur : dans ce cas, les fumées de combustion produites dans le foyer sont utilisées pour réchauffer l'air à destination du process. L'air ambiant est propulsé à travers un moteur de ventilation externe afin d'être réchauffé dans un échangeur de chaleur dont le circuit primaire est alimenté par les fumées de combustion. Ces types de générateurs d'air chaud sont le plus souvent destinés aux applications (séchage, chauffage, etc.) nécessitant un air chaud pur (air chaud propre).

Les figures 1.1 et 1.2 illustrent successivement les schémas de principe des générateurs d'air chaud direct et indirect avec des gammes d'utilisation.

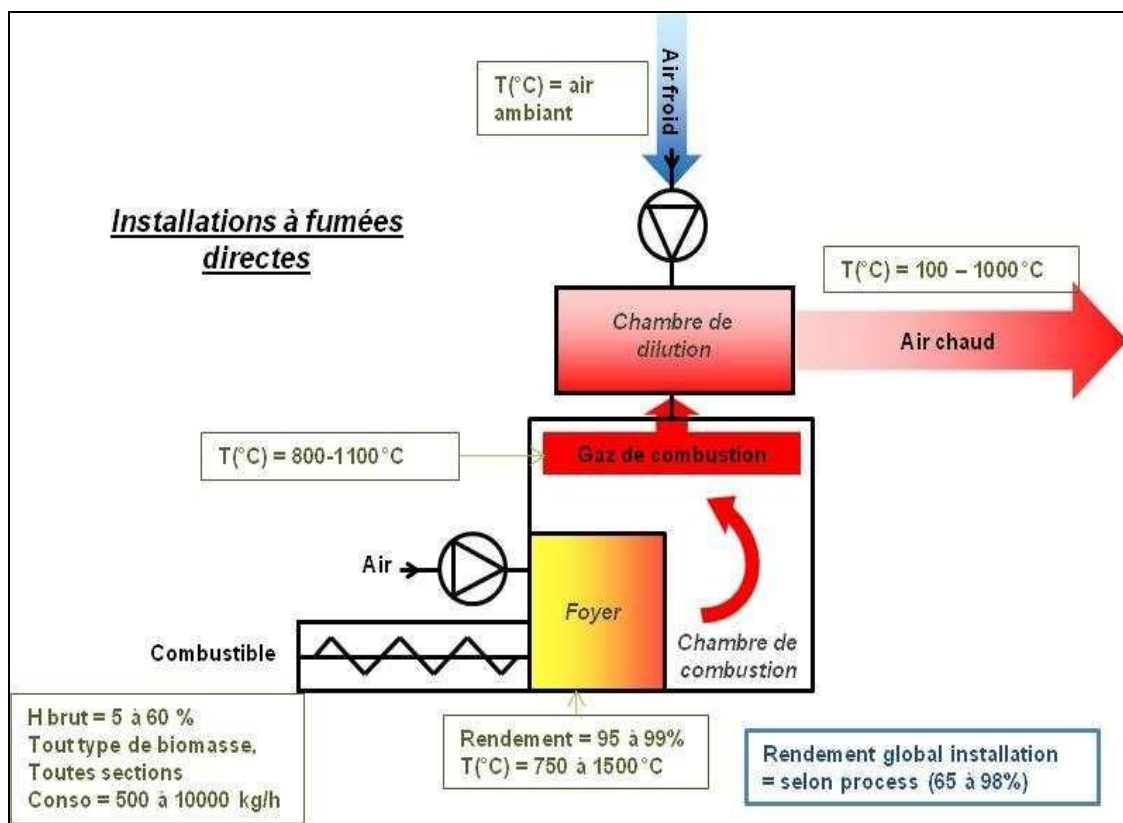


Figure 1.1 : Schéma de principe d'un générateur d'air chaud direct à biomasse [4]

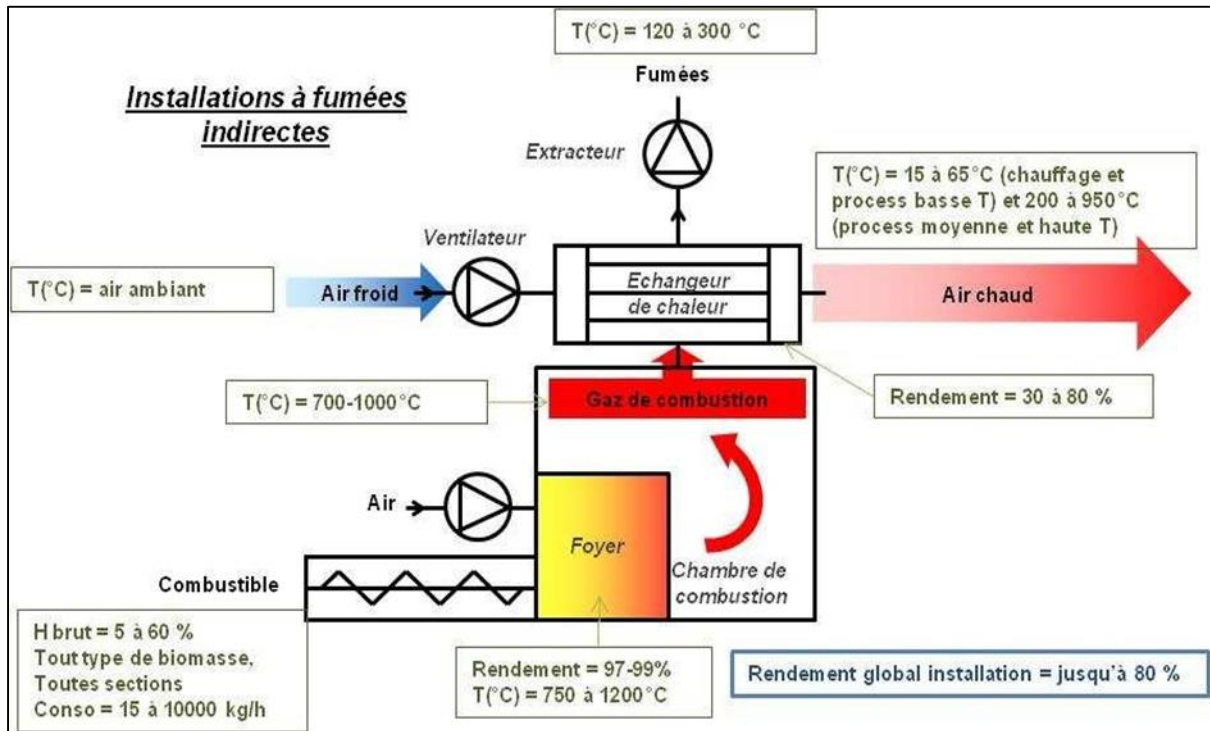


Figure 1.2 : Schéma de principe d'un générateur d'air chaud indirect à biomasse [4]

1.1.2 Effet de la température sur un générateur d'air chaud à biomasse

Les générateurs d'air chaud à biomasse souvent utilisés pour la récupération de la chaleur issue de la combustion de la biomasse sont liés à des contraintes différentes. Ils sont soumis à des conditions critiques en termes de température (800 à 1100°C) qui s'avère être la plus grande caractéristique pour les matériaux à utiliser durant la fabrication de ces générateurs d'air chaud [5]. L'augmentation de la température entraîne une augmentation de la quantité des gaz formés ; c'est-à-dire qu'elle favorise le craquage des vapeurs condensables et donc la formation de gaz. Plus la température est élevée, plus elle entraîne une vitesse de chauffage plus importante et donc favorise la formation de matières volatiles durant la combustion ou la gazéification de la biomasse [6].

1.2 Combustion de la biomasse dans les générateurs d'air chaud

La combustion de la biomasse n'est rien d'autre que le fait de brûler de la matière organique surtout d'origine végétale pour produire de l'énergie. Cette combustion de la biomasse dans les générateurs d'air chaud produit de la chaleur par oxydation des combustibles utilisés, généralement cela se fait en présence d'air.

Dans le cas des chaudières industrielles, l'eau chaude ou la vapeur ainsi obtenues sont utilisées dans des procédés industriels ou dans des réseaux de chauffage urbain. Ensuite la vapeur peut être également envoyée dans une turbine ou un moteur à vapeur qui à son tour va produire de l'énergie mécanique puis de l'électricité. Cette production simultanée de la chaleur et de l'électricité est appelée cogénération.

Grâce au phénomène de la photosynthèse, le dioxyde de carbone émis lors de la combustion est moins dangereux pour l'homme car il, le dioxyde de carbone servira à nourrir la végétation. Ainsi la végétation elle-même va produire de l'oxygène au service des êtres vivants. D'où la considération de la combustion de la biomasse (le bois) sous certaines conditions comme source d'énergie durable donc neutre en émission de CO₂, contrairement à ce que l'on pourrait penser [7]. Ces conditions sont satisfaites lorsque la combustion est parfaitement complète (excès d'air). Par contre, si la combustion n'est pas faite dans de bonnes conditions, il peut y avoir d'énormes problèmes non seulement sur la santé mais aussi sur la pollution atmosphérique. Cela entraîne notamment les émissions de polluants.

L'air entrant dans la combustion est composé de 21 % d'oxygène et 79 % d'azote atmosphérique sur lequel on a ajouté une fraction molaire d'argon qui représente 1 % dans l'azote [8]. D'une manière générale un combustible de biomasse a une formule brute du type C_x H_y O_z et est constitué de carbone (C), d'hydrogène (H) et d'oxygène (O) ; avec x, y, z les indices molaires. Ces indices sont définis par les pourcentages massiques des éléments chimiques correspondants, tout en connaissant leur masse molaire (M (C), M (H) et M (O)). Ils sont donnés par les formules suivantes :

- Indice molaire de carbone

$$x = \frac{\%C \times M}{12 \times 100} \quad (1.1)$$

- Indice molaire d'hydrogène

$$y = \frac{\%H \times M}{1 \times 100} \quad (1.2)$$

- Indice molaire d'oxygène

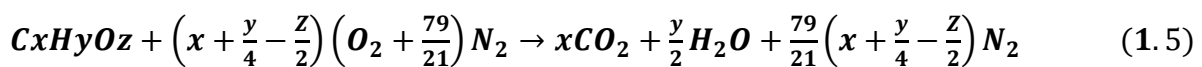
$$z = \frac{\%O \times M}{16 \times 100} \quad (1.3)$$

Avec 12 g, 1 g et 16 g les masses atomiques respectives de C, H et O. Ainsi %C, %H et %O représentent leurs pourcentages respectives et M la masse molaire du composé (M_{combustible}).

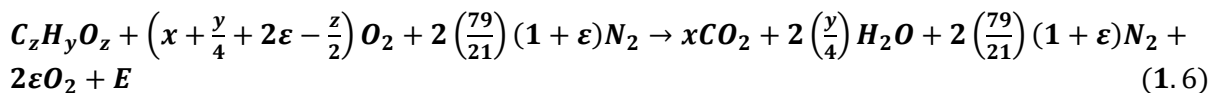
Étant donné que les combustibles utilisés dans les générateurs d'air chaud sont de type biomasse lignocellulosique, on peut donc déterminer la masse molaire moléculaire des combustibles via la formule ci-dessous :

$$M_{combustible} = (12x + y + 16z) \times \frac{10^{-3}kg}{mol} \quad (1.4)$$

La réaction de combustion de la biomasse peut alors s'écrire de la manière suivante. Les réactifs sont composés du combustible (biomasse) appelé aussi carburant ($C_x H_y O_z$) plus de l'oxygène (O_2) et d'azote (N_2) qui représentent l'air appelé comburant. Pour les produits nous avons le dioxyde de carbone (CO_2), l'eau (H_2O) et l'azote (N_2). Ainsi l'équation d'une combustion neutre s'écrit :



C'est intéressant de noter que l'oxygène participe à l'oxydation de la matière organique (combustible). La réaction d'une combustion complète (avec excès d'air) peut s'écrire alors de la manière suivante :



Avec ε l'excès d'air et E l'énergie (chaleur).

1.3 Émissions de polluants engendrés lors de la combustion d'une biomasse dans un générateur d'air chaud

Jusqu'à aujourd'hui le monde cherche toujours à réduire les émissions des gaz polluants (gaz à effet de serre) qui ne cessent de créer des dégâts environnementaux ; le réchauffement climatique mais surtout des problèmes de santé humaine et animale. Étant donné que les conditions ne permettent pas toujours une combustion parfaite, la combustion émet donc des particules et des gaz polluants. Les émissions polluantes réglementées les plus connues sont le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO_x), les hydrocarbures imbrulés (HCl) ou les composés organiques volatils (COV) et les particules de matière (PM) [9]. La combustion de la biomasse à grande échelle constitue un risque à la santé humaine dû à d'importantes émissions toxiques de particules fines, de monoxyde de carbone (CO), de métaux lourds, etc. Elle constitue également une source importante d'émission d'Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) [10].

Dans ce travail de master, nous nous consacrerons à l'étude des émissions de CO, de NO_x et de particules fines. Néanmoins, les concentrations de CO_2 et d' O_2 dans les fumées de combustion seront mesurées.

1.3.1 Les émissions de CO

La combustion produit parfois des corps dangereux voire mortels. Lorsque l'oxygène est en quantité insuffisante, la combustion d'un hydrocarbure est incomplète. Elle produit alors du carbone et de l'eau, mais elle peut surtout donner lieu à la formation d'un gaz incolore, inodore et toxique : le monoxyde de carbone (CO). Le monoxyde de carbone remplace progressivement l'oxygène sur les globules rouges sur lesquels il se fixe 300 fois plus. Or l'oxygène est indispensable au fonctionnement de toutes les cellules de l'organisme. Le monoxyde de carbone asphyxie donc peu à peu l'organisme. Une personne intoxiquée au monoxyde de carbone ressent tout d'abord de la fatigue, une faiblesse dans les jambes, des vertiges et des maux de tête, puis apparaissent nausées et vomissements, ensuite la personne est prise de somnolence, ce qui l'empêche de réagir. Cette personne a alors besoin d'un apport massif d'oxygène qui ne peut être pratiqué qu'en milieu hospitalier [11]. A cet effet, un certain nombre de valeurs a été défini par les institutions de surveillance (OMS, agences nationales...) pour servir de référence aux populations (cf. tableau 1.1). Le nombre de partie par million (ppm) équivaut à la concentration d'une substance qui est égale à un millionième. Cette unité de mesure permet de savoir combien de molécules de polluants nous pouvons trouver dans un million de molécules dans l'air. Soit 100 ppm de CO signifient que dans 1 000 000 de molécules de gaz, 100 molécules sont du CO et 999 900 représentent d'autres gaz. D'où la conversion en pourcentage (%) se fait en multipliant la valeur par le rapport 100/1000000 (1/10000). Pour les gaz ou les vapeurs, la conversion de partie par million (ppm) en milligramme par mètre cube (mg/m^3) et vice-versa peut se faire également en utilisant les formules suivantes (voir les équations 1.7 et 1.8).

$$\text{Concentration} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{concentration (ppm)} \times M}{24,45} \quad (1.7)$$

$$\text{Concentration (ppm)} = \frac{24,45 \times \text{concentration} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right)}{M} \quad (1.8)$$

Avec M la masse molaire ou le poids moléculaire du composé. Dans les équations 1.7 et 1.8 ci-dessus, la valeur 24,45 est le volume (en litres) d'une mole (molécule-gramme) de gaz ou de vapeur à une pression d'une atmosphère (760 Torr ou 760 mm Hg) et à 25 °C. Soit un torr ou un millimètre de mercure (mm Hg) équivaut à environ 133,322 Pascals (Pa) [12].

Cependant en ce qui concerne les oxydes d'azote ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) la conversion de la concentration de ppm en mg/m^3 se fait d'abord par un calcul séparé de la concentration en NO et celle en NO_2 avant de faire la somme des deux pour trouver ou obtenir la valeur convertie de NO_x .

Le tableau 1.1 ci-dessous met en évidence l'effet de la concentration du monoxyde de carbone (CO) en partie par million (ppm), en pourcentage (%) et en milligramme par mètre cube (mg/m³) en fonction de la durée d'exposition.

Tableau 1.1 : Effets cliniques associés à la concentration du CO dans l'air ambiant en fonction de la durée d'exposition [13]

CO dans l'air (ppm)	CO dans l'air (%)	CO dans l'air (mg/m ³)	Symptômes chez les adultes en bonne santé
10	0,001	11,452	Concentration maximale autorisée dans un environnement professionnel pour une exposition de 8 heures par jour (OMS)
35	0,0035	40,082	Sécurité au lieu de travail, possible pour une durée d'exposition inférieure à 8 heures
50	0,005	57,26	Il s'agit de la limite maximale admissible dans un parking automobile couvert
100	0,01	114,52	Légers maux de tête ; moins dangereux
200	0,02	229,04	Maux de tête, vertiges, nausées, fatigue (céphalées en 2 à 3 heures)
400	0,04	458,08	Maux de tête intenses, danger de mort après 3 heures (céphalées moins d'une heure)
1000	0,1	1145,2	Maux de tête, vertiges, nausées. Perte de conscience en 45 mn, décès après 2 à 3 heures (aspect « rose » de la peau)
1200	0,12	1374,24	Symptômes sévères après 20 mn, décès endéans l'heure (dangerosité immédiate)
2 000	0,2	2290,4	Maux de tête, vertiges, nausées après 5 mn, perte de conscience ou de connaissance après 30 mn (perte de conscience rapide, dommages irréversibles, décès dans 1 heure)
6 400	0,64	7329,28	Céphalées et vertiges après 1 à 2 mn, perte de conscience après 10 à 15 mn.
10 000	1	11452	Perte de conscience immédiate, décès en 1 à 3 mn
12 800	1,28	14658,56	Inflammabilité
128 000	12,8	146585,6	Seuil d'explosibilité

Ce polluant toxique est toujours contrôlé par le rapport air/carburant ; s'il y a suffisamment d'air dans la combustion l'émission de CO par oxydation devient faible. La combustion dans les générateurs d'air chaud dépend alors de la température initiale des combustibles à brûler et du taux d'humidité, ce qui fait que l'oxydation est incomplète des fois et dégage beaucoup de CO.

1.3.2 Les émissions de CO₂

Au titre des gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone est considéré comme un gaz polluant. Cependant, au regard de la combustion de la biomasse (le bois), et ce en rapport avec la combustion des énergies fossiles, un équilibre est atteint [14].

Il est important de savoir que la quantité dégagée lors de la combustion du bois est comparable à celle produite durant sa décomposition. Cette quantité de CO_2 est équivalente à celle absorbée par les végétaux au cours de leur développement à travers le phénomène de photosynthèse.

1.3.3 Les émissions des particules de matière (PM)

Les particules, plus particulièrement celles très fines, peuvent avoir des effets néfastes sur l'organisme, plus précisément sur le système respiratoire. Grâce à leur petite taille, les nanoparticules de moins de 50 nm peuvent pénétrer jusqu'à l'intérieur des poumons où elles se logent dans les tissus interstitiels. Cela entraîne souvent une sévère inflammation respiratoire et une intoxication pulmonaire aiguë [9].

Les particules sont classées selon leur diamètre (taille) aérodynamique. Sans tenir compte des critères de forme ou de composition chimique, ce paramètre dit taille est important pour caractériser leur pouvoir de pénétration dans l'appareil respiratoire des êtres humains.

En effet, les particules sont distinguées par leur dimension [1] :

- Les poussières sédimentaires : elles sont les plus grosses et retombent dans un rayon de quelques kilomètres (km) de leur lieu d'émission ;
- Les poussières en suspension : ces particules en suspension ont un diamètre moyen inférieur à $75 \mu\text{m}$ soit l'équivalent du diamètre d'un cheveu ;
- Les PM_{10} : ce sont des particules qui ont un diamètre moyen inférieur à $10 \mu\text{m}$;
- Les $\text{PM}_{2,5}$: ces particules dites fines ont un diamètre aérodynamique moyen inférieur à $2,5 \mu\text{m}$. Elles sont principalement produites par des phénomènes de combustion. Leur temps de suspension dans l'air peut aller jusqu'à des jours en raison de leur légèreté ;
- Les PM_1 : ce sont des particules ayant un diamètre moyen inférieur à $1 \mu\text{m}$. Elles sont souvent dites particules submicroniques ;
- Les $\text{PM}_{0,1}$: ces particules ultrafines (PUF) ont un diamètre aérodynamique qui est inférieur à 100nm .

Les réactions de combustion libèrent plus les particules de tailles infimes ou faibles qui sont les $\text{PM}_{0,1}$ (particules ultrafines), les PM_1 (particules submicroniques) et les $\text{PM}_{2,5}$ (particules fines) [15].

1.3.4 Les émissions d'oxydes d'azote (NO_x)

D'un point de vue chimique, les oxydes d'azote (NO_x) regroupent tous les composés de formule brute N_xO_y avec un degré d'oxydation de l'azote variant de I à V. Au regard des industriels, seuls le monoxyde d'azote (NO), le dioxyde d'azote (NO_2) et parfois le protoxyde d'azote (N_2O) sont reconnus sous cette appellation. Dans ce travail, seuls le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO_2) ont été étudiés.

L'azote peut se combiner avec l'oxygène à plus ou moins haute température pour former le monoxyde d'azote (NO), sa toxicité est mal connue car il s'oxyde naturellement à température ambiante en dioxyde d'azote dans l'atmosphère. Il est donc très difficile d'estimer ses effets sur l'homme. Cependant, son action se caractérise par une irritation des muqueuses. Les NO et NO₂ participent à la formation des pluies acides qui peuvent avoir des conséquences graves sur les sols et les nappes phréatiques. Cette acidification augmente la solubilité des métaux lourds et représente donc un danger pour la santé. Ces pluies acides sont tenues en partie responsables de l'acidification des cours d'eau et des sols, engendrant la disparition de certaines espèces animales. A cela s'ajoute à la formation d'ozone troposphérique, lié au réchauffement climatique [16].

Le dioxyde d'azote (NO₂) est un gaz irritant à caractère fortement oxydant. Les effets indésirables directs sur l'homme concernent essentiellement les fonctions respiratoires : s'exposer à une concentration en NO₂ entraîne une détresse respiratoire aiguë, de la toux et des irritations des voies respiratoires. Une exposition continue peut produire une accumulation anormale de gaz dans les bronches (œdème pulmonaire) [16,17].

Conclusion

Cette revue de la littérature aura permis d'avoir une vue d'ensemble sur le mode opératoire et les émissions de polluants dans un système dit générateur d'air chaud fonctionnant avec un combustible de biomasse. En résumé, l'objectif principal de ce travail est d'utiliser la meilleure technologie avec la meilleure biomasse pour obtenir une combustion propre et efficace dans un système de valorisation de biomasse (générateur d'air chaud à biomasse) installé à l'université Assane Seck de Ziguinchor afin de réduire les émissions de gaz polluants. Dans ce qui suit, nous allons présenter les outils et la méthodologie adaptés à notre étude.

Chapitre 2 : Présentation du matériel et méthodes utilisés pour la caractérisation des biomasses dans un générateur d'air chaud indirect

Introduction

Ce chapitre présente tout d'abord les différents combustibles ayant fait l'objet de combustion et de caractérisation dans ce travail de Master. Par la suite, les matériels et méthodes développés au cours de ce travail sont exposés.

2.1 Présentation des biomasses utilisées

Pour alimenter le générateur d'air chaud indirect, nous avons utilisé trois biomasses (coques d'arachide, coques d'anacarde et les briquettes de charbons (charbons bio)) afin de comparer la quantité de gaz et d'énergie thermique produite par chacun de ces trois combustibles. Des études antérieures [6, 18, 19] avaient déjà démontré un intérêt crucial quant à la valorisation de ces résidus agricoles sous forme de combustibles solides (briquettes de charbon) et de gaz de synthèse. La possibilité que ces combustibles soient utilisés comme source de production de chaleur demeure alors une piste à explorer. L'anacarde et l'arachide sont cultivés en grande quantité dans le sud du Sénégal surtout en Casamance dans les régions de Ziguinchor, Kolda et Sédhiou où la production est abondante. Malgré cette production diversifiée, les producteurs ne s'intéressent pas trop aux coques, qui sont jetées partout dans la nature. Ces déchets (coques de noix de cajou) peu valorisés sont responsables non seulement de la pollution mais aussi de la dégradation ou l'appauvrissement des sols et de l'encombrement de l'espace.

2.1.1 Coques de noix de cajou

Les coques d'anacarde constituent les principaux résidus issus du décorticage de la noix de cajou. Elles représentent environ 60 à 80 % de la noix de cajou. Ces coques d'anacarde sont sources de nuisance, d'odeurs, de pollution des eaux et de dégradations des sols à cause de leur acidité. Voilà l'intérêt de les utiliser comme combustibles pour des besoins énergétiques afin d'éviter tous ces dégâts causés par ces dernières sur la nature (voir figure 2.1).



Figure 2.1 : Coques de noix de cajou

2.1.2 Coques d'arachide

Les coques d'arachides sont les résidus obtenus après le décorticage de la gousse d'arachide. Elles représentent environ 20 à 30 % du poids de la gousse. En tenant compte de la grande production de l'arachide au Sénégal, les coques d'arachides représentent l'un des sous-produits agricoles les plus importants du pays. Pouvant servir des fois pour le compostage, de litière dans l'avicole ou l'aviculture et le fumage du poisson, les coques d'arachide sont souvent utilisées comme combustible d'alimentation des chaudières industrielles au Sénégal ; le cas de la Société Nationale de Commercialisation des Oléagineux du Sénégal (SONACOS de Ziguinchor). La figure 2.2 montre la photo de coques d'arachide.



Figure 2.2 : Coques d'arachide

2.1.3 Briquettes de charbon

Les briquettes de charbon sont des blocs de matériaux compressés tels que les déchets issus de l'agriculture, la poudre de charbon ou des déchets de papiers. Elles sont utilisées comme combustible dans les foyers pour la cuisson, le chauffage de l'eau et le chauffage des locaux. Les briquettes de charbon utilisées pour l'alimentation du générateur d'air chaud ont été produites à partir de résidus de coques d'arachide au niveau de la plateforme Biogaz/biocharbon de l'UASZ. La figure 2.3 illustre une image des briquettes de charbon.



Figure 2.3 : Briquettes de charbon

Le tableau 2.1 présente quelques caractéristiques des propriétés physico-chimiques ou thermo-physiques des trois biomasses utilisées. Il s'agit de l'analyse élémentaire, de l'analyse immédiate et du pouvoir calorifique inférieur (PCI) des différents types de biomasse utilisée.

Tableau 2.1 : Synthèse des trois biomasses utilisées avec quelques données de la littérature [19]

Biomasses	Analyse élémentaire (%)				Analyse immédiate (%)			PCI (MJ/kg)
	C	H	O	N	Matière Volatile	Carbone Fixe	Cendres	
Coques de noix de cajou	57,76	6,71	33,06	0,48	82,54	15,47	1,99	22,51
Coques d'arachide	48,85	5,57	38,23	1,40	70,75	23,30	5,57	18,48
Briquettes de charbon de coques d'arachide obtenues à 400 °C	65,03	3,28	12,52	2,02	20,80	62,05	17,15	24,35

Avec C, H, O, N, représentent respectivement les pourcentages massiques de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote déterminés par analyse élémentaire de la biomasse sur une base sèche. Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) représente l'énergie de combustion exprimée en mégajoule par kilogramme (MJ/kg) d'un combustible brûlé en présence d'excès d'air et sans tenir compte de la chaleur de condensation de l'eau. Il joue un rôle important dans l'évaluation du rendement énergétique d'un générateur d'air chaud ou d'une chaudière à biomasse.

2.2 Présentation du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé dans notre étude est un générateur d'air chaud à échangeur de chaleur (indirect). Ce système énergétique, situé sur la plateforme Biogaz/biocharbon de l'université Assane Seck de Ziguinchor, a été installé le 15 janvier 2020 en collaboration avec l'équipe de Mr. Boubacar DIATTA et la première promotion de la licence professionnelle en énergies renouvelables et efficacité énergétique de l'UASZ sous la supervision du Dr. Lat Grand NDIAYE et de Mr. Papa Elimane DRAME. Il est conçu en acier (échangeur ou tubes de transfert de chaleur), en fonte et en laines de verre (enveloppe de l'échangeur) permettant d'isoler la chaleur de l'extérieur. Le générateur d'air chaud indirect a une hauteur de 213,5 cm (2,135 m) et une largeur de 70 cm. Il est constitué principalement d'un moteur pour la ventilation d'air en entrée (aspirateur), d'un foyer (chambre de combustion) à chargement manuel et à grille fixe, d'un échangeur de chaleur (de tubes de transfert de chaleur) et d'une cheminée.

a. Le moteur de la ventilation d'air forcé

Ce moteur électrique d'une puissance de 1,5 kW, permet de délivrer l'air nécessaire dans l'échangeur de chaleur. Le moteur est installé et boulonné avec un support afin d'atteindre le trou d'entrée d'air dans l'échangeur.

b. La chambre de combustion (foyer)

La chambre de combustion du générateur d'air chaud utilisé est conçue pour brûler n'importe quels déchets organiques secs, que ce soient des sciures, des écorces ou des coques de fruits. Le foyer a une circonférence de forme cylindrique de 68 cm de profondeur (hauteur) et de 54 cm de diamètre, soit un volume de $155\,735,03\text{ cm}^3$ ($0,156\text{ m}^3$). L'intérieur de la chambre de combustion est tapissé de briques réfractaires permettant de conserver la chaleur à l'intérieur et de protéger les parois métalliques ; en partie basse, nous avons une grille fixe sur laquelle brûle le combustible. Le combustible est acheminé manuellement dans le foyer ensuite placé sur la grille à l'intérieur du foyer pour son ignition. Une fois que le combustible de biomasse rentre en combustion dans le foyer, les cendres sont évacuées via la partie inférieure de la grille et acheminées manuellement dans un hall de stockage pour d'autres activités (par exemple comme amendement dans les champs). Le foyer comporte une ouverture circulaire (25,5 cm de diamètre) permettant d'effectuer la charge du combustible. Cette ouverture est munie d'un clapet qui permet de déterminer l'admission de l'air secondaire.

c. Échangeur de chaleur ou tubes de transfert de chaleur

L'échangeur de chaleur est l'élément clef des systèmes énergétiques. C'est un dispositif qui permet le transfert de chaleur d'un fluide à un autre sans qu'ils ne se mélangent ; le flux thermique traverse alors la surface d'échange qui sépare les deux fluides.

Les tubes de fumée en partie supérieure de la chambre de combustion permettent une récupération de la chaleur des produits de combustion. Placés à l'intérieur du générateur d'air chaud sur le circuit des produits de combustion, ces tubes en tant que tels forment l'échangeur de chaleur qui permet de récupérer la chaleur contenue dans les produits de la combustion afin de permettre le chauffage de l'air destiné aux différents processus de chauffage. Lorsque les fumées circulent dans les tubes, ces dernières cèdent leur chaleur à la paroi par convection le long de la surface de contact. Cette chaleur cédée est transférée par conduction, puis cédée à l'air injecté par convection le long de l'autre face du tube. L'échangeur de chaleur est composé de tubes munis d'ailettes en acier afin d'augmenter le coefficient d'échange. Ces tubes sont placés sur le circuit des fumées entre la chambre de combustion (le foyer) et la cheminée ; ils représentent le corps du générateur d'air chaud. C'est dans ces tubes où transitent directement les fumées vers la cheminée sans contact avec l'air d'entrée admis par le moteur de ventilation.

d. La cheminée

Lors de la combustion de la biomasse, une concentration importante de fumée est dégagée. Cette dernière est envoyée à la cheminée et évacuée dans l'atmosphère.

Cette fumée est souvent composée de gaz acres et toxiques selon la biomasse brûlée. La cheminée de 5,76 m de long et de 15 cm de diamètre est conçue en fer.

Le schéma de fonctionnement du générateur d'air chaud indirect et la photo correspondant à celui-ci sont représentés respectivement sur les figures 2.4 et 2.5.

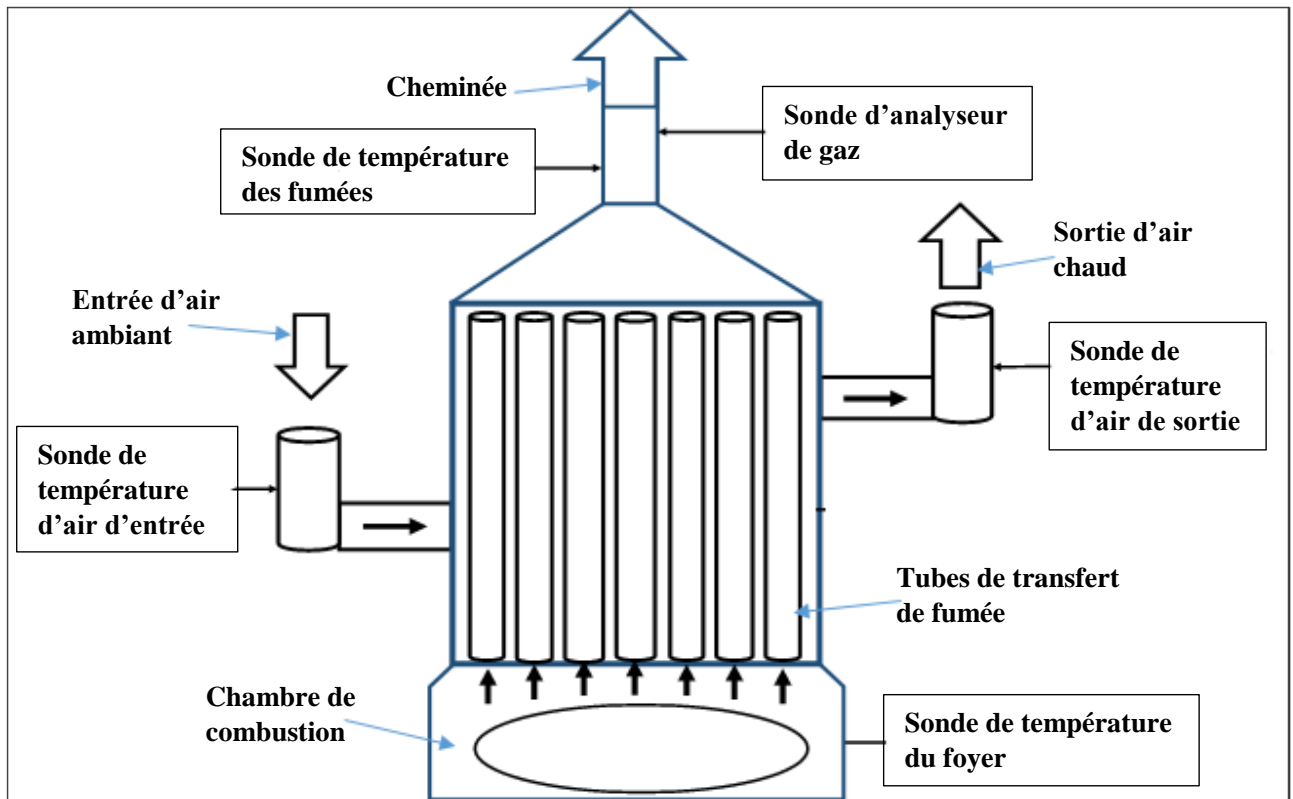


Figure 2.4 : Schéma du principe de fonctionnement du générateur d'air chaud indirect

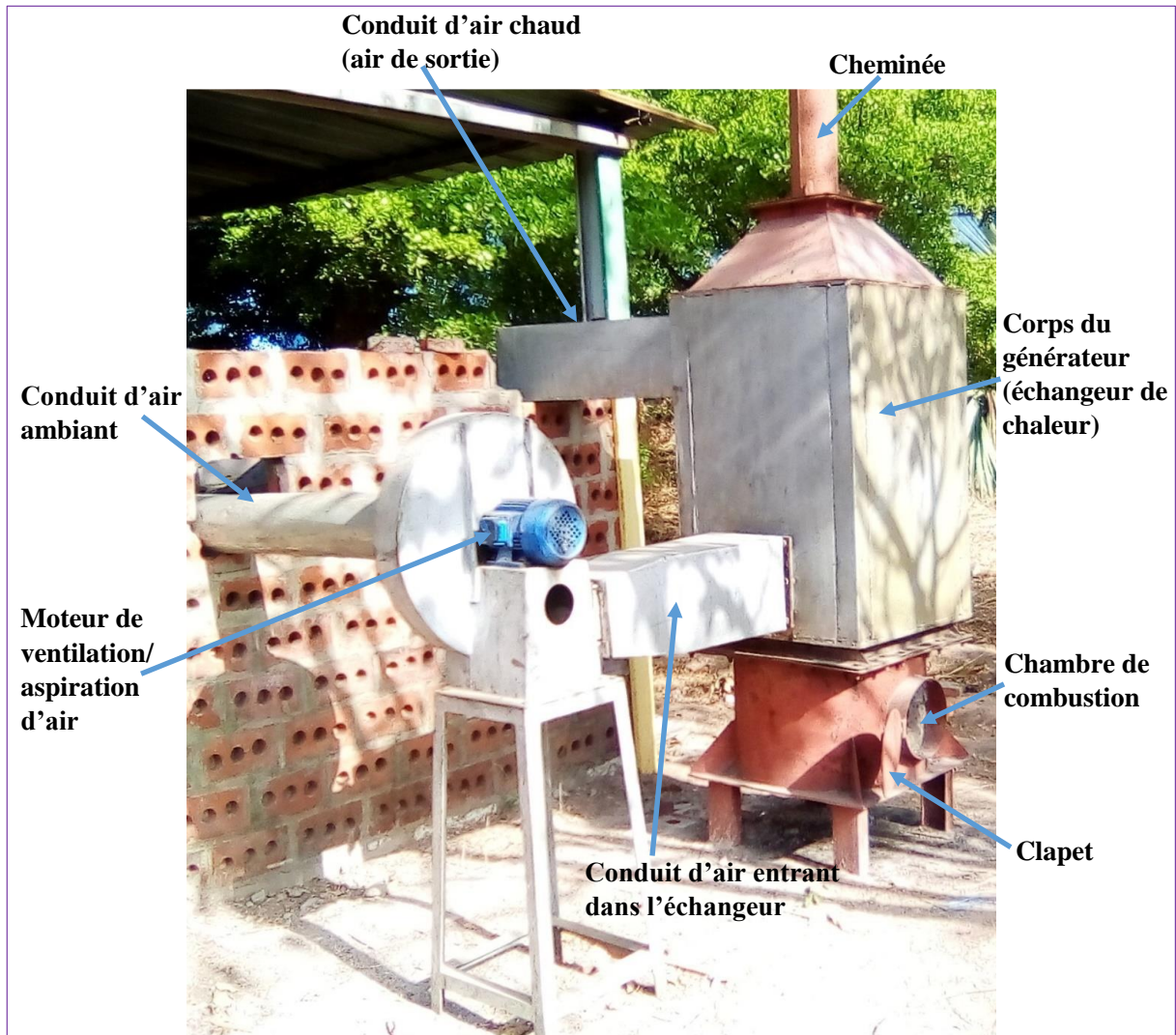


Figure 2.5 : Image réelle du générateur d'air chaud indirect utilisé

Le système de distribution de chaleur est un circuit permettant d'alimenter un séchoir en air chaud pour le séchage des produits agroalimentaires produits localement. Ce dispositif est un générateur d'air chaud indirect à grille fixe et à chargement manuel. Le combustible est brûlé d'une manière artisanale dans la chambre de combustion. Les fumées issues de la combustion entrent par les tubes de transfert de chaleur, ces tubes chauffés par les fumées transmettent leur chaleur à l'air d'entrée admis par le moteur de ventilation. Cet air emprisonné dans le corps du générateur (échangeur chaleur) est en contact avec les tubes de transfert de fumées et non avec la fumée. L'air propre ainsi chauffé est ensuite évacué ou conduit vers la sortie de l'échangeur de chaleur pour alimenter un séchoir et le cycle continu. La fumée sort par la cheminée vers l'atmosphère et les cendres sont recueillies en partie basse de la chambre de combustion.

2.3 Mise en place du programme pour la mesure de la température à différents endroits du générateur d'air chaud indirect

2.3.1 Présentation du système de programmation Arduino

Le système Arduino est une plate-forme source ouverte de prototypage d'objets interactifs à usage créatifs, c'est-à-dire qu'il permet aux utilisateurs de créer des objets électroniques interactifs à partir des cartes électroniques. Le système est composé principalement du matériel (les cartes électroniques) et du logiciel (environnement de programmation) qui permet de programmer les cartes. Il permet d'élargir les capacités de relation entre les utilisateurs et les machines (ordinateurs). Arduino lie également les performances de la programmation à celles de l'électronique. Le logiciel Arduino présente un environnement de travail compatible aux systèmes d'exploitation comme Windows, linux et macintosh. Le système Arduino permet de réaliser un certain nombre de choses applicables dans presque tous les domaines. Pour ne citer que quelques exemples, Arduino permet de : contrôler les appareils domestiques ou industriels (domotique), faire des jeux de lumière, piloter, fabriquer ou donner une intelligence à un robot (robotique), télécommander un appareil mobile (modélisme), faire de l'électronique industrielle et embarquée, etc. [20].

En ce qui est de notre travail, nous allons utiliser ce système électronique permettant à l'ordinateur de communiquer avec les cartes électroniques et les différents capteurs que l'on utilise pour mesurer la température à quatre points du générateur d'air chaud à biomasse utilisé dans cette étude.

a. Présentation des cartes Arduino utilisées

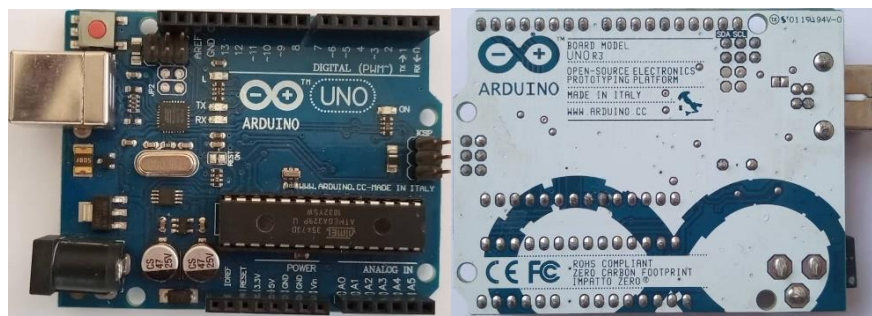
Il existe plusieurs cartes Arduino qui possèdent chacune ses caractéristiques et avantages. Pour cela, le choix de la carte doit être adapté au projet que l'on souhaite réaliser. Dans notre cas, nous avons utilisé les cartes Arduino Uno et Nano. Ce choix est fait par rapport aux performances mais aussi au prix abordable des cartes et leur disponibilité. Nous présentons ci-dessous en détails les caractéristiques des cartes Arduino Uno et Nano.

❖ La carte Arduino Uno

Uno qui signifie un en Italien marque l'apparition de la version 1.0 du logiciel Arduino. La carte Arduino Uno a été la première à utiliser la version de programmation Arduino 1.0 qui est devenue le symbole de l'univers Arduino. La carte Arduino Uno est la plus populaire et la plus utilisée avec une plage d'alimentation de 3,3 à 5 V. L'Uno est une carte électronique qui intègre un microcontrôleur d'architecture Atmel AVR ATmega328 et des composants complémentaires qui facilitent la programmation et l'interfaçage avec d'autres circuits.

C'est une plateforme basée sur une interface d'entrée/sortie simple qui est destinée à la programmation.

Le microcontrôleur est en quelque sorte le cerveau de la carte ; c'est lui qui reçoit le programme, le stocke dans sa mémoire avant de l'exécuter. Ce circuit intégré est composé d'une mémoire flash (ROM) de 32 Ko, d'une mémoire SRAM (équivalent à la RAM) de 2 Ko et d'EEPROM de 1 Ko. La carte Arduino Uno est constituée principalement, de 14 broches ou pins d'entrées/sorties numériques ou digitales dont six (6) servent de sortie PWM, de six (6) pins d'entrée analogique, d'un oscillateur de quartz (fréquence d'horloge) de 16 MHz, d'un connecteur USB, d'un jack d'alimentation, d'un port ICSP et d'un bouton reset de réinitialisation [21]. La figure 2.6 montre la carte Arduino Uno en vues de face et d'arrière.



a- Vue de face

b- Vue d'arrière

Figure 2.6 : Images réelles de la carte Arduino Uno

❖ La carte Arduino Nano

L'Arduino Nano est le format réduit de l'Uno, elle présente les mêmes caractéristiques et composants que cette dernière. Sauf pour les broches analogiques où la Nano comporte 8 pins analogique (2 de plus que l'Uno). Elle est aussi très pratique pour les espaces restreints et les projets nécessitant une réduction de poids comme le modélisme. Cette carte Arduino Nano est représentée en vues de face et d'arrière par la figure 2.7.



a- Vue de face

b- Vue d'arrière

Figure 2.7 : Images réelles de la carte Arduino Nano

La figure 2.8 présente toutes les connectiques de la carte Arduino Uno.

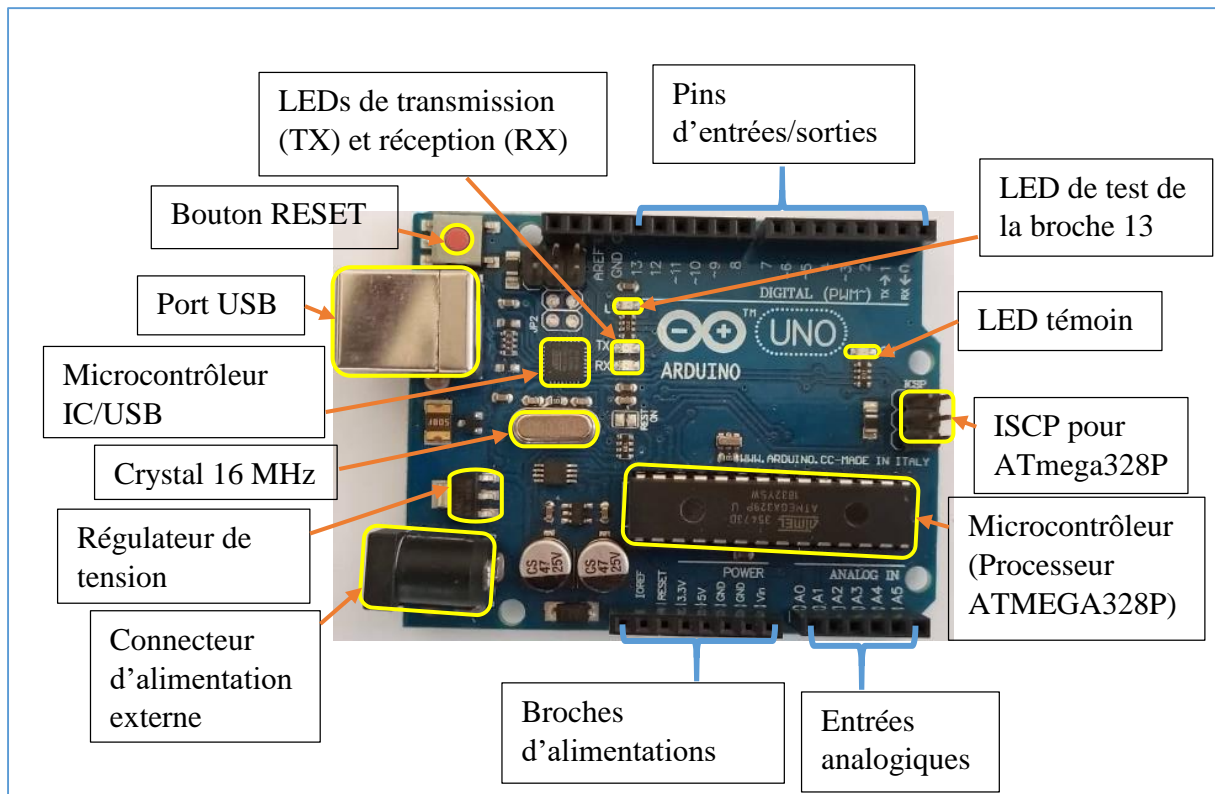


Figure 2.8 : Connectiques ou éléments composant la carte Arduino Uno

Comme tout logiciel, le système Arduino a également des limites ; il ne donne pas la possibilité de stocker directement les données acquises sans l'intervention d'autres logiciels compatibles d'enregistrement ou d'acquisition de données comme Putty, PLX-DAQ, etc. Dans ce travail, ces deux logiciels (Putty et PLX-DAQ) ont été utilisés pour l'acquisition des données. Cependant, PLX-DAQ est plus pratique. PLX-DAQ est un logiciel développé par une entreprise américaine du nom de Parallax (PLX) pour l'acquisition de données (DAQ en anglais). PLX-DAQ est un outil complémentaire de l'acquisition de données pour Microsoft-Excel et Arduino. A partir de ce logiciel, les données sont envoyées directement dans Excel et peuvent être tracées à mesure qu'elles arrivent en temps réels.

b. Présentation de l'environnement de programmation du logiciel Arduino

Le système Arduino est basé sur des cartes électroniques programmables et un environnement de développement qui présente une interface de programmation claire et librement modifiable. Le logiciel Arduino est basé sur le langage de programmation C/C++. L'espace ou l'environnement de développement intégré (EDI) permet d'écrire, de compiler et de transférer les programmes (croquis ou sketches) vers la carte Arduino à travers la connexion USB.

Cette interface est constituée de plusieurs parties composées de fonctions qui jouent des rôles différents sur l'exécution du programme. L'interface du logiciel Arduino a été découpée en six (6) parties principales (voir figure 2.9).

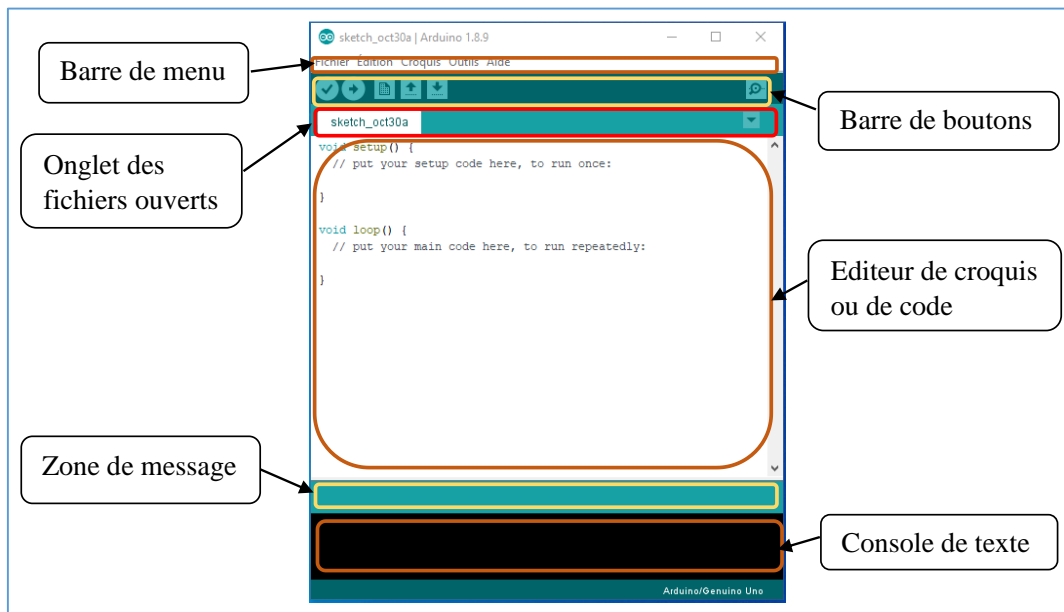


Figure 2.9 : Présentation de la structure générale du logiciel Arduino

- **La barre de menu** : cette interface graphique comporte les options de configuration du logiciel ;
- **La barre de boutons ou la barre d'action** : elle comporte six (6) différents boutons qui permettent d'exécuter directement le programme. Ces boutons simples à utiliser nous offrent un accès direct au logiciel ;
- **L'onglet des fichiers ouverts** : cette barre comporte un ou plusieurs onglets correspondants au sketch ou croquis ;
- **L'éditeur** : cette fenêtre d'édition des programmes nous permet d'écrire le programme en tant que tel ;
- **La zone de message** : elle indique l'état des actions en cours ;
- **La console de texte** : c'est la zone où s'affichent les messages après compilation du programme. Elle nous aide à visualiser les erreurs et à corriger le programme en cas d'erreur.

La figure 2.10 présente en détail les boutons et les fonctions de l'espace ou de l'environnement de programmation Arduino.

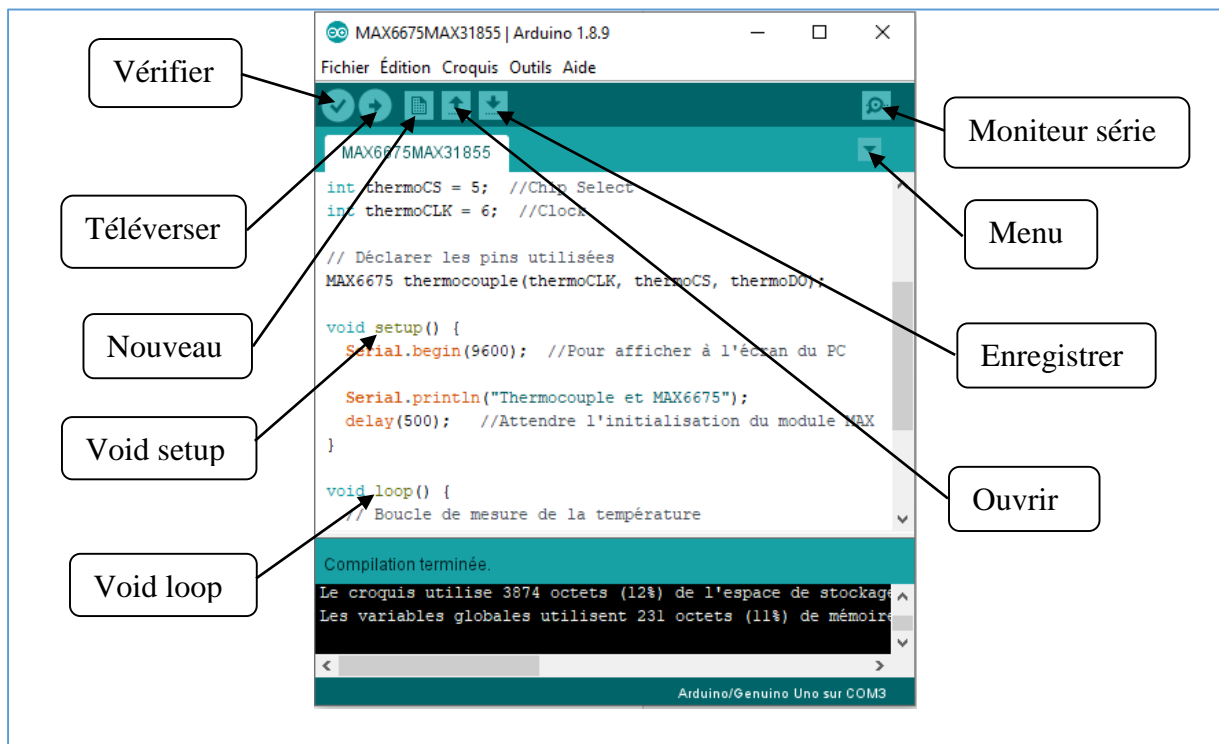


Figure 2.10 : Présentation en détail des boutons et les fonctions de l'interface de programmation d'Arduino

- **Le bouton vérifier** : il permet de vérifier le programme et d'actionner un module qui cherche les erreurs dans le programme ;
- **Le bouton téléverser** : ce bouton compile puis téléverse le programme sur la carte arduino ;
- **Le bouton nouveau** : il permet de créer un nouveau fichier ;
- **Le bouton ouvrir** : ce bouton donne la possibilité d'ouvrir un fichier ;
- **Le bouton enregistrer ou sauvegarder** : c'est un bouton d'enregistrement de fichier ;
- **Le bouton moniteur série** : il donne accès à l'écran de communication des résultats ;
- **Le bouton menu** : peu utilisé, il sert à renommer ou supprimer le croquis. Il permet aussi d'ouvrir un nouvel onglet ou d'aller sur le précédent ou le suivant.
- **La fonction void setup** : c'est la fonction d'initialisation de la carte, elle est appelée une seule fois lorsqu'on commence à écrire le programme. C'est dans cette fonction qu'on écrit le code qui n'a besoin d'être exécuté qu'une seule fois ;
- **La fonction void loop** : c'est la fonction principale qui se répète plusieurs fois, elle est appelée en permanence ; c'est ainsi qu'on parle de boucle infinie. Cette fonction loop contient presque tout le contenu du programme.

Ces deux fonctions (void setup et void loop) représentent en quelque sorte les portions du programme.

La représentation schématique du fonctionnement de la programmation sur Arduino est illustrée sur la figure 2.11.

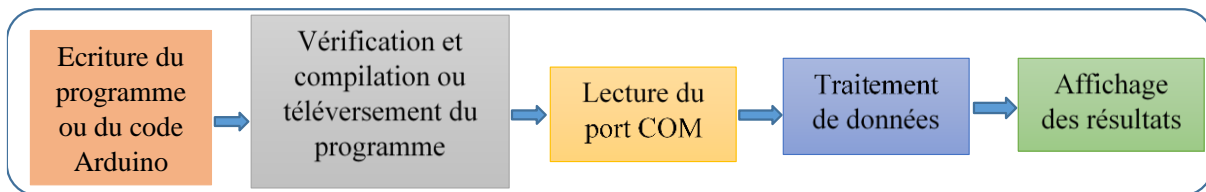


Figure 2.11 : Organigramme d'acquisition des données

2.3.2 Présentation du capteur de température de type MAX6675

a. Description

Le capteur de température utilisé dans cette étude est le model MAX6675. Le MAX6675 est un capteur de température permettant de mesurer la température au sein d'un système de production d'énergie.

Le capteur de température MAX6675 effectue une compensation de soudure froide et numérise le signal d'un thermocouple. Les données fournies sont émises dans un format en lecture seule de résolution de 12 bits. Ce capteur a une précision de 0,25 °C et permet une lecture de température jusqu'à + 1024 °C. Il présente une précision de thermocouple de 8 LSB (Least Significant Byte/bit de poids faible) pour des températures allant de 0 °C à 700 °C. Le MAX6675 peut être utilisé dans l'industrie, l'automobile, le chauffage, la ventilation et la climatisation (CVC) et les appareils électroménagers [22]. Cet instrument (le capteur MAX6675) de mesure est composé d'un bornier à vis permettant de lui connecter avec un thermocouple. Dans cette étude, un thermocouple de type K qui est très commun et simple à interfacer a été utilisé. Ce thermocouple très résistant à la chaleur couvre une grande gamme de mesure de température allant de -200 °C à 1350 °C. D'où les mesures doivent respecter la gamme de température du capteur MAX6675 (allant jusqu'à 1024°C) afin d'éviter de détériorer le capteur. Le thermocouple est composé deux fils joints codés par des couleurs (blanche et verte) et des signes (plus et moins) ; le fil de couleur blanche est branché sur le bornier à vis de signe moins (-) et celui de couleur verte sur le bornier à vis de signe plus (+). Le MAX6675 est également constitué de cinq (5) broches de connexion permettant de lui connecter avec des cartes électroniques pour sa programmation.

La figure 2.12 illustre les images d'un capteur de température MAX6675 et d'un thermocouple de type K adapté au capteur.

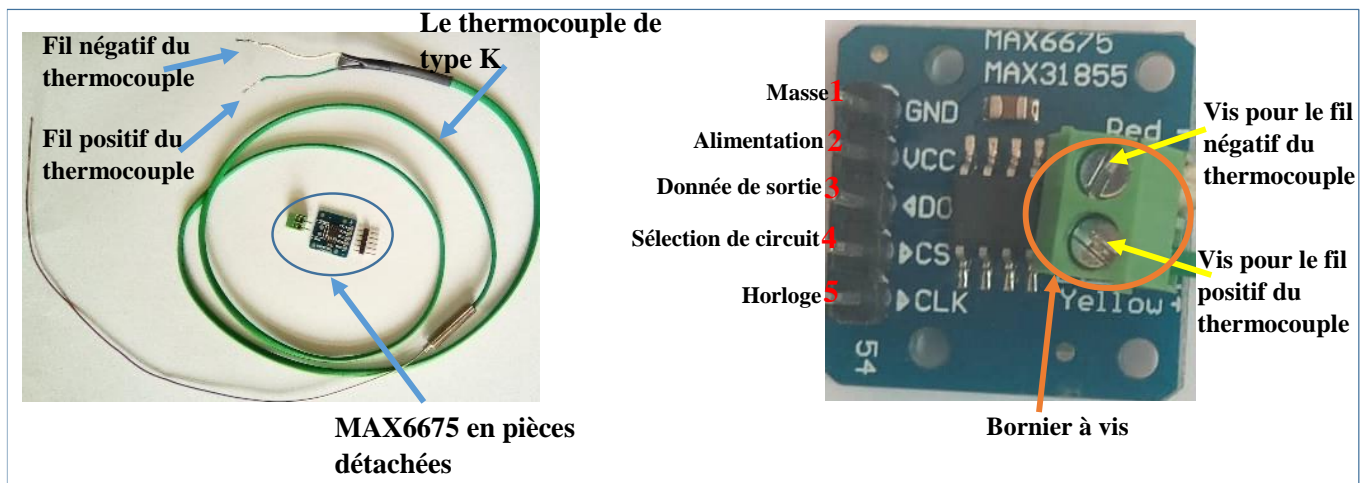


Figure 2.12 : Capteur de température MAX6675 et ses composants

Les broches du capteur MAX6675 sont définies comme suit :

- 1** - GND (Ground/masse) ;
- 2** - V_{in} : Tension d'entrée (alimentation) ;
- 3** - DO (Data Out/sortie de donnée) : représente une sortie du MAX6675, son rôle est de transporter chaque bit de donnée présent ;
- 4** - CS (Chip Select/sélection de circuit) : c'est une entrée du capteur, elle indique au circuit intégré qu'il est temps de lire le thermocouple et d'envoyer les données ;
- 5** - CLK (Clock/horloge) : c'est la seconde entrée du capteur, elle représente une sortie de la carte Arduino. Cette broche indique la présence d'un nouveau bit de donnée.

b. Caractéristiques [22]

Ce convertisseur MAX6675 est caractérisé principalement par :

- ◆ Une tension d'alimentation de 3,3 V à 5 V ;
- ◆ Un courant d'alimentation maximal 1,5 mA ;
- ◆ Un temps de conversion maximal de 0,22 s ;
- ◆ Une interface SPI, transmission haute vitesse (fréquence d'horloge série 4,3 MHz) ;
- ◆ Une plage de mesure de température du thermocouple K de -200 °C à 1350 °C ;
- ◆ Une résolution 12 bits/14 bits avec précision maximale de 0,25 °C ;
- ◆ Un seuil de réinitialisation à la mise sous tension maximale de 2,5 V ;
- ◆ Une hystérésis de réinitialisation à la mise sous tension moyenne de 50 mA ;
- ◆ Une capacité d'entrée moyenne de 5 pF.

2.3.3 Étalonnage des capteurs de température MAX6675

Après la programmation du capteur de température (le MAX6675) sur la carte Arduino Uno via le logiciel Arduino, nous avons voulu s'assurer de la validité des valeurs de température affichées. Pour cela, nous avons utilisé un thermomètre, à affichage numérique (TP101 de 1 °C de précision), comme appareil de référence disponible au laboratoire (LCPM). De l'eau a été mise à ébullition, et nous avons pu relever les valeurs de température sur une minute à l'aide de notre capteur de température et l'appareil de référence. La figure 2.13 ci-contre illustre les images du test effectué pour l'étalonnage du capteur de température.

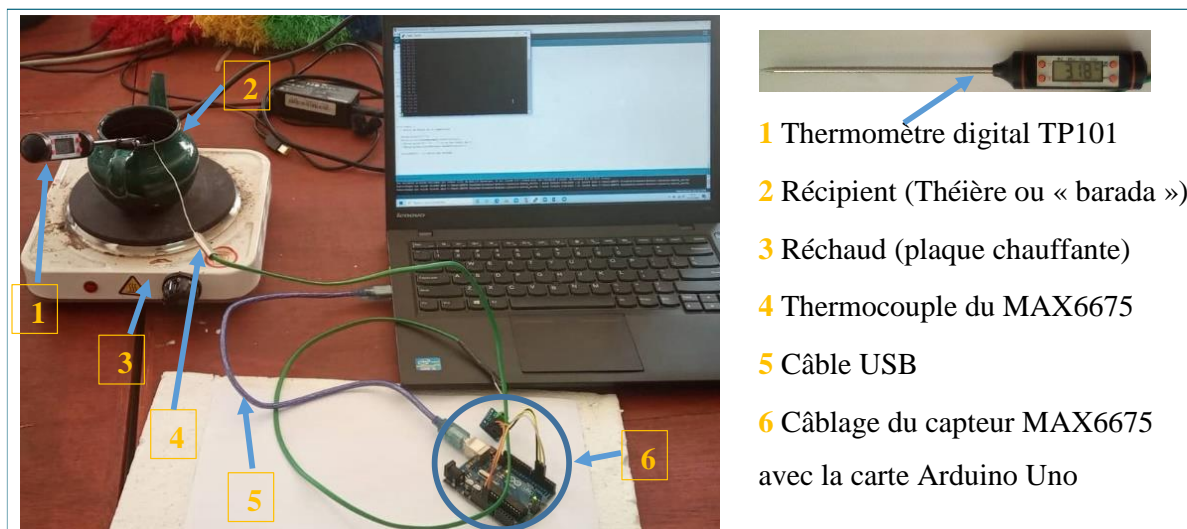


Figure 2.13 : Images de test d'étalonnage du capteur MAX6675 sur de l'eau chaude

2.3.4 Câblage des quatre (4) capteurs de température MAX6675 utilisés pour les mesures

Pour mesurer les températures à différents endroits du générateur d'air chaud à biomasse, nous avons développé un programme permettant de stocker les valeurs de la température. Pour cela, dans un premier temps, quatre capteurs de température de type MAX6675 ont été connectés sur une plaque d'essai électronique avec une carte Arduino Nano via des broches de connections et des câbles de connexions. Cette carte Arduino Nano a été déjà testée à l'avance. Dans un second temps, le programme a été écrit via le logiciel Arduino 1.8.9 afin de recueillir les informations envoyées à la carte Arduino. Le programme est présenté dans la partie annexe. Pour acheminer à Excel, les mesures prises par la carte Arduino Nano, nous avons utilisé le logiciel PLX-DAQ. Le schéma de câblage et la photo correspondante sont représentés par les figures 2.14 et 2.15.

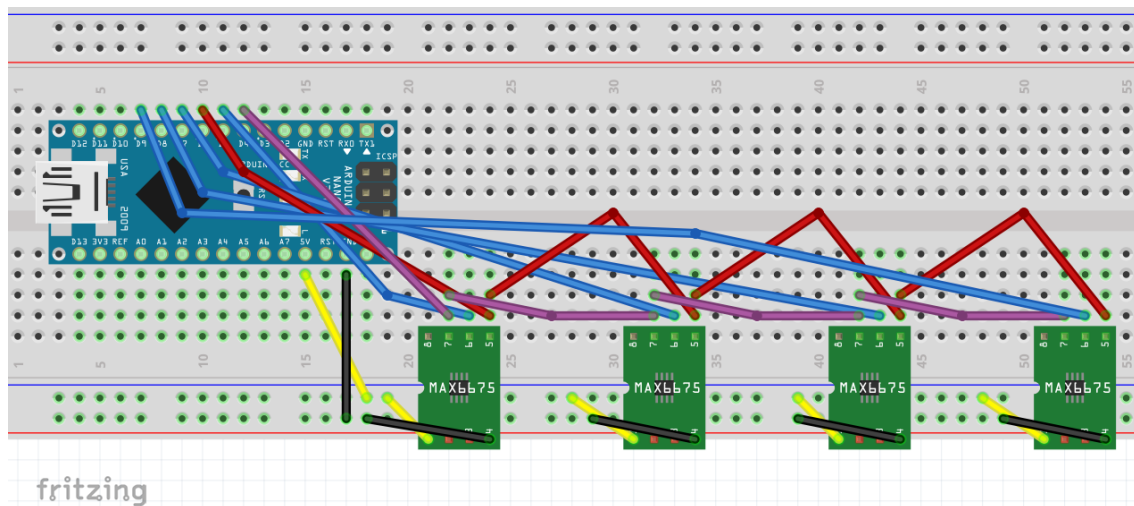


Figure 2.14 : Schéma électrique des quatre capteurs de température de type MAX6675

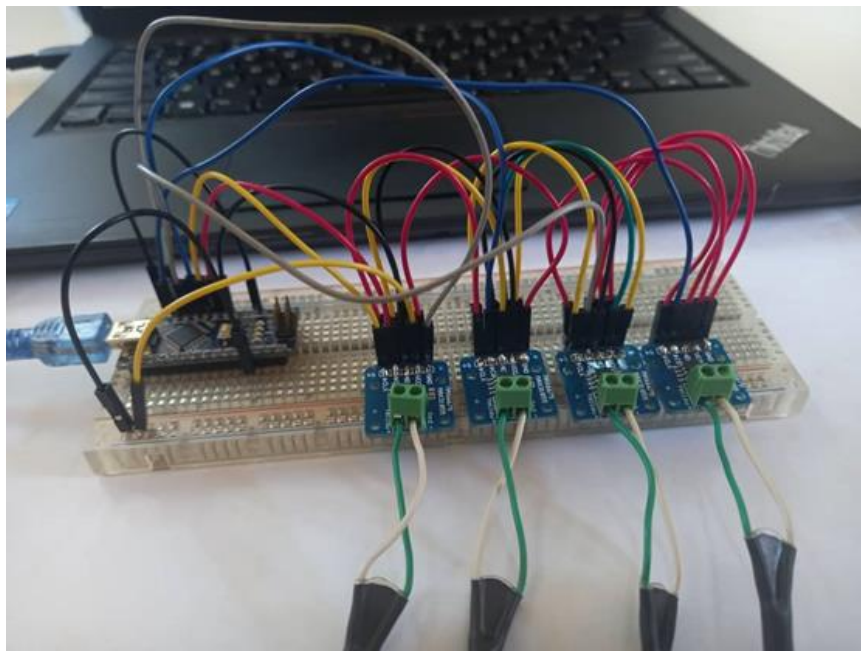


Figure 2.15 : Image réelle du schéma de câblage des quatre capteurs de température de type MAX6675

2.4 Présentation de l'analyseur de gaz

Dans ce travail, un analyseur de gaz de type RASI 700 Bio a été utilisé pour la mesure des gaz de combustion. L'analyseur de gaz RASI 700 Bio est un analyseur portable conçu pour des mesures précises de gaz dans des applications de biogaz ou de gaz de combustion. Grâce aux différents capteurs de gaz intégrés dans l'appareil, il permet de mesurer en même temps et d'une manière continue les concentrations d'oxygène (O_2), de dioxyde de carbone (CO_2), de monoxyde de carbone (CO), des oxydes d'azote NO_x (monoxyde d'azote (NO) et de dioxyde d'azote (NO_2)), du méthane (CH_4), du sulfure d'hydrogène (H_2S) etc.

L'avantage de cette technologie est que le signal généré est direct et proportionnellement linéaire au volume ou à la concentration (% ou ppm) des composants du gaz d'analyse. Selon le manuel du RASI 700 Bio, la plage de mesure du CO₂ et du CH₄ est de 0-100 %. La valeur limite CO en ppm peut être ajustée par incrément de 100 ppm entre 300 ppm et 4 000 ppm/10 000 ppm et pour NO, la gamme de mesure est de 0-1000 ppm, surchargée jusqu'à 5 000 ppm. La plage de mesure de NO₂ est de 0-200 ppm, surchargée jusqu'à 1 000 ppm et celle du H₂S est de 0-200 ppm, surchargée jusqu'à 2 000 ppm. Il est constitué d'une sonde d'échantillonnage connecté au séparateur de condensats, d'un écran d'affichage des résultats et d'un clavier permettant de le manipuler. Il propose également des lectures de température et de pression des gaz mesurés. Le RASI 700 Bio est alimenté par des batteries rechargeables via un câble USB.

Le RASI 700 Bio est étalonné une seule fois par an. Il peut être également connecté par Bluetooth à travers un logiciel (MRU4win) d'enregistrement de données.

MRU4win permet d'enregistrer et de tracer en même temps les données mesurées en fonction du temps. Les données sont enregistrées sur un fichier CSV. La figure 2.16 montre l'image du RASI 700 Bio et ses composants.



Figure 2.16 : Photo de l'analyseur de gaz RASI 700 Bio et ses composants

2.5 Présentation du capteur de particules de matière (PM) PMS5003

Le PMS5003 est un capteur de concentration de particules de matière. Il est utilisé pour détecter le nombre de particules en suspension dans l'air, c'est-à-dire capter la concentration des particules, et les émettre sous forme d'interface numérique.

Ce capteur peut être inséré dans des instruments variables liés à la concentration de particules en suspension dans l'air ou dans d'autres équipements d'amélioration pour fournir des données de concentration correctes dans le temps.

Pour un tel capteur, le principe de laser est utilisé pour produire une diffusion de lumière en utilisant un laser pour rayonner les particules. Il collecte la diffusion de la lumière dans un certain degré afin d'obtenir la courbe de dispersion de la lumière qui change avec le temps d'utilisation. Le microprocesseur calcule le diamètre équivalent des particules et le nombre de particules de diamètre différent par unité de volume. Le capteur PMS5003 contrôle et surveille la qualité de l'air jusqu'aux particules de taille infime (inférieure à $0,3\mu\text{g}/\text{m}^3$) dans un volume de 0,1 L d'air [23]. La figure 2.17 montre l'image du capteur de particules de matière PMS5003.



Figure 2.17 : Capteur de particules de matière (PM) PMS5003 [23]

Les broches du capteur PMS5003 sont ainsi définies :

- PIN1 (V_{CC}) : tension d'alimentation (5V) ;
- PIN2 (GND) : masse ;
- PIN3 (SET) : permet de définir le niveau de la broche (le niveau haut ou la suspension est un état de fonctionnement normal, tandis que le niveau bas est le mode veille) ;
- PIN4 (RX) : broche de réception du port série ;
- PIN5 (TX) : broche d'envoi du port série ;
- PIN6 (RESET) : signal de réinitialisation du module ;
- PIN7 / 8 : non connectés.

Cependant, les tests d'expérimentation avec ce capteur de particules de matière n'ont pas été effectués par manque de capteur PMS5003 et d'autres éléments qui le composent.

2.6 Instrumentation du générateur d'air chaud

2.6.1 Installation des thermocouples

Pour mesurer la température au sein du générateur d'air chaud, nous avons placé quatre (4) thermocouples de type K à différents endroits : un placé à l'entrée de l'échangeur de chaleur, un autre dans la chambre de combustion, un autre positionné dans le conduit de fumées et un dernier placé à la sortie de l'échangeur de chaleur. Ces quatre thermocouples ont été reliés chacun à un capteur de température (le MAX6675) dans le but de mesurer la température via le programme d'acquisition édité dans le logiciel Arduino. Le pas de mesure de la température a été fixé à une minute.

2.6.2 Installation et réglage du protocole d'analyse de l'analyseur

Pour la mesure des gaz de combustion, l'analyseur de gaz RASI 700 Bio a été relié à la canne de prélèvement (sonde d'échantillonnage) placé dans le conduit des fumées.

Comme recommandé par le constructeur, nous avons donc effectué une mise à zéro à l'air ambiant avant chaque début de test. Pour lancer les mesures, l'option « flue gas measurement » ou mesure des gaz de combustion (fumées) a été sélectionnée, puis la sous-section « boiler » ou chaudière. Parmi les programmes installés dans l'analyseur, ces options demeurent celles qui correspondent à notre cas d'étude. Pour faciliter l'acquisition des données dans l'ordinateur en lieu et place de l'analyseur, ce dernier a été lié au logiciel d'acquisition MRU4win via une connexion Bluetooth. Cela permet de lire en direct les données mesurées par l'analyseur. Ainsi, nous avons paramétré le logiciel MRU4win de façon à recevoir les données de mesure par intervalle de temps d'une minute. Nous rappelons qu'une mise à zéro est aussi nécessaire après chaque fin de test.

Le moteur électrique d'admission d'air d'une puissance de 1,5 kW est câblé par un fil de section $4 \times 2,5 \text{ mm}^2$ relié à un disjoncteur modulaire triphasé.

La figure 2.18 illustre une coupe photographique des différents éléments ou appareils installés dans le générateur d'air chaud indirect.



Figure 2.18 : Photo du générateur d'air chaud indirect équipé d'appareils de mesure. L'opération a été contrôlée par deux ordinateurs permettant d'enregistrer et de stocker les données via des logiciels ; MRU4win pour les mesures de gaz par l'analyseur de gaz RASI 700 Bio et PLX-DAQ pour les mesures des températures par les capteurs MAX6675.

La figure 2.19 illustre l'image du système de mesure et de contrôle.

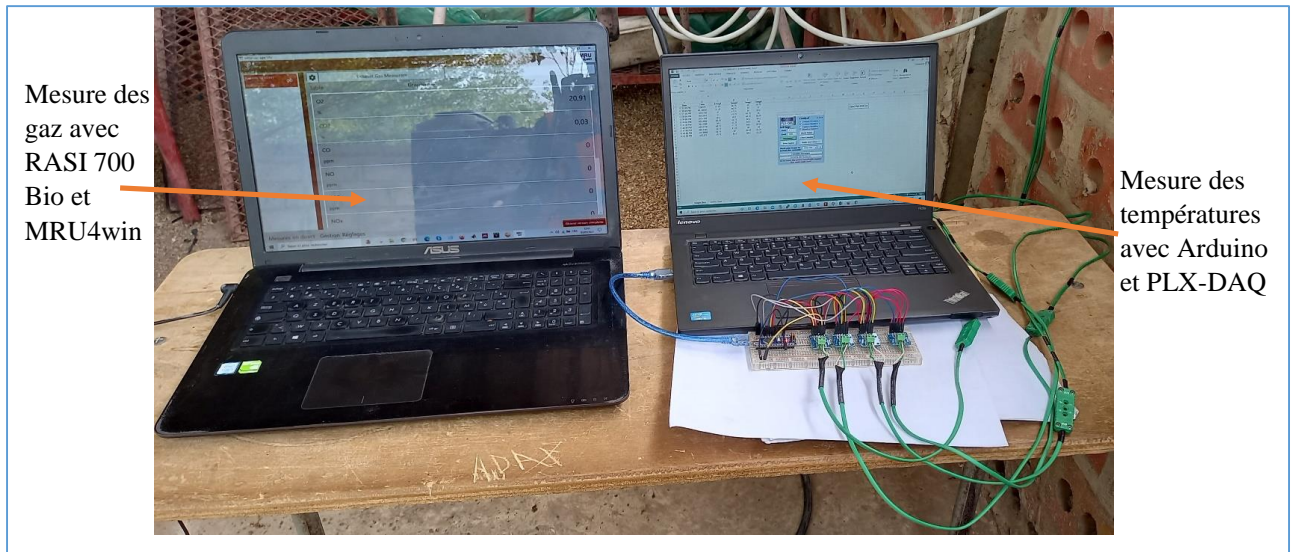


Figure 2.19 : Système de mesure et de contrôle du générateur d'air chaud à échangeur de chaleur

2.7 Protocole de démarrage des tests

Avant chaque test, la chambre de combustion est nettoyée proprement. Pour chaque test, 5 kg de combustible solide sont chargés dans la chambre de combustion à travers l'ouverture circulaire de la chambre de combustion. La teneur en humidité du combustible a été déterminée au préalable à l'aide d'une étuve à 105 °C pendant 3 h. Avant d'allumer la charge de combustible, les appareils de mesure (capteurs et analyseur) sont mis en marche. L'allumage de la charge par le haut du foyer se fait sur une durée de deux (2) minutes.

Sauf pour les coques de noix cajou, deux types de test sont effectués pour les deux autres types de biomasse. Et sur ces deux types de biomasse, le premier test consiste à laisser ouvert la porte (le clapet) de la chambre de combustion tout au long de l'essai et le deuxième consiste à fermer la porte de la chambre de combustion lorsque la charge a suffisamment de braises pour sa combustion (combustion homogène). Ces deux configurations ont été testées afin d'observer les différences de température et de gaz rejetés par les combustibles lors de leur combustion.

La figure 2.20 montre la chambre de combustion en flamme.



Figure 2.20 : Image de la chambre de combustion en flamme

Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons eu à présenter les différents éléments du générateur d'air chaud indirect et les trois biomasses utilisées pour son alimentation. Le système Arduino ainsi que les caractéristiques des cartes Arduino Uno et Nano et celles des différents capteurs de température MAX6675, de particules de matière PMS5003 et de l'analyseur de gaz RASI 700 Bio utilisés ont été présentées. L'objectif visé est la conception ou la construction des systèmes électroniques permettant de faire la programmation des cartes Arduino Uno et Nano avec les différents capteurs de température de type MAX6675. Ces capteurs ont pour rôle de collecter les informations qui à leur tour sont traitées par les cartes puis transmises sur l'écran de l'ordinateur via un câble USB. Ces systèmes sont conçus et utilisés pour tester les capteurs de température MAX6675 et mesurer la température à différents endroits du générateur d'air chaud à échangeur de chaleur. L'analyseur de gaz RASI 700 Bio est également utilisé pour la mesure des émissions de gaz au niveau de la cheminée du générateur d'air chaud. Les résultats ainsi obtenus lors de ces mesures sont présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre 3 : Mesures de température, des émissions de monoxyde de carbone CO, de dioxyde de carbone CO₂ et des oxydes d'azote NO_x dans le générateur d'air chaud à biomasse

Introduction

Après avoir présenté et étudié les différents matériels et méthodes nécessaires pour notre projet, nous allons d'abord, dans ce dernier chapitre, présenter les résultats du test d'étalonnage des capteurs de température MAX6675. Ensuite, nous aborderons la présentation et la discussion des différents résultats de mesure de la température et des émissions de gaz au sein du générateur d'air chaud à biomasse. Et nous terminerons ce chapitre par une conclusion partielle soulignant les résultats essentiels de ce travail.

3.1 Résultats et discussions

Après instrumentation du générateur d'air chaud indirect, d'une part, des mesures de prises de température à différents endroits du générateur d'air chaud ont été effectuées. D'autre part, des mesures des émissions de gaz ont permis d'analyser le processus de production des polluants durant le processus de combustion des trois biomasses étudiées. Les gaz mesurés sont l'oxygène (O_2), le dioxyde de carbone (CO_2), le monoxyde carbone (CO) et les oxydes d'azotes ($NO_x = NO + NO_2$). La particularité des trois biomasses se manifeste par leurs diverses caractéristiques thermochimiques, affectant ainsi le processus de combustion avec des émissions de gaz assez différentes. Dans ce travail, le dispositif de combustion a été régulé manuellement (pour l'admission d'air dans la chambre de combustion). La connaissance des interactions biomasse-technique, combustion-conditions et combustion-émissions est un prérequis essentiel dans ces cas pour minimiser les émissions des dispositifs de combustion à régulation manuelle. Ce dernier point n'a pas été exploité dans le cas de ce travail.

3.1.1 Résultats du test d'étalonnage des capteurs de température MAX6675

La température de l'eau a été mesurée sur des intervalles d'une minute à l'aide de capteur de température MAX6675 ($T_{MAX6675}$) et d'un thermomètre digital TP101 (T_{TP101}) dans le but de comparer les valeurs affichées. La figure 3.1 illustre la variation de la température de l'eau en fonction du temps pour les deux appareils de mesure.

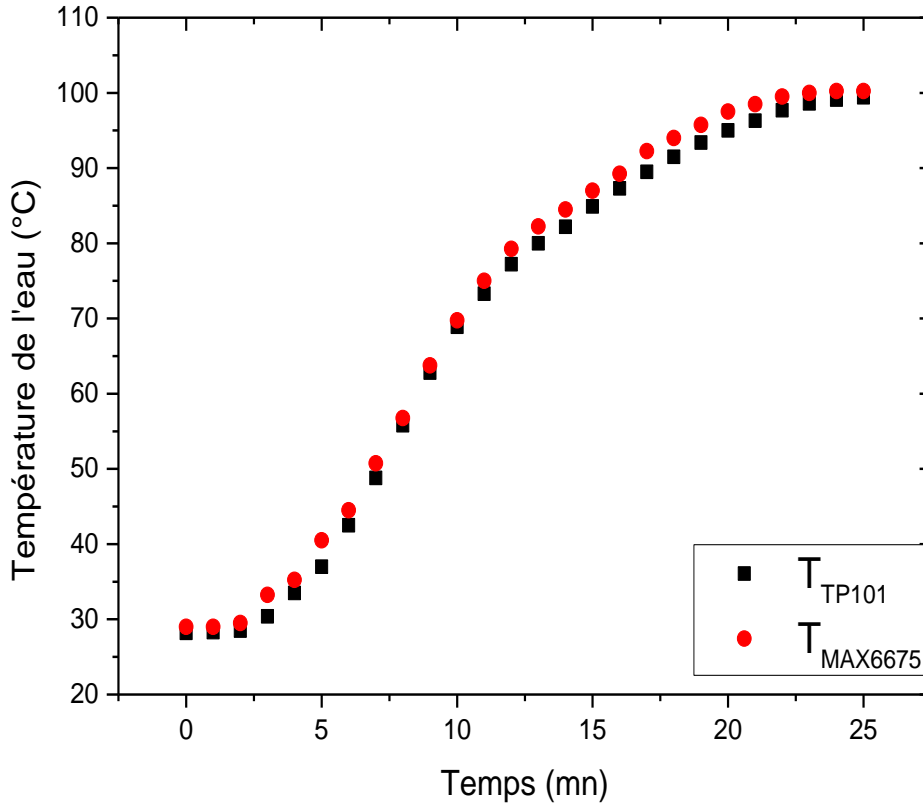


Figure 3.1 : Température de l'eau affichée par le MAX6675 et par le thermomètre TP101 en fonction du temps (mn)

L'analyse de la figure 3.1 montre que les valeurs des températures mesurées par les deux appareils sont proches. L'écart maximal entre les valeurs des températures a été estimé égal à 3,5 °C. Cette différence est attribuée à la précision des appareils qui n'est pas la même ; 0,25 °C pour le MAX6675 et 1 °C pour le TP101.

Pour vérifier réellement que le capteur est bien étalonné, nous avons tracé la courbe de variation de la température indiquée par le capteur MAX667 (T_{MAX667}) en fonction de la température mesurée par le thermomètre TP101 (T_{TP101}) prise comme référence. La figure 3.2 illustre la corrélation entre ces deux températures avec un intervalle de confiance de 95 %.

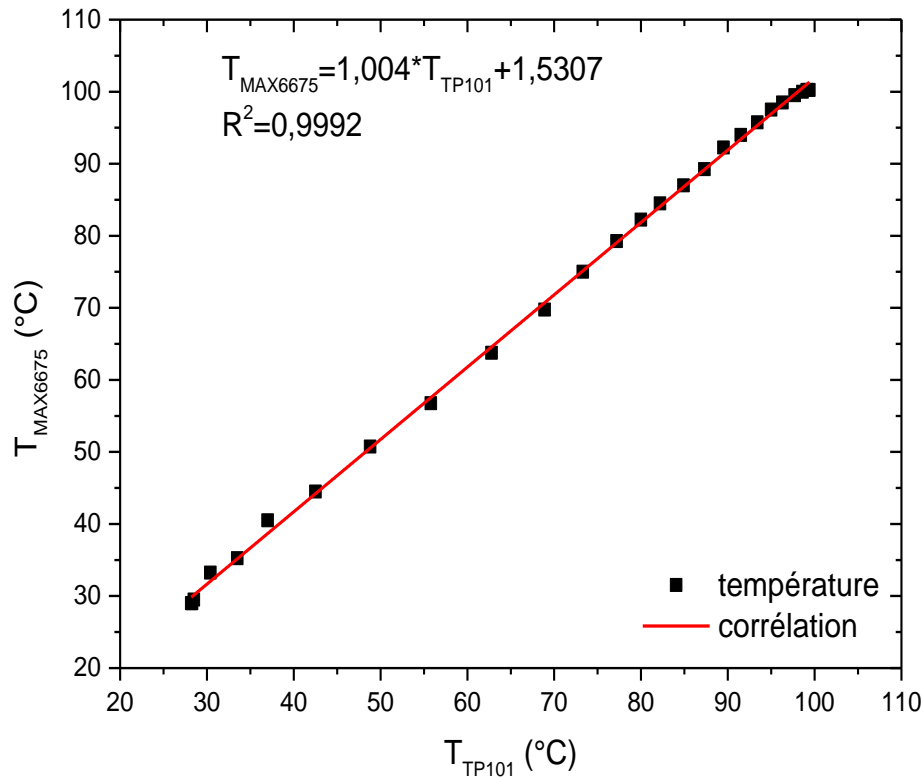


Figure 3.2 : Corrélation entre les températures $T_{MAX6675}$ et T_{TP101}

Nous remarquons sur la figure 3.2 qu'une tendance linéaire se dégage entre les valeurs de température $T_{MAX6675}$ et T_{TP101} avec un bon coefficient de détermination estimé à 99,92 %. L'analyse de ce résultat est que la valeur de température affichée par le capteur MAX6675 est à 99,92 % de celle affichée par le thermomètre TP101. Cela, nous a poussé à croire que le capteur MAX6675 peut bel et bien être utilisé pour réaliser des mesures de température pour les essais envisagés.

3.1.2 Émissions de gaz issus de la combustion des coques d'arachide

La combustion de 5 kg de coques d'arachide avec une teneur en humidité de 8,33 % a été réalisée dans la chambre de combustion du générateur d'air chaud indirect. En fonction de l'essai envisagé, la porte (le clapet) de la chambre de combustion était soit fermée ou ouverte.

3.1.2.1 Fonctionnement du générateur d'air chaud indirect sous clapet ouvert

Dans cette partie du travail, nous présentons les résultats de la mesure des températures à différents points du générateur d'air chaud indirect ainsi que les résultats de la détermination des émissions de gaz. Pour les gaz, on s'est intéressé à l'oxygène, au dioxyde de carbone, au monoxyde de carbone et aux oxydes d'azote. Les figures 3.3 et 3.4 montrent respectivement, les variations des températures mesurées et des émissions de gaz en fonction du temps lors de la combustion des coques d'arachide sous clapet ouvert.

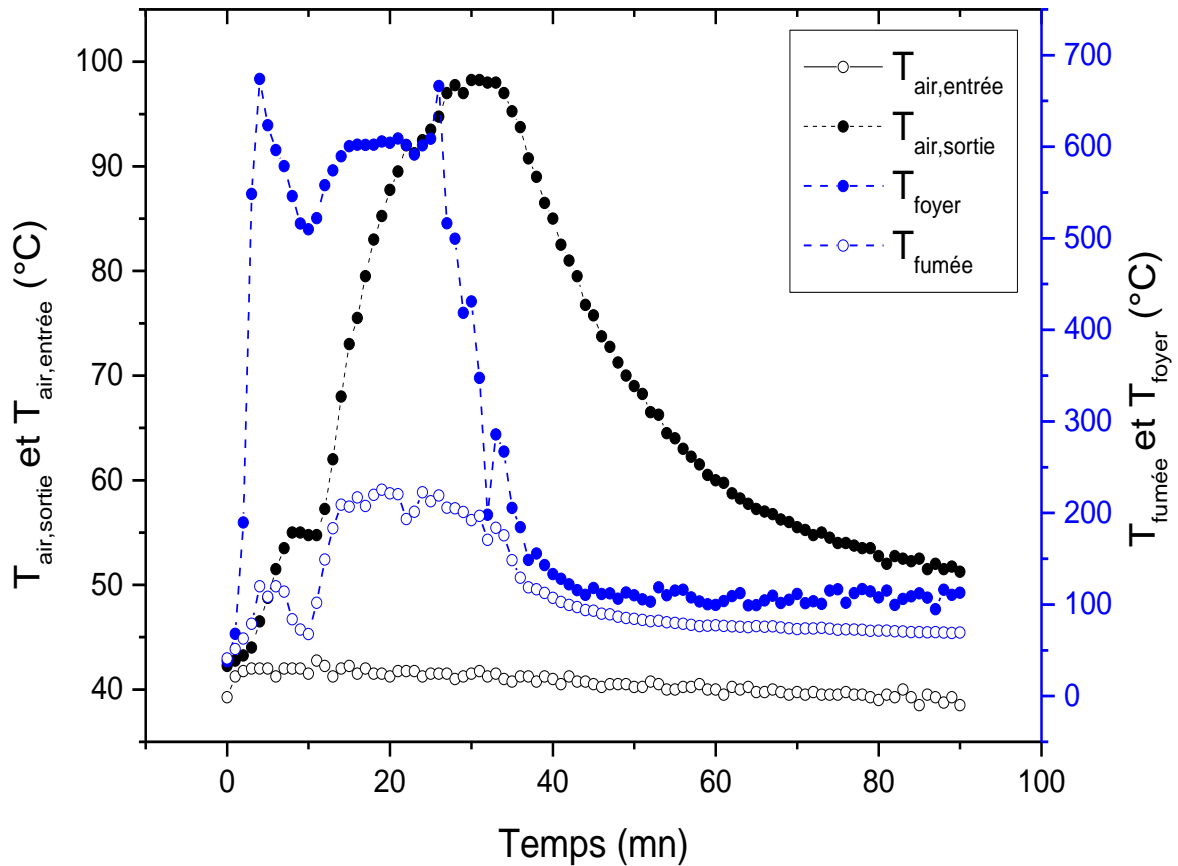


Figure 3.3 : Variation temporelle des températures à différents endroits du générateur d'air chaud indirect : cas de la combustion des coques d'arachide sous clapet ouvert

L'analyse de la figure 3.3 montre que lors de la combustion des coques d'arachide sous clapet ouvert, la température de la chambre de combustion (T_{foyer}) variait de $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $674\text{ }^{\circ}\text{C}$, celle des fumées ($T_{\text{fumée}}$) de $41\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $255,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et celle de la sortie de l'échangeur de chaleur ($T_{\text{air, sortie}}$) de $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $98,25\text{ }^{\circ}\text{C}$. La température de l'air à l'entrée de l'échangeur de chaleur ($T_{\text{air, entrée}}$) a peu varié (de $38,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $42,75\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ainsi, en se basant sur le rapport de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) sur l'état de l'art sur la technologie générateur d'air chaud à biomasse, nous constatons, à première vue, que la température de la chambre de combustion semble faible. Selon ce même rapport la température maximale dans la chambre de combustion doit être dans l'intervalle $700\text{-}1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Par contre la température maximale des fumées est bel et bien dans la plage $120\text{-}300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Avec une température de $98,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ à la sortie de l'échangeur de chaleur, il serait possible d'utiliser ce combustible dans ce type d'appareil pour des applications de séchage ou dans des procédés à moyenne température (séchage des produits agroalimentaires, de biomasse, de tuile,...). Bien entendu, cela reste valable si le combustible s'avère peu polluant. Dans le cas contraire, des mécanismes de réductions des émissions polluantes doivent être entrepris.

A notre connaissance, nos recherches sur des articles scientifiques traitant la combustion de la biomasse dans les générateurs d'air chaud, nous laissent penser à une absence totale d'études expérimentales sur ces types de dispositifs dans la littérature ; d'où la difficulté de confronter nos résultats. La plus part des études sont à titre industriel rendant difficile l'accès à de telles informations.

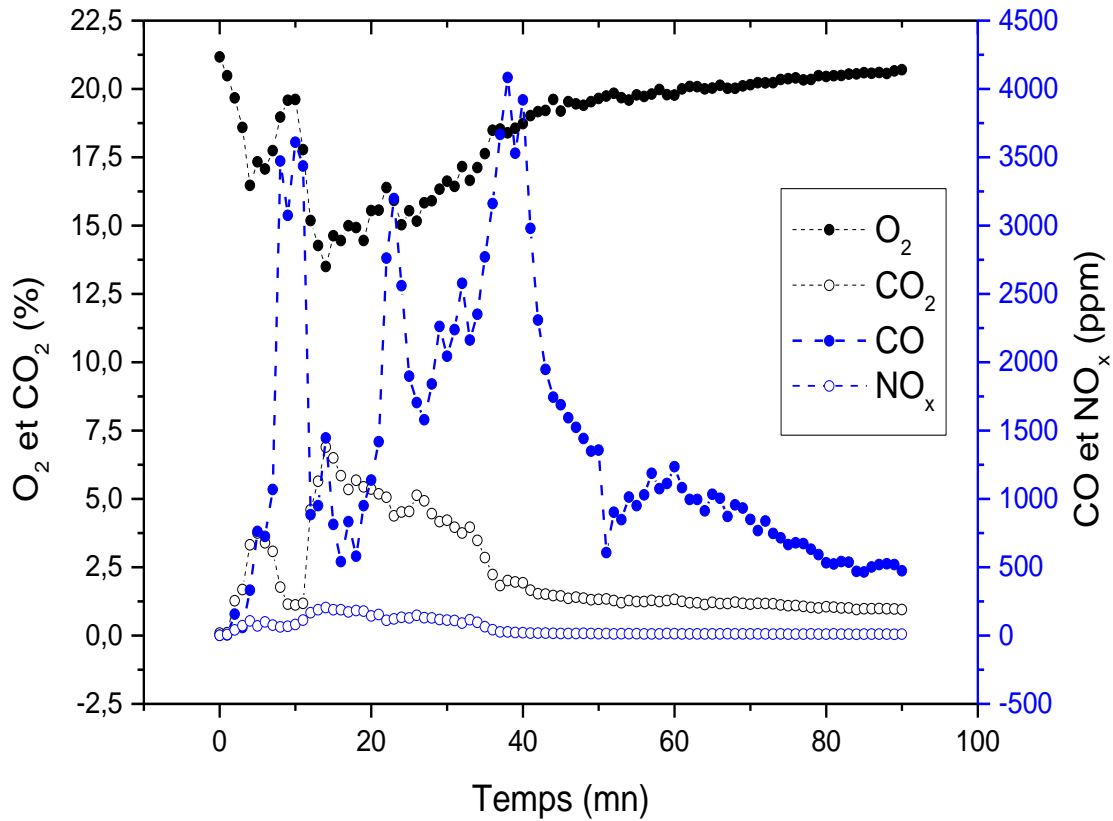


Figure 3.4 : Variation des concentrations de gaz en fonction du temps : cas de la combustion des coques d'arachide sous clapet ouvert

La figure 3.4 montre qu'après l'allumage de la charge de coques d'arachide, la concentration en CO a fortement augmenté, avec un pic de 3 610 ppm atteint dès la dixième minute du test. Cette phase de début de test correspond aux rejets de gaz volatils, en majorité constitués de CO, sous l'effet de la température. Ensuite, une phase stable de combustion des coques d'arachide s'installe à des teneurs en oxygène d'environ 13 à 16 %. Durant cette phase, la concentration en CO a fortement baissé et s'établit en moyenne en dessous de 1 000 ppm. Entre 22 et 43 minutes, les émissions de CO se matérialisent par deux pics élevés de 3 197 ppm et 4 083 ppm. Cette phase pourrait indiquer des conditions aérodynamiques instables dans la chambre de combustion, par exemple l'effondrement d'une couche de combustion uniforme dans la chambre de combustion.

Pour la formation des oxydes d'azote, des concentrations plus élevées de NO_x étaient généralement observées lorsque la concentration en O_2 était plus faible. La formation des oxydes d'azote est en partie due à la température de combustion et à l'oxydation de l'azote contenu dans le combustible.

La concentration maximale de NO_x mesurée était égale à 204 ppm. Nous ne sommes pas appesantis sur l'analyse de la concentration en CO_2 du fait de son bilan carbone neutre en combustion de la biomasse. Ce qu'il faut retenir, est que la concentration en CO_2 devient importante lorsqu'une partie du CO formé s'oxyde pour donner du CO_2 .

Pour ce test, les concentrations moyennes en CO et en NO_x sont évaluées respectivement à 1 384,56 ppm (soit 1 585,59 mg/m^3) et 53,99 ppm (soit 66,34 mg/m^3). Comparativement à la littérature, la combustion des coques d'arachide dans le générateur d'air chaud indirect a démontré des niveaux moins élevés de CO, mais des niveaux supérieurs de NO_x , par rapport à la combustion des tiges de maïs et de tiges de blé dans une chaudière à biomasse de 176 kW, où les concentrations en CO sont de 2 725 mg/m^3 et 2 210 mg/m^3 et celles en NO_x de 9,8 mg/m^3 et 40,4 mg/m^3 , respectivement [24].

Il n'existe pas de législation sénégalaise relative aux émissions de CO et NO_x dans les générateurs d'air chaud. Cependant pour les chaudières à biomasse de puissance thermique inférieure à 50 MW, la norme sénégalaise NS 05 062 fixe les valeurs limites d'émission de CO et de NO_x à 200 mg/m^3 et 600 mg/m^3 , respectivement. Et pour les émissions de NO_x , la limitation est réduite au fur et à mesure que la puissance thermique de la chaudière augmente.

3.1.2.2 Fonctionnement du générateur d'air chaud indirect sous clapet fermé

Dans cette partie du travail, nous allons essayer de voir surtout l'évolution de la température à la sortie de l'échangeur de chaleur et celle des émissions de gaz durant le fonctionnement du générateur d'air chaud sous clapet fermé.

La figure 3.5 montre l'évolution de la température en fonction du temps à différents endroits du générateur d'air chaud sous clapet fermé.

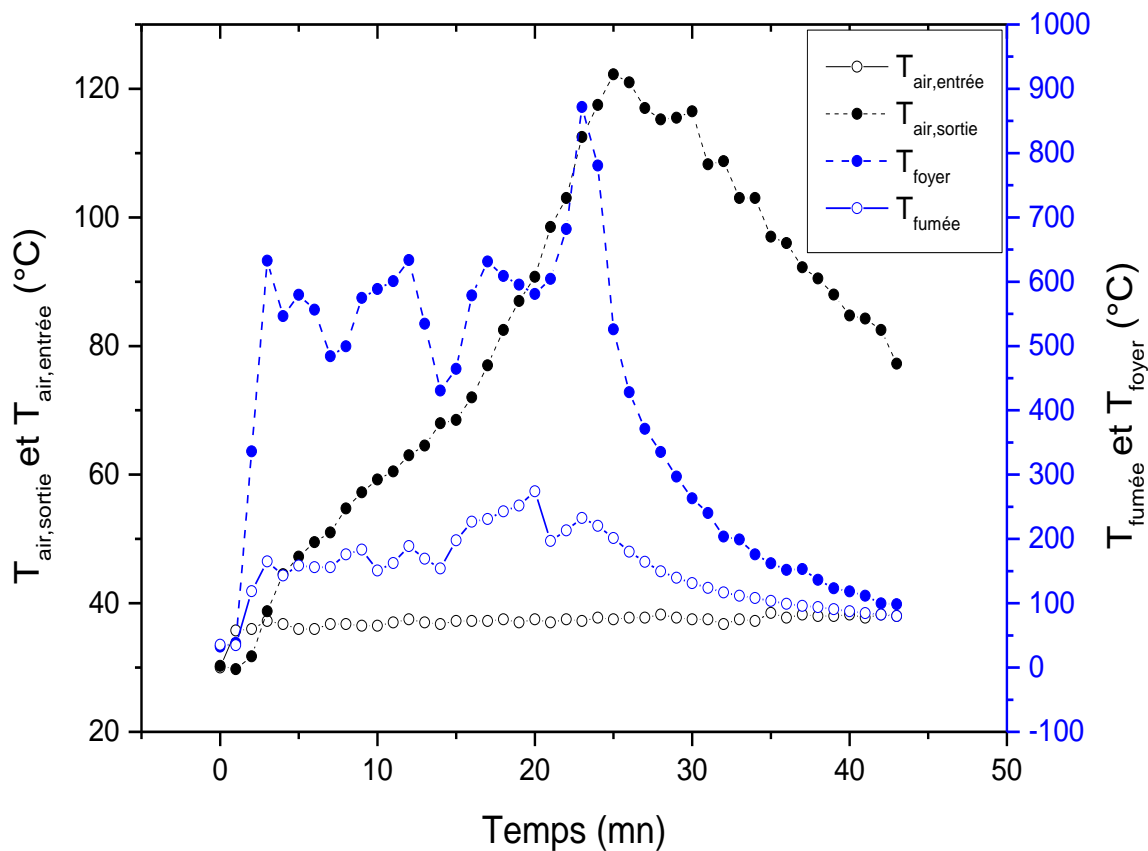


Figure 3.5 : Variation temporelle des températures à différents endroits du générateur d'air chaud : cas de la combustion des coques d'arachide sous clapet fermé

La figure 3.5 montre clairement que durant cet essai, la température au sein de la chambre de combustion du générateur d'air chaud a atteint les 871,75 °C. Donc l'essai sous clapet fermé permet de garder une plus haute température au niveau de la chambre de combustion. Le fait de fermer la porte de la chambre de combustion permet de perdre moins d'énergie et de garder une plus haute température due à l'inertie du matériau réfractaire dans la chambre de combustion. Nous avons également constaté une augmentation de 24 °C de la température maximale à la sortie de l'échangeur de chaleur, $T_{\text{air, sortie}}$ (122,25 °C). Par conséquent, plus de chaleur a été transmise à l'air ambiant durant cet essai. La température maximale des fumées évaluée à 274 °C est restée dans la plage 120-300 °C.

Concernant les émissions de gaz, la figure 3.6 illustre l'évolution de la concentration des gaz (O_2 , CO_2 , CO et NO_x). Les tendances des émissions de gaz ont été surveillées pendant toute la durée de l'essai. Les valeurs des concentrations en CO , CO_2 , O_2 et NO_x ont été enregistrées sur des intervalles d'une minute (voir figure 3.6).

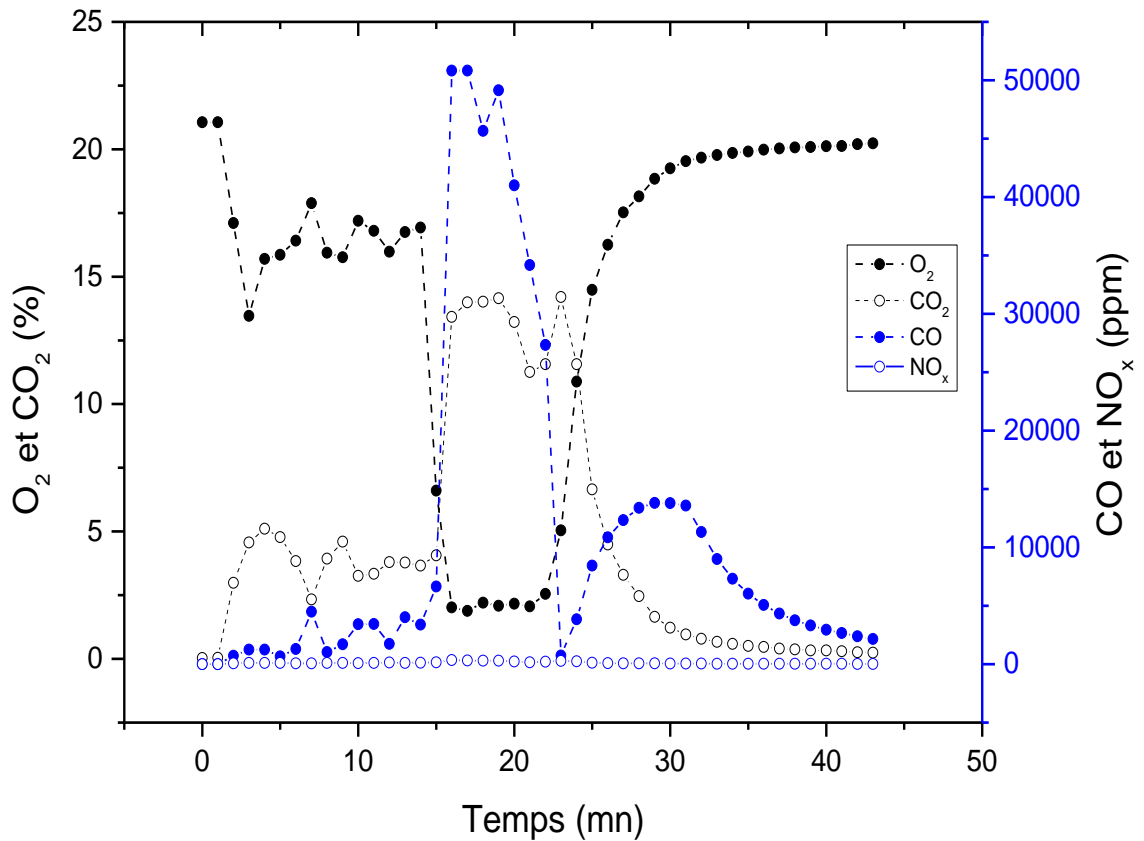


Figure 3.6 : Variation des concentrations de gaz en fonction du temps : cas de la combustion des coques d'arachide sous clapet fermé

Lors de la combustion des coques d'arachide sous clapet fermé, les 12 premières minutes de l'essai consistaient à laisser le lit de coques d'arachide prendre suffisamment de braises avant de fermer la porte de la chambre de combustion. Durant cette période, la concentration moyenne en CO était estimée autour de 2 085 ppm avec un pic maximal de 4 491 ppm. En ce moment, la teneur en oxygène dans les gaz se situait entre 13,41 % et 17,10 % avec une production moyenne de NO_x autour de 100 ppm. Dès la fermeture de la porte du foyer à la 13^{ème} minute, la teneur en oxygène a subitement baissé et est passée à 1,88 % dès la 16^{ème} minute puis est restée stable autour de cette valeur jusqu'à la 21^{ème} minute. Lors de cette phase, la concentration en CO a augmenté de manière considérable, atteignant une valeur maximale de CO de 50 827 ppm (dépassant largement la plage de mesure de CO pour l'analyse RASI 700 Bio). Nous pouvons avancer l'hypothèse que l'admission de l'air dans la chambre de combustion est principalement assurée par l'air transitant par la porte de la chambre de combustion. Après la 21^{ème} minute, la teneur en oxygène dans les fumées commence à remonter et la concentration en CO chute rapidement puis continue à augmenter jusqu'à atteindre un deuxième pic de CO de 13 813 ppm puis une diminution de CO est encore observée.

Nous pouvons dire que durant cette période, de l'air primaire entrainé davantage dans la partie basse de la chambre de combustion à cause certainement du lit de braises de coques d'arachide qui devient de plus en plus poreuse. Cela pourrait correspondre également à une phase instable (hétérogénéité de combustion) de la combustion qui a occasionné le dernier pic du CO.

Les concentrations moyennes en CO et en NO_x sont évaluées respectivement à 11 025,09 ppm (12 625,93 mg/m³) et 108,75 ppm (139,91 mg/m³). Durant la combustion des coques d'arachide, sous clapet fermé, les concentrations moyennes en CO et en NO_x sont multipliées par environ 8 et 2, respectivement, par rapport à l'essai sous clapet ouvert. Néanmoins, la concentration en NO_x (139,91 mg/m³) répond aux exigences de la norme sénégalaise en NO_x.

3.1.3 Émissions de gaz issus de la combustion des briquettes de charbon

La combustion de 5 kg de briquettes de charbon avec une teneur en humidité de 5,59 % est effectuée dans la chambre de combustion du générateur d'air chaud. En fonction de l'essai envisagé, la porte de la chambre de combustion était soit ouverte ou fermée.

3.1.3.1 Fonctionnement du générateur d'air chaud indirect sous clapet ouvert

A la différence de la combustion des coques d'arachide qui permet d'atteindre une température d'air de sortie ($T_{\text{air, sortie}}$) de 98,25 °C, la combustion des briquettes de charbon dans le générateur d'air chaud, sous clapet ouvert, permet d'atteindre une température d'air de sortie ($T_{\text{air, sortie}}$) plus basse. Cette dernière atteint un maximum de 78,25 °C (voir figure 3.7). Cette diminution des gaz et de la température par rapport au test avec les coques d'arachide sous clapet ouvert pourrait être expliquée du fait que les coques d'arachide ont été brûlées à l'état brut. A l'état brut elles (coques d'arachide) dégagent plus de matières volatiles sous l'effet de la température. Or durant le processus de fabrication des briquettes de charbon (carbonisation, pyrolyse), la matière première utilisée perd une certaine quantité de gaz (principalement constitués de CO, CO₂, H₂, CH₄), comparé aux coques d'arachide qui, elles ont été brûlées à l'état brut.

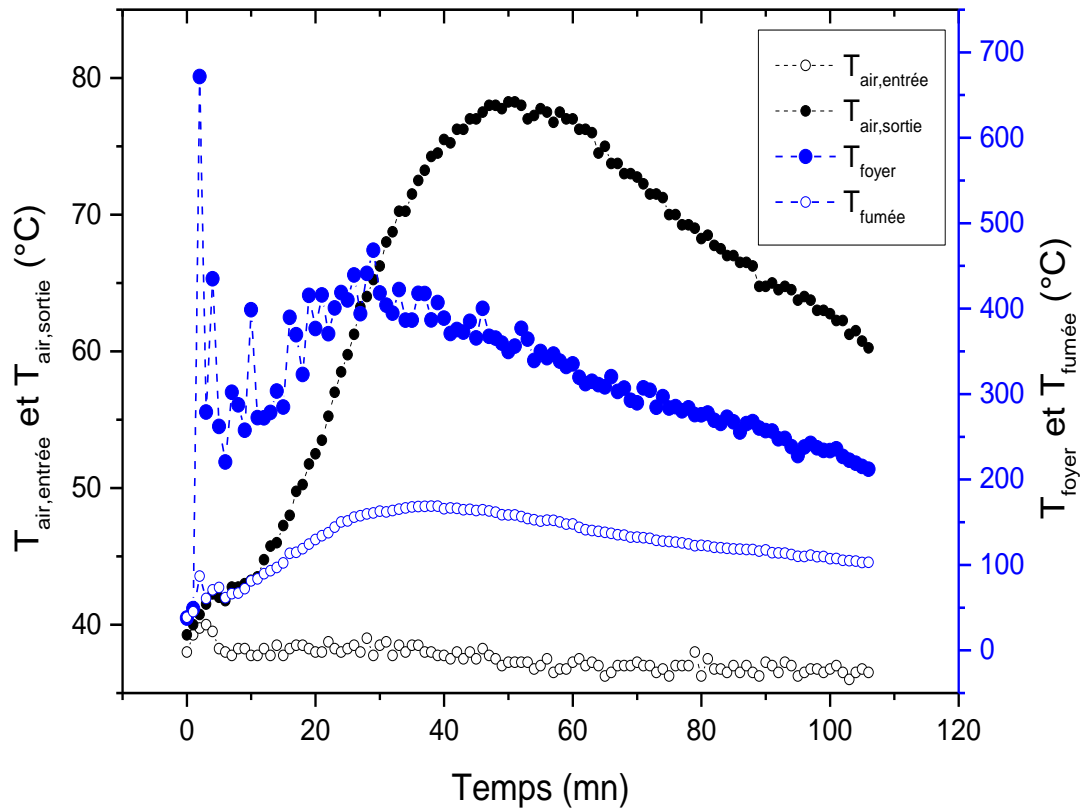


Figure 3.7 : Variation des températures à différents endroits du générateur d'air chaud en fonction du temps : cas de la combustion des briquettes de charbon sous clapet ouvert

La température de la chambre de combustion est pratiquement restée dans la plage de 200 à 470 °C durant une grande partie de l'essai. Cette température reste quand même faible car pour les générateurs d'air chaud indirect, la température de la chambre de combustion est généralement dans la plage de 700 à 1 200 °C. De la 19^{ème} minute de test à la 83^{ème} minute, la température des fumées a été mesurée dans la plage de 120 à 169 °C ; idéale dans le cas de générateur d'air chaud où la plage de température des fumées est comprise entre 120 et 300 °C. Le comportement temporel des émissions de gaz a été surveillé pendant toute la durée de l'essai. Les valeurs des concentrations en CO, CO₂, O₂ et NO_x ont été enregistrées à des intervalles d'une minute. La figure 3.8 montre les tendances des émissions de gaz issus de la combustion des briquettes de charbon sous clapet ouvert.

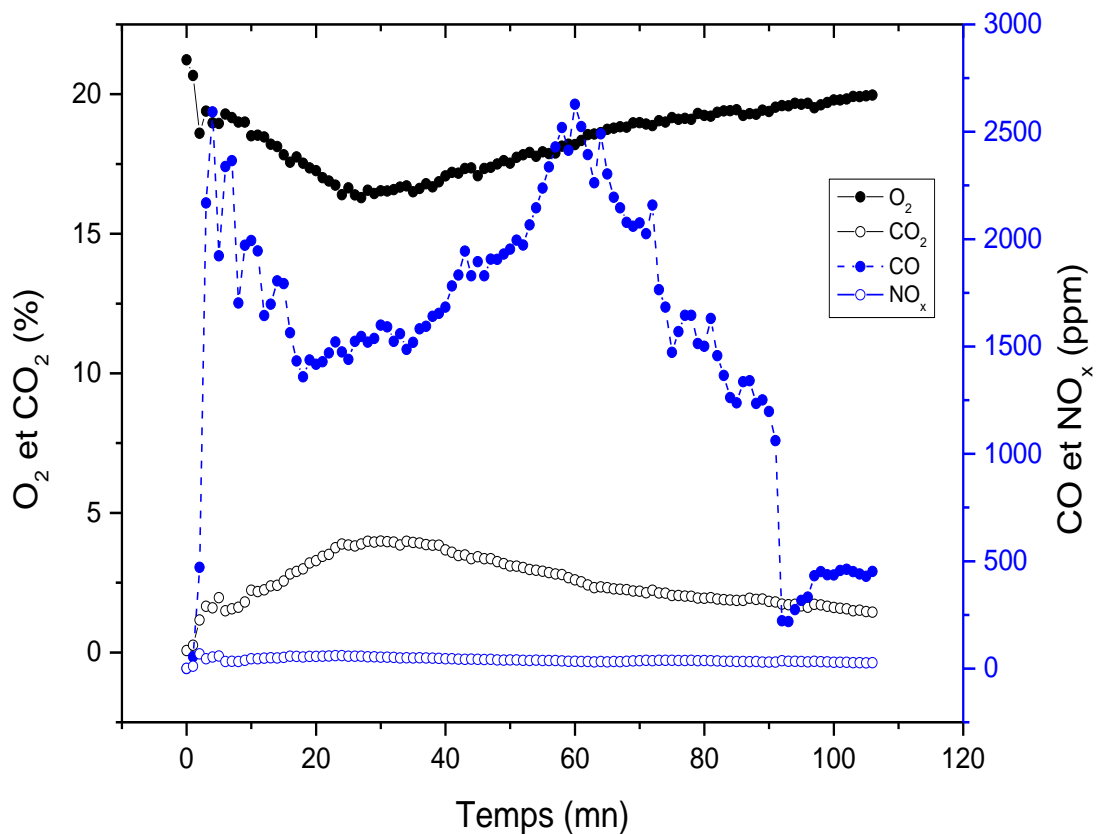


Figure 3.8 : Variation des concentrations de gaz en fonction du temps : cas de la combustion des briquettes de charbon sous clapet ouvert

La figure 3.8 montre qu'après l'allumage des briquettes de charbon, la concentration en CO a fortement augmenté jusqu'à un pic de 2 592 ppm. Nous avons observé ensuite une phase plus stable de combustion des briquettes de charbon qui s'installe avec des taux en oxygène dans les fumées d'environ 16,71 % à 18,95 %. Cette phase est matérialisée par une tendance en baisse de la concentration en CO. Cela indique qu'une partie du carbone contenu dans le combustible et celle du CO formée sont oxydées durant cette phase.

De 34 à 60 minutes, la concentration en CO a commencé à augmenter jusqu'à atteindre une valeur extrême de 2 628 ppm. Cette augmentation est certainement due à des conditions aérodynamiques instables dans la chambre de combustion du générateur d'air chaud. La concentration en NO_x fluctuait entre les valeurs de 1 ppm et 68 ppm.

Durant ce test, les valeurs moyennes des concentrations en CO et NO_x sont respectivement évaluées à 1 539,25 ppm (soit 1 762,74 mg/m^3) et 40,21 ppm (soit 50,52 mg/m^3). Comme pour les coques d'arachide, la combustion des briquettes de charbon dans le générateur d'air chaud répond aux exigences de la norme sénégalaise en NO_x mais pas pour le CO.

Comparativement à la littérature, la combustion des briquettes de charbon dans le générateur d'air chaud à clapet ouvert a également montré des niveaux moins élevés de CO, mais des niveaux supérieurs de NO_x, par rapport à la combustion des tiges de maïs et de tiges de blé dans une chaudière à biomasse de 176 kW, où les concentrations en CO sont de 2 725 mg/m³ et 2 210 mg/m³ et celles en NO_x 9,8 mg/m³ et 40,4 mg/m³, respectivement [24]. D'autre part, des concentrations en CO plus élevées mais avec des concentrations en NO_x plus faibles, par rapport à la combustion de pellets de tiges de maïs dans une chaudière de 40 kW, où la concentration en CO est de 54 mg/m³ et celle en NO_x de 252 mg/m³ [25].

3.1.3.2 Fonctionnement du générateur d'air chaud indirect sous clapet fermé

La fermeture de la porte de la chambre de combustion lors de la combustion des briquettes de charbon dans le générateur d'air chaud a permis de bien maîtriser la température et d'obtenir une température plus élevée à la sortie de l'échangeur de chaleur avec une température maximale $T_{\text{air, sortie}} = 89,25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (voir figure 3.9). Autrement dit, plus d'énergie a été transférée au niveau de l'échangeur de chaleur. Cette fermeture de la porte de la chambre de combustion s'est également traduite par une augmentation de la température au niveau de la chambre de combustion (valeur maximale de $577,75 \text{ }^{\circ}\text{C}$), indiquant ainsi moins de perte de chaleur et une température maximale des fumées de $145,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

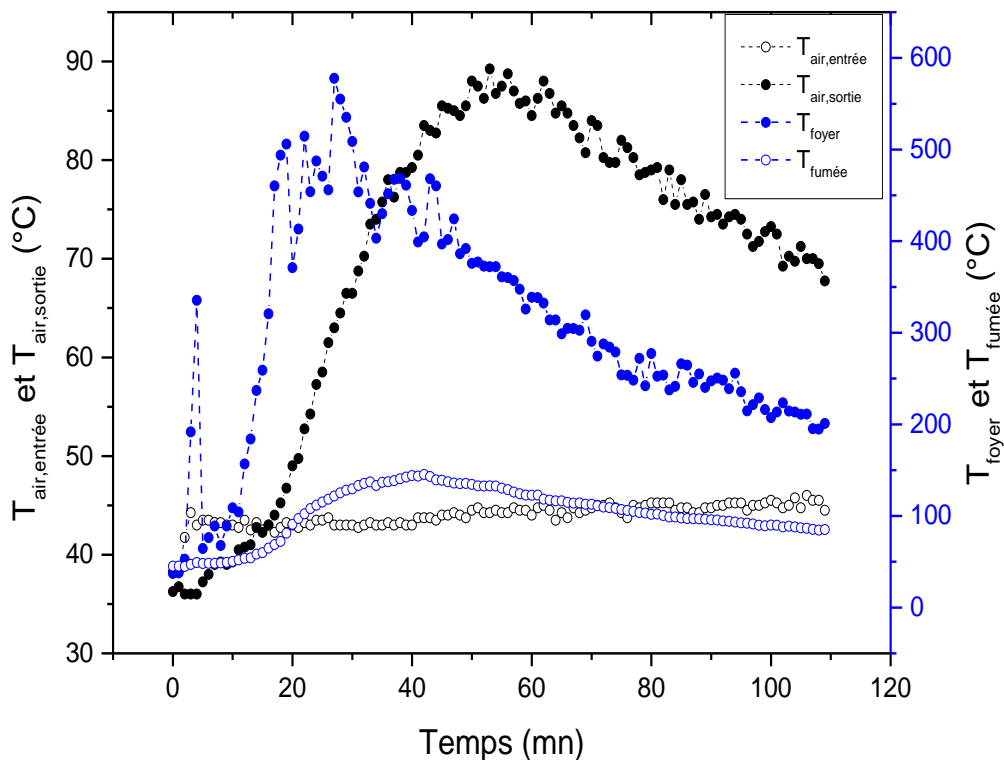


Figure 3.9 : Variation des températures à différents endroits du générateur d'air chaud en fonction du temps : cas de la combustion des briquettes de charbon sous clapet fermé

Comme dans les essais précédents, les émissions de gaz ont été suivies tout au long de la durée de l'essai. Les valeurs des concentrations en CO, CO₂, O₂ et NO_x ont été mesurées à des intervalles d'une minute. La figure 3.10 montre les tendances des émissions de gaz issus de la combustion des briquettes de charbon sous clapet fermé.

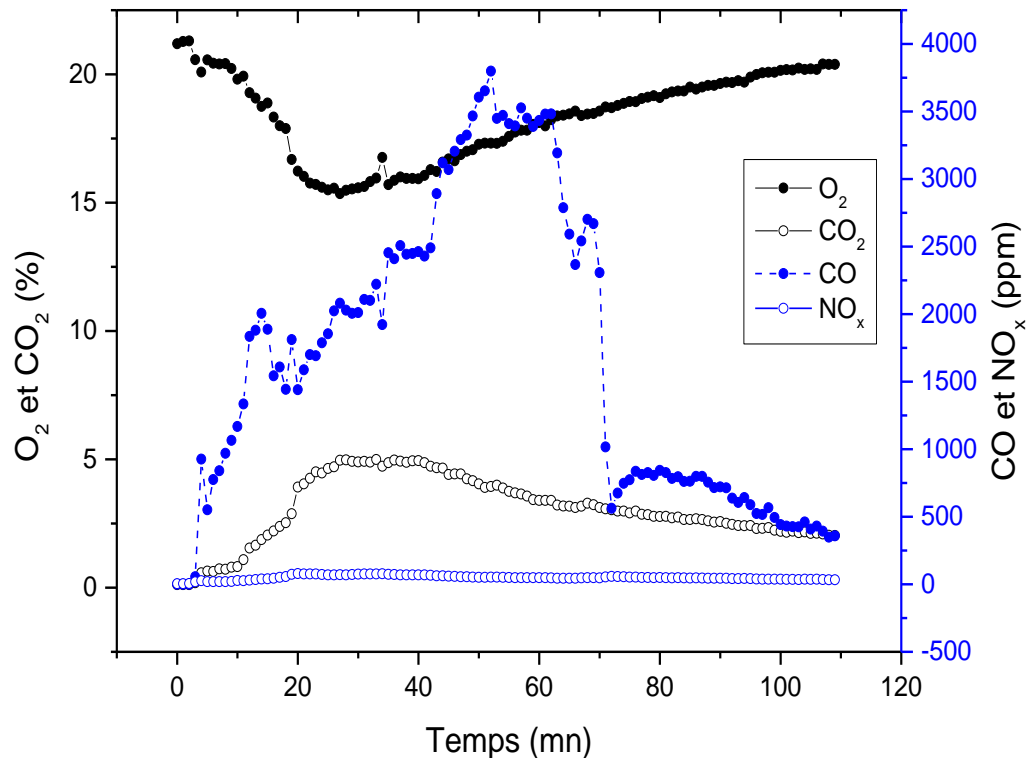


Figure 3.10 : Variation des concentrations de gaz en fonction du temps : cas de la combustion des briquettes de charbon sous clapet fermé

Lors de cet essai, le lit de briquettes de charbon a été laissé prendre de la braise. Cela a duré environ 27 minutes. Durant cette période, la teneur en oxygène dans les fumées s'établissait entre environ 15 et 20 %, la concentration en CO augmentait de 552 ppm à 2 081 ppm et celle en NO_x fluctuait entre 4 ppm et 79 ppm. Dès la fermeture de la porte de la chambre de combustion, la teneur en oxygène dans les fumées baissait légèrement puis continuait à augmenter. Cette observation est contraire à ce qui a été observé dans le cas de la combustion des coques d'arachide où on observait une baisse importante de la teneur en oxygène dans les fumées dès la fermeture de la chambre de combustion. Du fait de la porosité du lit de briquettes de charbon, plus d'air primaire a transité par la partie basse de la chambre de combustion à travers les espaces entre les briquettes de charbon. Malgré cette augmentation de la teneur en oxygène, la concentration en CO a augmenté et a atteint un maximum de 3 799 ppm. Des conditions aérodynamiques instables dans la chambre de combustion sont certainement à l'origine de cette augmentation de la concentration en CO.

A partir de cette valeur maximale, la concentration en CO suit une tendance décroissante jusqu'à atteindre une valeur minimale de 563 ppm. Cette phase correspond à une combustion plus homogène du lit de briquettes de charbon. A partir de cette dernière valeur, une légère augmentation de la concentration en CO a été observée. Pour cette période, une phase hétérogène s'est installée.

Les concentrations moyennes en CO et NO_x sont respectivement de 1 672,77 ppm (soit 1 915,66 mg/m³) et 49,09 ppm (soit 62,02 mg/m³). La combustion des briquettes de charbon dans le générateur d'air chaud, sous clapet fermé, permet d'augmenter la concentration en CO de plus 130 ppm et d'augmenter légèrement la concentration en NO_x de plus 8 ppm, par rapport à la combustion de ces dites briquettes sous clapet ouvert.

La combustion des briquettes de charbon dans le générateur d'air chaud répond aux exigences de la norme sénégalaise en NO_x mais pas en CO.

Comparativement à la combustion des briquettes de charbon dans le générateur d'air chaud à clapet ouvert, la combustion des briquettes de charbon sous clapet fermé a également démontré des niveaux moins élevés de CO, mais avec des niveaux supérieurs de NO_x, par rapport à la combustion des tiges de maïs et des tiges de blé dans une chaudière à biomasse de 176 kW [24]. D'autre part, des concentrations en CO plus élevées mais avec des concentrations en NO_x plus faibles sont obtenues, par rapport à la combustion de pellets de tiges de maïs dans une chaudière de 40 kW [25].

3.1.4 Émissions de gaz issus de la combustion des coques de noix de cajou

Des coques de noix de cajou ayant une teneur en humidité de 4,87 % ont été utilisées dans cette partie du travail. Cinq (5) kg de ces dites coques de noix de cajou sont brûlées dans la chambre de combustion du générateur d'air chaud indirect.

Durant le test, les températures à différents endroits du générateur d'air chaud ainsi que les émissions de gaz, ont été suivies tout au long de la durée de l'essai. Les valeurs des températures et celles des concentrations en CO, CO₂, O₂ et NO_x ont été enregistrées à des intervalles d'une minute.

Il faut noter que pour les coques de noix de cajou, seul un essai de combustion où la porte de la chambre de combustion a été fermée est effectué. La combustion de ces coques de noix de cajou produisait beaucoup de CO (dépassant largement 10 000 ppm) et des fumées très noirâtres et une odeur insupportable. Et cela affectait beaucoup le filtre de condensat avec beaucoup de salissement. Par peur de gâter l'appareil (analyseur de gaz RASI 700 Bio), nous avons jugé nécessaire de ne pas effectuer d'autres essais avec ce type de combustible.

La figure 3.11 illustre les tendances des différentes températures mesurées lors de la combustion des coques de noix de cajou.

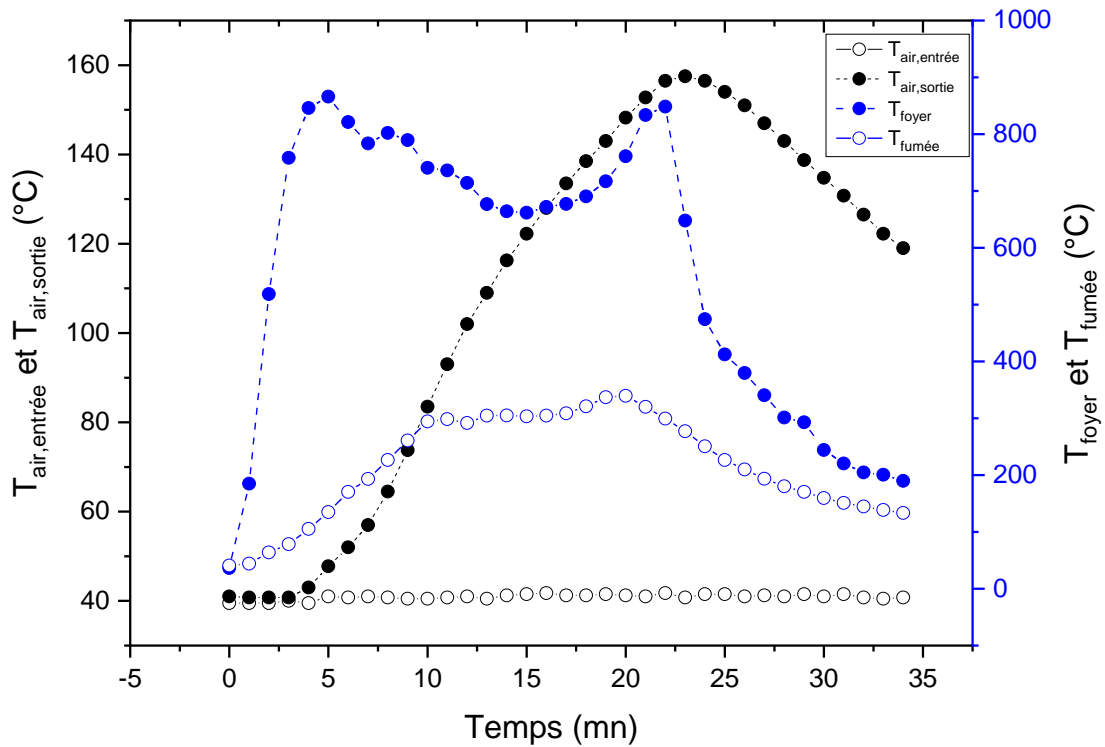


Figure 3.11 : Variation des températures à différents endroits du générateur d'air chaud en fonction du temps : cas de la combustion des coques de noix de cajou sous clapet fermé

La figure 3.11 montre qu'une température d'air de sortie ($T_{\text{air, sortie}}$) plus élevée, comparée à aux températures obtenues lors de la combustion des briquettes de charbon et les coques d'arachide, est obtenues lors de la combustion des coques de noix de cajou. Cette température est de 157,5 °C. Il s'agit d'une température idéale pour une application de séchage ou de process à moyenne température tels que les activités de séchage des matériaux (biomasse, tuiles, briqueterie,...) ou de certains produits destinés à l'alimentation.

Il a été également remarqué que les coques de noix de cajou sont très énergétiques. Nous avons obtenu une température maximale au niveau de la chambre de combustion de 866 °C. La température maximale des fumées a atteint une valeur d'environ 340 °C.

Concernant les émissions de gaz, le comportement temporel des concentrations en CO, CO₂, O₂ et NO_x est montré sur la figure 3.12.

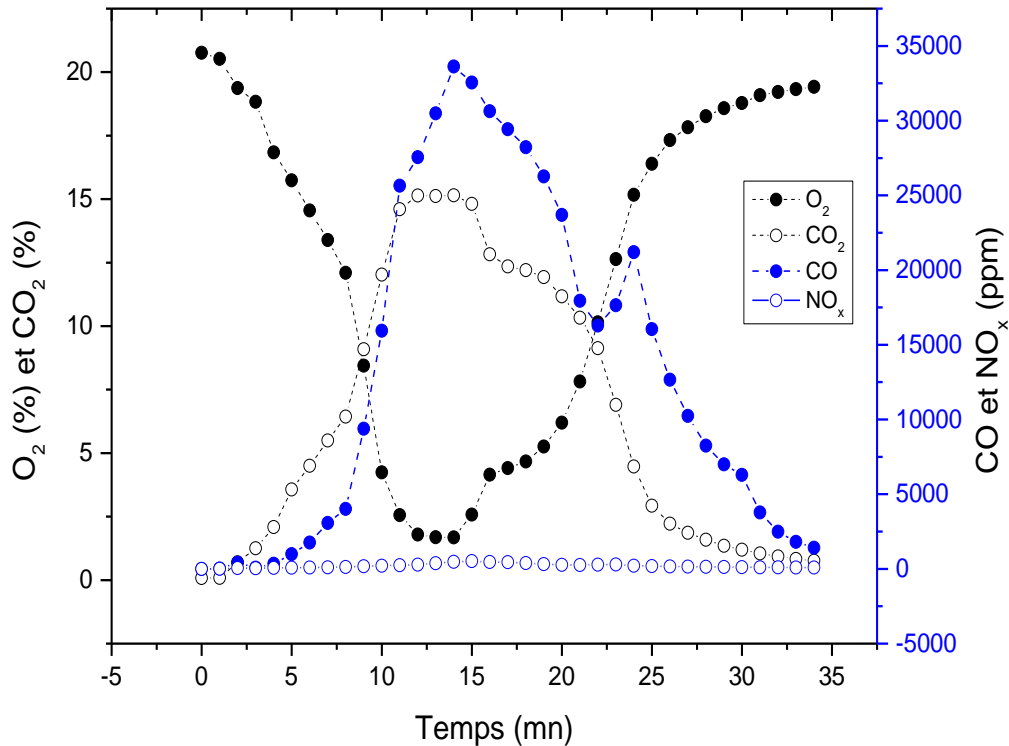


Figure 3.12 : Variation des concentrations de gaz : cas de la combustion des coques de noix de cajou sous clapet fermé

La figure 3.12 montre clairement que la combustion des coques de noix de cajou s'est effectuée en deux phases. Dès l'allumage du lit des coques de noix de cajou, pour éviter qu'une grande partie des fumées produites s'échappent par la porte de la chambre de combustion, le clapet a été utilisé pour fermer la porte. C'est ainsi que la concentration en CO a augmenté en passant de 26 ppm à 33 629 ppm dépassant la limite de l'analyseur ; 10 000 ppm. Durant cette phase qui a duré 14 minutes, la teneur en oxygène est passée de 20,52 % à 1,68 %. Cette quantité de CO élevée s'explique par la libération de composés volatils avec notamment le dégagement du baume ou du CNSL (Cashew Nut Shell Liquid) en anglais, le liquide noirâtre se libérant des coques de noix de cajou au fur et à mesure que la température augmente. Après les 14 minutes, une phase plus homogène s'est installée au sein de la chambre de combustion. Ceci s'est matérialisé par une baisse de la quantité de CO et également une augmentation de la teneur en oxygène dans les gaz. Pour une consommation totale de la charge, il a fallu une durée de la combustion des coques de noix de cajou d'environ 35 minutes. La concentration en NO_x a varié entre 1 ppm et 526 ppm durant toute la durée de l'essai.

Les concentrations moyennes en CO et NO_x sont respectivement de 13 347,88 ppm (soit 15 286 mg/m^3) et 201,86 ppm (soit 247,7 mg/m^3). La combustion des coques de noix de cajou répond également aux exigences de la norme sénégalaise en NO_x mais pas en CO.

La concentration moyenne en CO des coques de noix de cajou est 8 fois plus importante que celle des briquettes de charbon en combustion sous clapet fermé. Elle est de plus de 2 300 ppm que la concentration moyenne en CO des coques d'arachide en combustion sous clapet fermé. Le tableau 3.1 représente les concentrations moyennes en CO et en NO_x et les valeurs maximales de la température d'air de sortie pour les différents essais réalisés.

Tableau 3.1 : Tableau résumant les valeurs moyennes du CO et de NO_x et celles maximales de la température d'air de sortie pour les différents tests réalisés.

Types de biomasse	Quantités (kg)	CO moyenne (ppm)		NO _x moyenne (ppm)		T _{air, sortie (air chaud)} (°C)	
		Clapet ouvert	Clapet fermé	Clapet ouvert	Clapet fermé	Clapet ouvert	Clapet fermé
Briquettes de charbon	5 kg	1 539,25	1 672,77	40,21	49,09	78,25	89,25
Coques d'arachide	5 kg	1 384,56	11 025,09	53,99	108,75	98,25	122,5
Coques de cajou	5 kg	-	13 347,88	-	201,86	-	157,5

Le fait de fermer la porte de la chambre de combustion permet de perdre moins d'énergie et de garder une plus haute température à la sortie de l'échangeur de chaleur. Il s'agit des températures idéales pour une application de séchage ou de process à moyenne température tels que les activités de séchage des matériaux (biomasse, tuiles, briqueterie,...) ou de produits destinés à l'alimentation. Durant la combustion des biomasses, sous clapet fermé, les concentrations moyennes en CO et en NO_x se multiplient. Notre générateur d'air chaud répond aux exigences de la norme sénégalaise (NS 05 062) en NO_x (600 mg/m³) pour les chaudières à biomasse de puissance thermique inférieure à 50 MW, mais pas en CO (200 mg/m³). Des mécanismes doivent être entrepris en vue de réduire les émissions de CO ; par exemple effectuer une plus grande injection d'air primaire et secondaire, faire des chargements de moindre quantité de combustible à des intervalles de temps régulés.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats correspondants aux tests de vérification d'étalonnage des capteurs de température de types MAX6675 et de mesure de la température aux différents endroits du générateur. Nous avons pu aussi, à l'aide d'un analyseur de gaz RASI 700 Bio, mesurer et comparer certaines valeurs de gaz polluants (CO₂, CO et NO_x) émis lors de la combustion des différentes biomasses testées.

Les mesures faites avec le capteur de température MAX6675 et l'analyseur de gaz RASI 700 Bio sur le générateur d'air chaud indirect donnent des résultats corrects et appréciables par rapport aux biomasses utilisées.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La valorisation de la biomasse en énergie (utilisée à des fins énergétiques) reposant sur la combustion, nécessite des températures élevées. Elle participe également à la génération de l'effet de serre en augmentant d'une manière plus ou moins considérable les émissions des gaz polluants dans les industries ou les foyers domestiques. Ce présent travail visait donc à équiper un générateur d'air chaud à échangeur de chaleur avec des instruments de mesure de température, d'émissions de gaz et de particules fines. Après une revue de la littérature sur les technologies de générateurs d'air chaud et sur les émissions polluantes dans un système dit générateur d'air chaud fonctionnant avec un combustible de biomasse, le système Arduino a été présenté et utilisé pour la programmation des capteurs de température de type MAX6675. L'usage du logiciel Arduino nous a permis de maîtriser les cartes Arduino Uno et Nano ainsi que les capteurs de température MAX6675 utilisés pour l'acquisition des données. Durant cette étude, nous avons eu également à utiliser un analyseur de gaz RASI 700 Bio pour mesurer les émissions de gaz générées lors de la combustion des trois biomasses (coques d'arachide, coques de noix de cajou et briquettes de charbon) utilisées pour l'alimentation du générateur d'air chaud indirect.

Les températures mesurées étaient la température de l'air ambiant à l'entrée de l'échangeur de chaleur ($T_{\text{air, entrée}}$), celle à la sortie de l'échangeur de chaleur ($T_{\text{air, sortie}}$), celle de la chambre de combustion (T_{foyer}) et celle des fumées ($T_{\text{fumée}}$). Pour les gaz, l'oxygène (O_2), le dioxyde de carbone (CO_2), le monoxyde de carbone (CO) et les oxydes d'azote NO_x ($NO + NO_2$) sont les principaux gaz mesurés. Une étude explicative des tendances des gaz a été effectuée.

A l'issue de ces expériences, trois conclusions essentielles ont été tirées :

- Pour tous les trois combustibles étudiés, la température d'air de sortie ($T_{\text{air, sortie}}$) était comprise dans la gamme 70-200 °C et demeurait plus importante avec les coques de noix de cajou ; coques d'arachide $T_{\text{air, sortie}}$ (98,25 °C – 122,25 °C), briquettes de charbon $T_{\text{air, sortie}}$ (78,25 °C – 89,25 °C) et coques de noix de cajou $T_{\text{air, sortie}}$ (157,5 °C). Ces combustibles sont donc susceptibles d'être utilisés comme source d'énergie pour des applications de séchage des matériaux (biomasse, tuile, briques en terre cuite,...) ou de certains produits destinés à l'alimentation (fruits et légumes, céréales,...) ;
- Pour tous les trois combustibles, les émissions de CO étaient très hautes mais celles de NO_x répondaient aux exigences de la norme sénégalaise (NS 05 062) en matière de concentration en NO_x pour les chaudières à puissance thermique inférieure à 50 MW.

Les concentrations moyennes en NO_x mesurées étaient toutes en dessous de 600 mg/m^3 et celles en CO étaient toutes largement au-dessus de 200 mg/m^3 . Les coques de noix de cajou, très énergétique s'avèrent plus polluantes (CO : $13\,347,88 \text{ ppm}$ et NO_x : $201,86 \text{ ppm}$) que les coques d'arachide (CO : $1\,384,56 \text{ ppm}$ – $11\,025,09 \text{ ppm}$ et NO_x : $53,99 \text{ ppm}$ – $108,75 \text{ ppm}$) et les briquettes de charbon (CO : $1\,539,25 \text{ ppm}$ – $1\,672,77 \text{ ppm}$ et NO_x : $40,21 \text{ ppm}$ – $49,09 \text{ ppm}$) ;

- La combustion sous clapet fermé était celle qui favorisait plus l'augmentation de la température d'air de sortie et des concentrations en CO et en NO_x . Et ceci est d'autant plus important pour le combustible de la coque de noix de cajou.

En perspectives, vue la dangerosité en terme d'émissions polluantes, il serait intéressant de rassembler tous les équipements possibles pour l'instrumentation et la mesure des particules de matière (PM) dans le générateur d'air chaud à biomasse afin de prendre les dispositions idoines au respect de l'environnement mais surtout d'utiliser ces technologies de manière plus efficiente. Pour évaluer le bilan énergétique (quantité d'énergie échangée) et le rendement du générateur d'air chaud, il serait nécessaire de mesurer le débit d'air entrant dans l'échangeur de chaleur. Pour ce qui est du séchage des matériaux ou des produits agroalimentaires il serait également nécessaire de raccorder le générateur d'air chaud à séchoir afin d'étudier l'efficacité de ce dernier.

Références bibliographiques

- [1] Ndong, A. (2019). Pollution de l'air extérieur et intérieur à Dakar (Sénégal) : caractérisation de la pollution, impact toxicologique et évaluation épidémiologique des effets sanitaires, thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop et université du littoral Côte d'Opale.
- [2] Qualité de l'air : Sources de pollution et effets sur la santé, <https://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/air-exterieur/qualite-de-l-air-exterieur10984/article/qualite-de-l-air-sources-de-pollution-et-effets-sur-la-sante> (Consulté le 02 novembre 2020).
- [3] De Koning, H.W, Smith, K.R et Last, J.M. (1985). Combustion de biomasse et santé. Bulletin of the World Health Organization, vol.63, n° 2, p 215.
- [4] ADEME, CRITT BOIS d'EPINAL, ENSTIB/LERMAB. (2010). État de l'art de la technologie générateur d'air chaud à partir de biomasse.
- [5] Mameri, F. (2018). Caractérisation multi-physique et multi-échelle d'une installation de conversion d'énergie : application à une unité de cogénération biomasse, thèse de doctorat, université de polytechnique hauts-de-France.
- [6] Diédhiou, A. (2017). Étude hydrodynamique et valorisation énergétique pour transformation par transformation thermo-chimique de déchets de biomasse pour l'alimentation d'une briqueterie, thèse de doctorat, université Assane Seck de Ziguinchor (UASZ) et Université De Technologie De Compiègne (UTC) France, vol. 193.
- [7] Uluca, K. (2019). Infrared measurement of biomass combustion in a wire mesh reactor, PhD Thesis, Middle East technical university.
- [8] Site énergie du Service public de Wallonie « L'excès d'air dans la combustion peut nuire à la santé de votre porte-monnaie ! », <https://energie.wallonie.be/fr/l-exces-d-air-dans-la-combustion-peut-nuire-a-la-sante-de-votre-porte-monnaie.html?IDC=8049&IDD=97761> (consulté le 15 décembre 2020).
- [9] Boudreau, A. (2017). Analyse des performances et des émissions polluantes d'un moteur à allumage commandé à injection directe lors de l'utilisation de carburants oxygénés, mémoire de maîtrise, école de technologie supérieure, université de Québec.
- [10] Chevrier, F, Jezek, I, Brulfert, G, Mocnik, G, Marchand, N, Jaffrezo, J.L et Besombes, J.L. (2016). Decombio-Contribution de la combustion de la biomasse aux PM10 en vallée de l'Arve: mise en place et qualification d'un dispositif de suivi. 2268-3798.
- [11] J-M R. D-BTP. (2006). La combustion. <https://slideplayer.fr/slide/14243638/> (consulté le 20 décembre 2020).

- [12] Gouvernement du Canada, Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail. « Conversion des limites d'exposition en milieu de travail des mg/m³ aux ppm : Réponses SST », <https://www.cchst.ca/oshanswers/chemicals/convert.html> (consulté, le 17 janvier 2021).
- [13] Burette, P, Bouïaert, C, Vanmeerbeek, M et Giet, D. (2006). Médecin de famille et intoxication au monoxyde de carbone, *Revue Médicale de Liège*, vol. 61, n° 5-6 : 285-90.
- [14] Robert, L. (2006). Caractéristique des émissions issues de la combustion du bois dans deux appareils indépendants, 2268-3798.
- [15] Duvivier, T and Brechet, T. (2018). Low-cost air quality sensors: an opportunity to raise awareness and improve air pollution monitoring.
- [16] Commandré, J. M. (2002). Formation des oxydes d'azote lors de la combustion de coques de pétrole dans des conditions de précalcinateur de cimenterie, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT.
- [17] Leygonie, R. (1989). Effets des oxydes d'azote sur la santé humaine et sur le milieu naturel, *Revue générale de thermique*, N°330-331.
- [18] Ba, M.S. (2020). Valorisation des résidus agro-sylvo-pastoraux de la Casamance en combustibles de briquettes biomasses pour les foyers domestiques et industriels (briquèterie), thèse de doctorat, université Assane Seck de Ziguinchor.
- [19] Himbane, P.B. (2020). Conditions d'élaboration des briquettes de charbon végétal pour la haute performance énergétique et environnementale des cuiseurs améliorés de la Casamance, thèse de doctorat, université Assane Seck de Ziguinchor.
- [20] Introduction à l'Arduino, https://www.unilim.fr/pages_perso/deneuille/docs/Info2PC/Cours4.pdf (consulté le 25 janvier 2021).
- [21] Lydia, K et Sofiane, G. (2018). Conception et réalisation d'un système de mesure et transmission de paramètres météorologiques, mémoire de master, Université Mouloud Mammeri, Algérie.
- [22] Datasheet MAX6675, Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter (0°C to +1024°C), <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf> (consulté le 02 février 2021).
- [23] Datasheet PMS5003, digital universal particle concentration sensor, 2016 product data manual of plantower, https://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/resources-page/plantower-pms5003-manual_v2-3.pdf (consulté le 21 février 2021).

- [24] Morissette, R, Savoie, P, et Villeneuve, J. (2013). Corn stover and wheat straw combustion in a 176-kw boiler adapted for round bales. *Energies* 6, n° 11: 5760-74.
- [25] Xiong, S, Burvall, J, Örberg, H, Kalen, G, Thyrel, M, Öhman, M et Dan Boström. (2008). Slagging Characteristics during Combustion of Corn Stovers with and without Kaolin and Calcite. *Energy & Fuels* 22, n° 5: 3465-70.

ANNEXES

Annexe A : Code de programmation Arduino Uno pour la vérification de l'étalonnage des capteurs de température MAX6675/MAX31855.

```
#include "max6675.h" //La librairie du MAX6675
int thermoDO = 4; //Data Out Port SPI sur 4-5-6
int thermoCS = 5; //Chip Select
int thermoCLK = 6; //Clock
// Déclarer les pins utilisées
MAX6675 thermocouple(thermoCLK, thermoCS, thermoDO);
void setup() {
  Serial.begin(9600); //Pour afficher à l'écran du PC
  Serial.println("Thermocouple et MAX6675");
  delay(500); //Attendre l'initialisation du module MAX6675
}
void loop() { // Boucle de mesure de la température
  Serial.print("C = ");
  Serial.println(thermocouple.readCelsius());
  //Serial.print("F = "); // Si on veut aussi des mesurs en Fahrenheit
  //Serial.println(thermocouple.readFahrenheit());
  delay(60000); //1 mesure par minute car 1000 correspond à 1 mesure par seconde
}
```

Annexe B : Code de programmation Arduino Nano utilisé pour la mesure de la température à différents endroits du générateur d'air chaud à biomasse.

```
#include "max6675.h" //La librairie du MAX6675
int thermoDO = 4; // Data Out Port SPI sur 4-5-6
int thermoCLK = 6; //Clock
int thermoCS1 = 5; //Chip Select
int thermoCS2 = 7; //Chip Select
int thermoCS3 = 8; //Chip Select
int thermoCS4 = 9; //Chip Select
// Déclarer les pins utilisées
MAX6675 thermocouple1(thermoCLK, thermoCS1, thermoDO);
MAX6675 thermocouple2(thermoCLK, thermoCS2, thermoDO);
MAX6675 thermocouple3(thermoCLK, thermoCS3, thermoDO);
MAX6675 thermocouple4(thermoCLK, thermoCS4, thermoDO);
void setup() {
  Serial.begin(9600); //Pour afficher à l'écran du PC
  Serial.println("CLEARDATA");
  Serial.println("LABEL,Date,Time,Temp1,Temp2,Temp3,Temp4,");
  Serial.println("Thermocouple et MAX6675");
  delay(500); //Attendre l'initialisation du module MAX
}
void loop() {
  // Boucle de mesure de la température
  Serial.print("T1 = ");
```

```
Serial.println(thermocouple1.readCelsius());
Serial.print("T2 = ");
Serial.println(thermocouple2.readCelsius());
Serial.print("T3 = ");
Serial.println(thermocouple3.readCelsius());
Serial.print("T4 = ");
Serial.println(thermocouple4.readCelsius());
Serial.print("DATA,TIME,TIMER,");
Serial.print(thermocouple1.readCelsius());
Serial.print(", ");
Serial.print(thermocouple2.readCelsius());
Serial.print(", ");
Serial.print(thermocouple3.readCelsius());
Serial.print(", ");
Serial.print(thermocouple4.readCelsius());
Serial.println(", ");
delay(60000); //1 mesure par minute
}
```