



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
D'ANTANANARIVO



MENTION : GENIE ELECTRIQUE

PARCOURS : RESEAU D'ENERGIE ET ENERGIE RENOUVELABLE

Mémoire en vue d'obtention du diplôme de licence en réseau d'énergie et
énergie renouvelable

DETERMINATION DES PARAMETRES CLES DE CARBONISATION A LIT FIXE ET A FLUX HOMOGENE

Présenté par :

Monsieur ANDRINIAINA Noëlon Angelos Stephane

Encadreurs :

Monsieur RANDRIAMORA Edmond, Maître de conférences

Monsieur RAMAMONJISOA Mamtiana Master MSc, Chercheur au
CNRIT

Promotion 2016



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
D'ANTANANARIVO



MENTION : GENIE ELECTRIQUE

PARCOURS : RESEAU D'ENERGIE ET ENERGIE RENOUVELABLE

Mémoire en vue d'obtention du diplôme de licence en réseau d'énergie et
énergie renouvelable

DETERMINATION DES PARAMETRES CLES DE CARBONISATION A LIT FIXE ET A FLUX HOMOGENE

Présenté par :

Monsieur ANDRINIAINA Noëlon Angelos Stephane

Devant les membres du jury :

Président : Monsieur ANDRIANAHARISON Yvon, Professeur titulaire

Encadreurs :

Monsieur RANDRIAMORA Edmond, Maître de conférences

Monsieur RAMAMONJISOA Mamitiana Master MSc, Chercheur
au CNRIT

Examineurs :

Madame RAVALISON Harinivo, Assistante

Monsieur RAKOTOJAONA Andriamanantena, Maître de conférences

Soutenu le 27 Septembre 2017 à la salle M1

Promotion 2016

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce travail de mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Licence est rendue possible grâce aux aimables collaborations de nombreuses personnes au niveau de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo et aussi au niveau de Centre National de Recherche Industriel et Technologique. Avant tout, nous tenons à remercier Dieu tout puissant et miséricordieux de nous avoir accordé la foi, la santé, la force afin de mener à terme ce modeste travail.

Ensuite, notre profonde reconnaissance et nos vifs remerciements sont adressés à :

- Monsieur ANDRIANAHARISON Yvon, Professeur titulaire à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA), Directeur de l'ESPA, qui nous a fait l'honneur de présider cette soutenance ;
- Monsieur RAMAROZATOVO Vonjy, Maître de conférences à l'ESPA, Responsable de la mention Génie Electrique pour leur grande responsabilité envers la mention Génie Electrique et qui a bien voulu m'accueillir au sein de son département ;
- Monsieur RANDRIAMORA Edmond, Maître de conférence à l'ESPA, qui a accepté la responsabilité d'être notre Encadreur. Nous sommes respectueusement reconnaissants aux attentions, directives et remarques que vous avez apportées à ce mémoire durant l'encadrement ;
- Monsieur RAMAMONJISOA Mamitiana, Master MSc, Chercheur au CNRIT, d'avoir accepté de nous encadrer au sein du projet et donné son temps tout au long de la réalisation de cette étude en dépit de ses nombreuses occupations. Vos suggestions ont été précieuses ;
- Madame RAVALISON Harinivo, Assistante à l'ESPA, d'avoir eu la bonne volonté d'examiner ce travail et de siéger parmi le jury ;
- Monsieur RAKOTOJAONA Andriamanantena, Maître de conférences à l'ESPA, d'avoir eu la bonne volonté d'examiner ce travail et de siéger parmi le jury ;
- Tous les Enseignants et personnels du Mention Génie Electrique ;
- Ma famille, mes amis et surtout mes parents qui ont toujours cru en moi et qui m'ont toujours soutenu.

Enfin, j'adresse mes reconnaissances à tous ceux qui auraient fourni une aide précieuse au cours de l'élaboration de ce travail de mémoire.

TENY FISAORANA

Ny fanatontosana izao asa fikarohana hahazoana ny mari-pahaizana « licence » izao dia tanteraka noho ny fiaraha-miasa tamin'ireo olona maro teto anivon'ny Sekoly Ambony Politeknika eto Antananarivo sy ny teo anivon'ny « Centre National de Recherche Industriel et Technologique ». Eto ampiandohana dia tsy hay tokoa ny tsy hisaotra an'ilay Tompo Mpahary mpamindra fo izay nanome finoana sy fahasalamana ary hery sy tanjaka amin'ny fanatontosana an'ity asa fikarohana ity.

Manarak'izany, fankasitrahana sy fankatelemana no atolotray an'i :

- Andriamatoa ANDRIANAHARISON Yvon, Profesora, Talen'ny Sekoly Ambony Politeknika eto Antananarivo (ESPA), izay mpitarika sy mpiandraikitra ny fampisehoana izao asa fikarohana izao ;
- Andriamatoa RAMAROZATOVO Vonjy, « Maître de conférences » eto anivon'ny ESPA, tompon'andraikitra ny Rantsam-pampianarana “Génie Electrique” amin'ny fandraisanao ny andraikitra ary koa ny nandraisanao ahy ato amin'ny Rantsam-pampianarana izay sahaninao ;
- Andriamatoa RANDRIAMORA Edmond, « Maître de conférences » eto anivon'ny ESPA, misaotra tamin'ny torolalana sy torohevitra izay narosoanao ho ahy nandritra ny fanatontosana ity asa fikarohana ity ;
- Andriamatoa RAMAMONJISOA Mamitiana, « Master MSc », mpikaroka anivon'ny CNRIT, misaotra tamin'ny torolalana sy torohevitra indrindra ny nahafonanao fotoana na dia teo aza ny andraikitra maro izay sahaninao ;
- Ramatoa RAVALISON Harinivo, « Assistante » eto anivon'ny ESPA, amin'ny fahavononanao hitsara izao asa fikarohana izao ;
- Andriamatoa RAKOTOJAONA Andriamanantena, « Maître de conférences » eto amin'ny ESPA, amin'ny fahavononanao hitsara izao asa fikarohana izao ;
- Ireo Mpanabe izay nampita sy nizara ireo fahalalana maro sesehena ;
- Ireo fianakaviko sy ny namana rehetra, indrindra ny Ray aman-dReniko izay tsy nikely soroka nanampy sy nanohana na ara-moraly izany na ara-bola.

Eto dia maneho fisaorana feno ihany koa ho an'ireo rehetra izay nanampy ahy nandritra ny fanomanana ity asa ity.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
TENY FISAORANA	ii
TABLE DES MATIERES	iii
LISTE DES ABREVIATIONS ET NOTATIONS	v
LISTES DE TABLEAUX	vii
LISTE DE FIGURES	viii
INTRODUCTION.....	1
I. MATERIELS ET METHODES.....	3
I.1. Etat de l'art sur la Carbonisation.....	3
I.1.1. Définition de carbonisation	3
I.1.2. Type de carbonisation.....	3
I.1.3. Processus et procédés de carbonisation	3
I.2. Matière à carboniser	6
I.2.1. Description	6
I.2.2. Production et disponibilité	7
I.2.3. Situation mondiale et locale du Vétiver	7
I.2.4. Utilisation.....	7
I.3. Etude théorique du système	8
I.3.1. Système de régulation	8
I.3.2. Description du système	13
I.3.3. Principe de fonctionnement du système	14
I.3.4. Choix de système d'étanchéité	15
I.3.5. Choix des équipements électriques.....	17
II. RESULTATS	31
II.1. Construction du four	31
II.1.1. Partie mécanique	31
II.1.2. Montages des équipements électriques	34
II.2. Charbon de biomasses	37

II.2.2. Evolution de la température du carbonisateur à lit fixe et à flux homogène	37
II.2.3. Rendements massiques de charbon	38
III. DISCUSSIONS ET RECOMENDATIONS	42
III.1. Interprétation et discussion du résultat	42
III.2. Analyse SWOT.....	43
III.2.1. Avantages du four de carbonisation.....	43
III.2.2. Inconvénients du four carbonisation	44
III.2.3. Opportunités s’offrant au four de carbonisation	45
III.2.4. Menaces pour la technique de carbonisation améliorée.....	45
CONCLUSION	46
BIBLIOGRAPHIE	47
Annexe 1 : Caractéristiques et domaines d’utilisation de chaque types d’acier	I
Annexe 2 : Tableau inventaire des matériaux de garnissage les plus utilisés	II
Annexe 3 : Choix d’un moteur à induction	III
Annexe 4 : Rendement de production de charbon	IV
Annexe 5 : Proposition de Norme : Détermination des taux d’humidité, de cendres, de matières volatiles et de carbone fixe de charbons à Madagascar.....	V
Annexe 6 : Description et procédure du four CNRITà consigne 500°C.....	VIII

LISTE DES ABREVIATIONS ET NOTATIONS

°C	:	Degré Celsius
AC	:	Alternating Current
Al	:	Aluminium
AL	:	Alarme
C	:	conductance
Ce	:	Taux de Cendres (en %)
CEI		Commission Électrotechnique Internationale
Cf	:	Taux de Carbone Fixe (en %)
CH ₄	:	Méthane
Cm	:	Centimètre
CNRIT	:	Centre National de Recherche Industriel et Technologique
CO	:	Carbone
CO ₂	:	dioxyde de carbone
Cr	:	Chrome
D	:	Action Dérivée
dt	:	Dérivée
$\varepsilon(t)$:	Signal d'entrée du correcteur (ou signal d'erreur)
Fe	:	Fer
FEM	:	Force Electromotrice
HP	:	Horsepower
Hz	:	Hertz
I	:	Action Intégrale
<i>I</i>	:	Intensité du courant électrique (en A)
K	:	Constante proportionnelle
kg	:	Kilogramme
kJ/kg	:	Kilojoule par kilogramme
KM	:	Contacteurs principaux
kW	:	Kilowatt
l	:	Longueur de corps de chauffe (en m)
L	:	Phase
M	:	Moteur
M1	:	Masse matières premières sèches avant carbonisation (en g)
M2	:	Masse de charbon obtenu (en g)

mm	:	Millimètre (en%)
MV	:	Indice de Matières Volatiles
Ni	:	Nickel
N	:	Neutre
ONG	:	Organisation Non Gouvernemental
P	:	Action Proportionnelle
P	:	Puissance électrique dissipée (en W)
pH	:	Potentiel hydrogène
PI	:	Action proportionnelle intégrale
PID	:	Proportionnel, Intégral, Dérivé
R	:	Résistance (en Ω)
S	:	Section (en m^2)
S1	:	Bouton poussoir
SWOT	:	Strenghts Weaknesses Opportunities Threats
Td	:	Constante de temps de l'action dérivée
Ti	:	Temps d'intégration
TPN	:	Tôle Perforé Nervurée
tr /mn	:	Tour par minute
U	:	Valeurs efficaces de la tension aux bornes de la résistance
V	:	Volt
w	:	Consigne
W	:	Watt
X	:	Grandeur mesurée
Y(t)	:	Signal de sortie du correcteur (ou signal de commande)
α	:	Coefficient de température de la résistivité (en $^{\circ}C^{-1}$)
ρ	:	Résistivité (en $\Omega \cdot m$)
ρ_0	:	Résistivité à $0^{\circ}C$ (en $\Omega \cdot m$)
ρ_T	:	Résistivité à la température T (en $\Omega \cdot m$)
Ω	:	Ohm
$\Omega \cdot m$:	Ohm metre
R_m	:	Rendement massique (en %)

LISTES DE TABLEAUX

Tableau 1 : Composition du système	13
Tableau 2 : Catégorie des contacteurs	21
Tableau 3 : Caractéristiques du contacteur	21
Tableau 4 : Caractéristiques du thermostat	22
Tableau 5 : Caractéristiques simplifiée de thermocouples	24
Tableau 6 : Caractéristiques du moteur asynchrone du type Mal 80-2	29
Tableau 7 : Caractéristiques du variateur de vitesse T-VERTER	30
Tableau 8 : Caractéristiques du « carbonisateur à lit fixe et à flux homogène »	37
Tableau 9 : Rendement massique de la carbonisation à 400°C	39
Tableau 10 : Rendement massique de la carbonisation à 500°C	39
Tableau 11 : Caractéristiques chimiques des charbons	41

LISTE DE FIGURES

Figure 1 : Schéma de principe du procédé avec chauffage interne.....	4
Figure 2 : Schéma du principe du procédé avec chauffage externe	5
Figure 3 : Schéma du principe du procédé avec chauffage par contact avec des gaz chauds	5
Figure 4 : Racines et feuilles du vétiver	6
Figure 5 : Processus de fabrication du charbon de vétiver	8
Figure 6 : Schéma fonctionnel du système en boucle ouvert	9
Figure 7 : Schéma fonctionnel du système en boucle fermé	9
Figure 8 : Qualité d'une bonne régulation.....	10
Figure 9 : Représentation schématique du système de commande de la température	17
Figure 10 : Constituants du contacteur.....	20
Figure 11 : Contacteur.....	21
Figure 12 : Rex-c100.....	23
Figure 13 : Structure d'un thermocouple.....	23
Figure 14 : FEM en fonction de la température de thermocouples.....	24
Figure 15 : Thermocouple K et son câble.....	25
Figure 16 : Représentation schématique de la commande du moteur.....	26
Figure 17 : Contacteur moeller DIL EM 10 G.....	26
Figure 18 : Machine asynchrone à cage d'écureuil.....	29
Figure 19 : Variateur de vitesse t-Verter	30
Figure 20 : Vue en perspective du four	31
Figure 21 : Vue de face du four	32
Figure 22 : Positionnement de laine de roche et de la presse étoupe	33
Figure 23 : Four de carbonisation	33
Figure 24 : Circuit de commande.....	34
Figure 25 : Armoire de commande électrique	35
Figure 26 : Vue de face du carbonisateur à lit fixe et à flux homogène.....	35
Figure 27 : Vue de gauche du carbonisateur à lit fixe et à flux homogène	36
Figure 28 : Vue de dessous du carbonisateur à lit fixe et à flux homogène	36
Figure 29 : Profil de la température de carbonisation des biomasses à 400°C.....	38
Figure 30 : Evolution du rendement massique du charbon en fonction de température.	40
Figure 31 : Comparaison de rendements massiques du charbon	40
Figure 32 : Caractéristiques des charbons carbonisés	41

INTRODUCTION

L'accès à l'énergie, qui est de plus en plus considéré comme un droit fondamental, est une condition nécessaire à tout le processus de développement. En effet deux milliards de personnes à travers le monde dépendent de bois issu de la déforestation pour leur besoin en énergie domestique. En Afrique, il représente 89% des sources d'énergie [1]. Plus particulièrement, dans un pays comme Madagascar où la transition charbonnière est irréversible et généralisée [2], se passer des ressources en bois (bois de chauffe et charbon de bois) semble être encore utopique. Elles constituent les principales sources d'énergie surtout en milieu urbain [3] en comptant pour 80 à 90% de l'énergie domestique consommée dans le pays [4]. Cependant, le prix du charbon de bois ne cesse pas de s'augmenter même s'il coûte moins cher que les énergies de substitutions telles que le gaz, le pétrole ou l'électricité qui nécessitent des dépenses de devises pour financer leur importation [5]. De plus, l'utilisation des énergies fossiles contribue à la démolition de notre planète et empêche les pays en voie de développement de s'évoluer à cause de leur dépendance énergétique. En outre, le prix de ce dernier ne cesse de s'augmenter et que la population malgache n'aura pas les moyens de les payer.

A cet effet, à travers la cuisson domestique, la population malgache dépend de bois engendrant la déforestation pour leur besoin en énergie domestique. Ce qui est à l'origine de graves problèmes environnementaux tels que : l'ensablement des rizières, la sécheresse, la pollution et le changement climatique qui sont causées par les émissions croissantes de gaz à effet de serre. Les émissions mondiales de CO₂ représentent 75 % des émissions de gaz à effet de serre. Selon les prévisions, elles vont encore augmenter de 55 % d'ici 2030 [6].

Compte tenu de la perturbation climatique planétaire, la protection de l'environnement devient une tâche primordiale pour tous les pays du monde entier. A cet effet, il est important d'améliorer la fabrication de charbon afin de réduire le phénomène de déforestation. Pour y arriver, le Centre National de Recherche Industriel et Technologique (CNRIT) a inventé et développé la technologie innovante appelée : « charbon végétal ». Cette technologie se révèle très compétitive par rapport au charbon de bois, elle a un effet positif en termes de changement climatique. Pour fabriquer ce charbon végétal, le CNRIT a conçu un appareil nommé « carbonisateur à lit fixe et à flux homogène ». Pour ces diverses raisons, nous avons choisis le thème de ce mémoire intitulé : « détermination des paramètres clés de carbonisation à lit fixe et à flux homogène ». Toutefois, la maîtrise de système de régulation de la température, de vitesse de rotation de brassage de la charge

et le système de calorifugeage du carbonisateur s'avère nécessaire pour qu'il fonctionne correctement. Il en ressort, la problématique suivante : comment optimiser le rendement de la carbonisation suivant ces paramètres ? Face à cette problématique, nous avons deux hypothèses : le regroupement des différents systèmes participants à la distribution d'une installation électrique peuvent être groupés dans l'armoire de commande électrique constitue des conditions de réussite ; la température, la vitesse de malaxage de la biomasse et l'étanchéité du carbonisateur conditionnent la réussite d'un processus de carbonisation et le charbon issu du vétiver est un moyen de réduire la déforestation.

Ainsi, le présent travail se propose de résoudre un problème professionnel qui touche le domaine suscité à l'aide des connaissances que nous avons apprises durant notre formation à l'ESPA. L'objectif global de ce mémoire c'est de maîtriser les paramètres de fonctionnement du carbonisateur pour obtenir du charbon à rendement élevé afin de satisfaire le besoin en énergie domestique de la population malgache et de réduire le phénomène de déforestation. Les objectifs spécifiques sont : concevoir l'armoire de commande électrique ; montrer que la température, le système d'étanchéité, la vitesse de malaxage de la charge à carboniser sont des paramètres conditionnant une bonne carbonisation et que le charbon de vétiver constitue une alternative viable au charbon de bois issu de la déforestation.

La méthodologie de mise en œuvre de ce travail s'effectue en deux grandes étapes : Premièrement, nous allons faire une documentation et recueil bibliographique. Deuxièmement, nous effectuons le choix des équipements.

Sur ce, ce document sera structuré de la manière suivante : après avoir traité l'état de l'art sur la carbonisation et la matière à carboniser dans la partie matériel et méthode, l'étude théorique du système sera faite en se focalisant sur le choix des équipements pour construire le fameux carbonisateur. Dans la première partie du résultat, le travail sera centré sur la construction du four y compris sa partie mécanique (système d'isolation thermique) et surtout sa partie électrique (armoire de commande électrique) afin de pouvoir déterminer les paramètres engendrant un meilleur rendement massique. En dernier lieu le résultat va faire l'objet d'une analyse plus approfondie. Les discussions et recommandations sont axées à l'interprétation, discussions des résultats et à l'analyse SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats).

I. MATERIELS ET METHODES

I.1. Etat de l'art sur la Carbonisation

I.1.1. Définition de carbonisation

La pyrolyse ou carbonisation est le processus dans lequel un échantillon est soumis à des températures élevées sous atmosphère inerte, de manière à obtenir un produit carboné solide, ainsi que des composés volatils (liquides et gazeux) [7].

I.1.2. Type de carbonisation

Il y a deux types de carbonisation, à savoir :

- Carbonisation traditionnelles ;
- Carbonisation améliorée.

I.1.2.1. Carbonisation traditionnelle

La carbonisation traditionnelle se fait dans des meules qui ne sont autre qu'un monticule de charge à carboniser couvert d'une couche isolante en gazon de préférence. Ce sont en fait les ancêtres du procédé de carbonisation.

I.1.2.2. Carbonisation améliorée

Une première amélioration de la carbonisation en meule est matérialisée par la carbonisation en fosse. Cette dernière n'est autre qu'une excavation réalisée à même le sol pour mettre la charge à carboniser à l'abri du flux de vent. On rencontre également le type de carbonisation dit subri-fosse utilisé dans le temps par la société Fanalamanga et dont l'amélioration de la fosse consiste en la mise en place d'un couvercle télescopique métallique en guise de dispositif d'étanchéité du four.

Les fours forestiers transportables ont été inaugurés au début du siècle pour réduire, par rapport aux meules traditionnelles, la durée de l'opération et la pollution de l'atmosphère du site d'implantation de la carbonisation. Ces fours sont des appareils métalliques construits en tôle d'acier. On distingue le four à tirage inverse, et celui à tirage direct, les fours à charbonnette, les fours cornus.

I.1.3. Processus et procédés de carbonisation

I.1.3.1. Processus de carbonisation

Lorsqu'on chauffe des substances organiques comme le bois ou la biomasse en l'absence d'oxygène, ces matières se décomposent thermiquement [8] :

Entre 100° et 180 °C : évaporation de l'eau libre et liée contenue dans la matière, avec l'apparition d'une faible quantité de CO, de CO₂.

Entre 180 et 280°C s'échappent de la vapeur d'eau, de l'acide formique et acétique, du CO_2 et un peu de CO . La plupart des gaz sont incombustibles, la réaction est endotherme. Ici on entame ce que les spécialistes nomment par torréfaction du bois.

A partir de 280°C commence une réaction exotherme violente. Des gaz combustibles comme le CO , le CH_4 , le formaldéhyde, l'acide formique et acétique, le méthanol et l'hydrogène se dégagent. Seul le squelette carboné à forte proportion de pores subsiste en résidu.

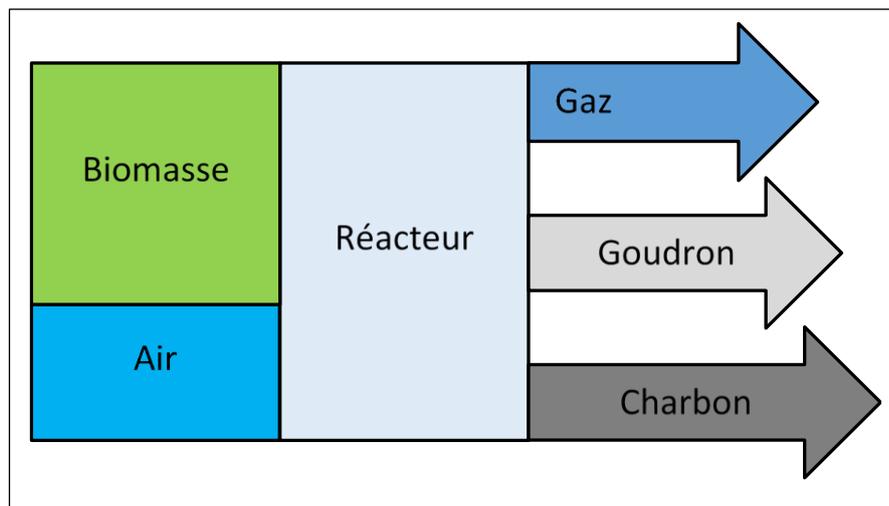
A des températures de 400 à 500°C a lieu la pyrolyse complète de la biomasse.

1.1.3.1. Procédés de carbonisation

On distingue trois types de procédé de carbonisation.

a. Carbonisation par combustion interne

Pour cette technique, l'énergie nécessaire à la carbonisation est fournie par la combustion d'une partie de la charge, disposée à l'intérieur d'une enceinte étanche quelconque, réduisant d'autant le rendement en charbon de bois [9]. La figure 1 nous montre le principe du procédé avec chauffage interne.



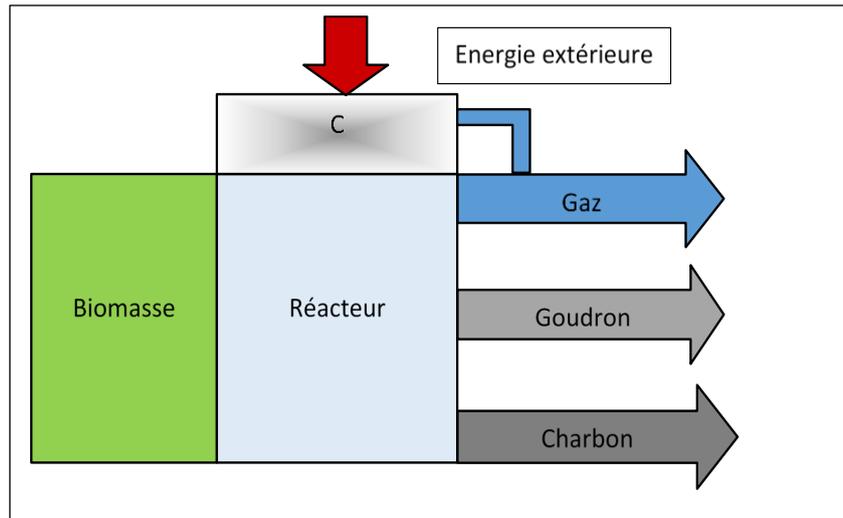
Source : auteur 2017

Figure 1 : Schéma de principe du procédé avec chauffage interne

b. Carbonisation par chauffage externe

La charge est placée dans une enceinte close, l'énergie nécessaire à la carbonisation provenant d'un foyer de chauffe externe est transmise par l'intermédiaire des parois de l'enceinte (vase clos, cornue) [10]. Le foyer peut être alimenté par tout combustible.

La figure 2 nous présente le principe du procédé avec chauffage externe.

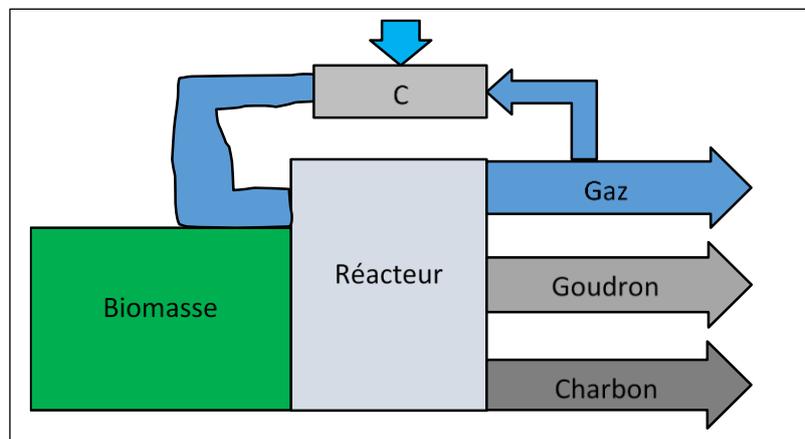


Source : auteur 2017

Figure 2 : Schéma du principe du procédé avec chauffage externe

c. Carbonisation par contact de gaz chauds

Une partie des gaz issus de la pyrolyse est brûlée dans une chambre de combustion externe ; les gaz issus de cette combustion sont injectés dans le réacteur, permettant ainsi l'apport d'énergie nécessaire au processus [11]. Ces coproduits sont récupérés par condensation. La figure 3 illustre le principe du procédé avec chauffage par contact de gaz chauds.



Source : auteur 2017

Figure 3 : Schéma du principe du procédé avec chauffage par contact avec des gaz chauds

I.2. Matière à carboniser

Dans ce chapitre, nous avons pris comme biomasse le vétiver. Le choix de vétiver se justifie parce qu'il s'adapte bien partout. Il peut croître dans n'importe quelle région à Madagascar. De plus ses feuilles sont considérées comme des résidus non exploitables.

I.2.1. Description

Les vétivers sont des grandes touffes vertes de 1 à 3 mètres de hauteur et fournies de feuilles étroites et fortes, droites, unies [12]. Ses racines très dense et ramifiée se développent verticalement et qui peuvent atteindre 6 mètres de profondeur. C'est en Inde (le nom vient du « Vettivern ») qui est l'origine de cette plante prestigieuse. Il est de famille des Graminées dont une douzaine d'espèces connues. Couramment représenté dans les zones tropicales du monde : Inde, Réunion, Caraïbes, Afrique, Amérique du Sud, Méditerranée orientale, Sud de l'Europe. Le figure 4 montre ses belles racines et feuilles.



Source : *MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'ÉLEVAGE, DES FORÊTS en charge de la formation des métiers de la terre et des biotechnologies PROGRAMME « Vétiver 2011 » du MAE et SDR*

Figure 4 : Racines et feuilles du vétiver

D'une part, le vétiver s'adapte non seulement à toutes les qualités de sols profonds et sablonneux, mais aussi à forte teneur acide ou alcaline (de pH 3 à 10.5) et prospère sans peine jusqu'à 2000 mètres d'altitude. D'autre part, il pousse dans l'eau ou en zones sèches, de -10°C à 48°C. Néanmoins, il a ses faiblesses car il ne convient pas aux sols argileux et se développe faiblement à l'ombre.

Le vétiver est une plante facile, coriace et durable, il repousse après le feu et résiste habituellement à la majorité des maladies des plantes. En plus, la force ductile de ses racines est de 2 fois supérieure à celles du peuplier. C'est une plante écologique, conserve l'humidité du sol et le protège contre l'érosion.

I.2.2. Production et disponibilité

I.2.2.1. Culture

Le mode de culture du vétiver est le suivant :

- Planter les éclats pendant le début de la saison humide ou les arroser 2-3 mois pendant les autres saisons (le sol doit être bien imbibé d'eau).
- Marquer les points de plantation et repiquer les comme le riz.
- Bien enfoncer les racines vers le bas.
- La distance entre les plants doit être environ de 10 cm. Planter seulement une ligne de vétiver (en cas de mort ou de trouées les remplacer immédiatement).
- Arroser abondamment les plants immédiatement après leur mise en terre.

I.2.2.2. Multiplication

Le vétiver est facile à planter en ligne, répond bien à la fertilisation et à l'irrigation avec la production des souches pouvant être éclatées par la suite.

I.2.3. Situation mondiale et locale du Vétiver

Le vétiver est utilisé dans près de 120 pays dans le monde dont les principaux producteurs : Java, Haïti, la Réunion et Madagascar. De plus, il existe un réseau international depuis 1989 où les pays d'Afrique, d'Asie, d'Amérique latine et des ONG coordonnent leurs recherches et développement sur le vétiver, soutenus par la banque mondiale [13].

I.2.4. Utilisation

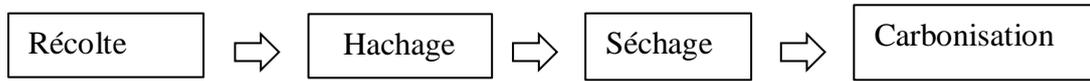
Les feuilles et les racines de vétiver fournissent des revenus car elles peuvent être utilisées pour produire des combustibles de cuisson ou des carburants industriels, des toits de chaume et des produits artisanaux, d'huiles essentielles à partir de la racine.

Il a de multiples usages et s'utilise de la racine à la feuille de la manière suivante :

- Les racines : en parfumerie, en plante médicinale et contre les insectes notamment les mites.
- Les feuilles : plusieurs cultivateurs de vétiver ont confirmé que les plantes de vétiver produisent plus de feuilles que de racines au cours de la saison de croissance [14]. En effet, la productivité moyenne en feuille du vétiver est estimée entre 15 et 30 tonnes par hectare. A cause de cette abondance on l'utilise pour les toitures de chaume, en isolant, en aliment pour les animaux, dans l'artisanat (capeline, paniers, sacs...).

Dans notre cas, nous utilisons le vétiver comme source d'énergie non seulement ses feuilles mais aussi ses racines. Etant donné que la machine fabriquée peut utiliser non seulement pour la carbonisation des feuilles et des racines de vétiver mais aussi avec divers résidus tels que rafles de maïs, balles de riz, brindille de bois, feuilles et déchets textiles des industries en zone franche...

Le processus de fabrication du charbon de vétiver est à la figure 5.



Source : auteur 2017

Figure 5 : Processus de fabrication du charbon de vétiver

- **Récolte** : elle consiste à la récolte du vétiver.
- **Hachage** : cette opération consiste à couper environ 3 cm le vétiver pour que la granulométrie soit homogène.
- **Carbonisation** : c'est de transformer les biomasses (vétiver) en charbon, gaz et goudrons, sous l'effet de la chaleur à l'abri de l'air.

I.3. Etude théorique du système

I.3.1. Système de régulation

Notre carbonisateur nécessite le contrôle et la maîtrise de certains paramètres tels que la température et la vitesse de rotation du système de malaxage. C'est cela qu'intervient le système de régulation. En effet, la connaissance développée ci-après permet de maîtriser le processus de carbonisation. C'est pourquoi on a choisi comme intitulé de l'étude : détermination des paramètres clé de carbonisation. Il s'agit en fait de réguler deux paramètres : la température et la vitesse d'homogénéisation de la charge à carboniser.

I.3.1.1. Définition

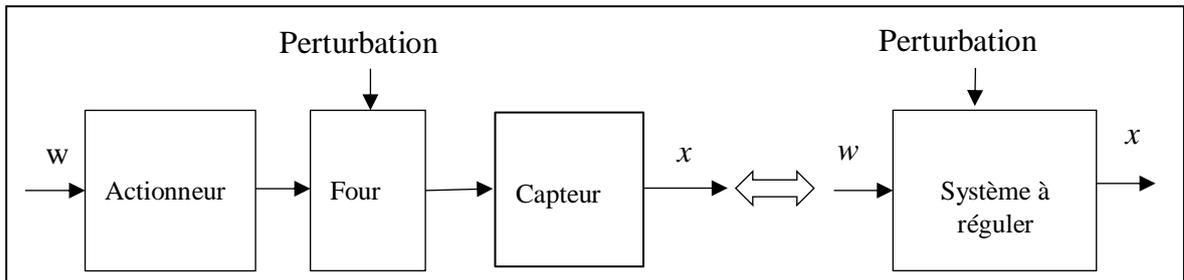
La régulation est la technique utilisée pour maintenir automatiquement une grandeur physique à la valeur désirée quelles que soient les perturbations qui peuvent subvenir.

I.3.1.2. Type de boucle de régulation

On distingue deux types de boucles de régulation : la boucle ouverte et la boucle fermée.

a. Boucle ouverte

Une boucle est dite ouverte si la valeur mesurée est indépendante à la valeur de la consigne. La figure 6 représente le schéma fonctionnel du système en boucle ouverte.



Source : Jean François BOURGEOIS, traité Génie Electrique

Où w : consigne (grandeur réglante) et x : grandeur mesurée

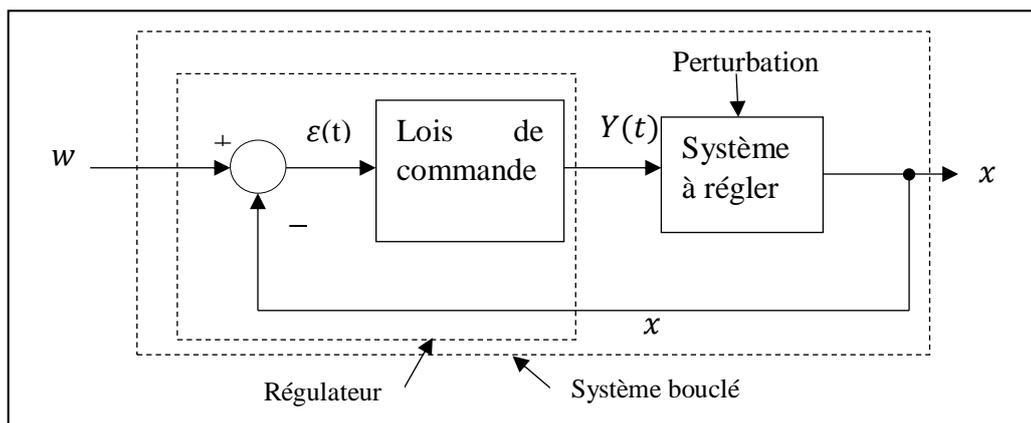
Figure 6 : Schéma fonctionnel du système en boucle ouvert

Cette boucle ouverte présente deux inconvénients majeurs ; à savoir :

- On ne sait pas à quelle valeur « x » va se stabiliser et en combien de temps ;
- « x » va varier en fonction des perturbations extérieures.

b. Boucle fermée

Une boucle est dite fermée si la valeur mesurée est surveillée et comparée à une valeur de la consigne. Dépendant du résultat de cette comparaison, l'entrée variable du système est influencée pour ajuster la valeur mesurée à la valeur de la consigne quelles que soient les perturbations. La figure 7 illustre le schéma fonctionnel du système en boucle fermée.



Source : Jean François BOURGEOIS, traité Génie Electrique

$\varepsilon(t)$: signal d'entrée du correcteur (ou signal d'erreur) ;

Figure 7 : Schéma fonctionnel du système en boucle fermé

Contrairement à la boucle ouverte, nous n'avons plus les inconvénients suscités en refermant la boucle.

1.3.1.3. Constitution des boucles de régulation

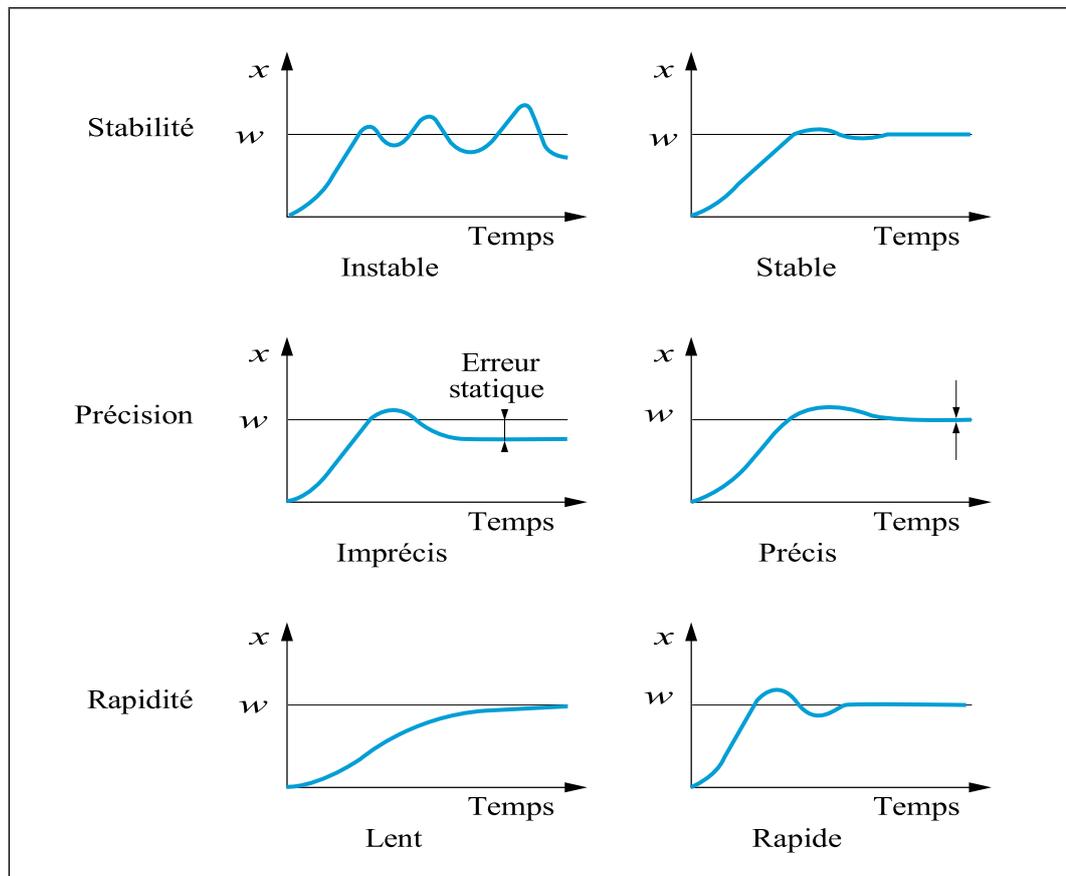
Les principaux constituants des boucles de régulation sont : un capteur, une consigne (fixe ou variable dans le temps), un comparateur délivrant un signal d'écart, une loi de commande qui calcule le signal à envoyer sur l'actionneur, un actionneur, le système physique à commander et soumis à des perturbations.

1.3.1.4. Qualités d'une bonne régulation

Les qualités exigées pour une bonne régulation sont définies par les critères suivants [15]:

- Stabilité : un système est stable, lorsque celui-ci tend à revenir à son état d'équilibre lorsqu'on lui applique une perturbation de courte durée, et ne doit pas osciller autour du point de consigne ;
- Précision : en régime établi, la grandeur régulée doit être maintenue en permanence au plus près de la consigne ;
- Rapidité : elle quantifie le temps de réponse du système. Elle correspond au temps de réaction de la sortie par rapport à la consigne.

La figure 8 nous aide à comprendre ces critères :



Source : Jean François BOURGEOIS, traité Génie Electrique

Figure 8 : Qualité d'une bonne régulation

Pour atteindre cette bonne régulation, les concepteurs ont doté les régulateurs industriels de trois effets mathématiques de calcul d'action, à savoir [16] :

- Action Proportionnelle (P)
- Action Intégrale (I)
- Action Dérivée (D)

a. Action Proportionnelle (P)

Avec l'action proportionnelle sur un procédé stable, la mesure ne rejoint pas la consigne. Dans le cas d'un changement de consigne ou d'une perturbation, il subsiste toujours un écart résiduel $\varepsilon(t) = (w - x)$. A cet effet, le rôle de l'action proportionnelle est de minimiser cet écart entre la consigne et la mesure.

Lois de Commande proportionnelle :

$$Y(t) = K \cdot \varepsilon(t) \quad (1)$$

Avec K : constante proportionnelle ;

w : consigne ;

x : mesure ;

$Y(t)$: signal de sortie du correcteur (ou signal de commande) ;

Si K augmente, le système répond plus rapidement, l'erreur de position diminue. Toutefois, l'augmentation de K entraîne des oscillations et un dépassement préjudiciable.

Si K diminue, la correction est molle tandis que les marges de stabilité augmentent.

b. Action Intégrale (I)

L'action intégrale, permet d'éliminer l'écart $\varepsilon(t)$. On dit que l'action intégrale donne la précision statique. Par conséquent, plus l'action intégrale est élevée (T_i petit), plus la réponse s'accélère et plus la stabilité se dégrade.

Loi de commande intégrale :

$$Y = K \cdot \left(\frac{1}{T_i} \int_0^t (w - x) dt \right) \quad (2)$$

Avec T_i : constante de temps d'intégration

c. Action Dérivée D

Le rôle de l'action dérivée est de compenser une partie de temps mort existant sur le procédé. L'action dérivée n'est jamais utilisée seule, car elle n'exerce qu'un complément à l'action proportionnelle.

Lois de Commande :

$$Y = K_d \cdot \frac{d(w - x)}{dt} \quad (3)$$

Avec $K_d = K \cdot t_d$

t_d : constante de temps de l'action dérivée

Remarque : les actions intégrale et dérivée ne sont jamais employées seules mais associées à l'action proportionnelle (PI, PD).

d. Action proportionnelle intégrale (PI)

Dans la pratique, l'action intégrale est associée à l'action proportionnelle, car ces deux actions sont complémentaires. La partie proportionnelle provoque une modification immédiate de la grandeur de réglage. La partie intégrale se charge de la régulation de l'écart de réglage qui subsiste.

Loi de commande :

$$Y = K \left(\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t (w - x) \cdot dt \right) \quad (4)$$

e. Action proportionnelle intégrale dérivée (PID)

Le régulateur Proportionnel-Intégral-Dérivée est la combinaison des trois actions de base P, I et D. Grâce au terme I, il permet l'annulation d'une erreur statique tout en autorisant des performances de rapidité supérieures à un régulateur PI grâce à l'action D.

Loi de commande :

$$Y = K \cdot \left((w - x) + \frac{1}{T_i} \int_0^t (w - x) \cdot dt + t_d \cdot \frac{d(w - x)}{dt} \right) \quad (5)$$

Nous avons vu qu'une bonne régulation est caractérisée par la stabilité, la précision et la rapidité du système de régulation. Entrons sans attendre à la description du système.

I.3.2. Description du système

Les techniques les plus répandues à Madagascar est encore basées sur le modèle le plus ancien, qui se caractérise par l'utilisation de la terre comme écran isolant pour éviter l'entrée de l'oxygène et des pertes de chaleur excessives [17].

Notre étude s'intéresse à la carbonisation par chauffage externe. En effet, notre système est composé de : moteur électrique, régulateur de température, variateur de vitesse, système d'étanchéité, résistances électriques, système d'enfournement et de défournement, four de carbonisation. Le tableau 1 illustre les composants du système ainsi que le principe de fonctionnement de chacun de ses composants.

Tableau 1: Composition du système

Appareils	Définition et rôle	Principe de fonctionnement	Principale composantes
Le moteur électrique	C'est un dispositif électromécanique basé sur l'électromagnétisme permettant à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique.	Dans notre étude le moteur fonctionne sur le principe de l'électromagnétisme. Dans un moteur électrique, l'amplitude de la force varie de façon directement proportionnelle à l'intensité du champ magnétique et à l'intensité du courant parcourant le conducteur. Le rotor d'un moteur électrique est placé dans le champ magnétique engendré par le stator. Le champ magnétique induit un courant à l'intérieur du rotor et la force résultante créée par les champs magnétiques dans le stator et le rotor (et donc le couple) entraîne la rotation.	Le stator (partie fixe) le rotor (partie tournante)
le régulateur de température	Cet équipement électrotechnique permet de maintenir une consigne c'est à dire d'avoir une température évoluant uniquement entre les consignes prédéterminés dans un volume donné.	A chaque fois qu'une température doit se maintenir à un certain niveau, le régulateur de température y intervient. Il compare la température réelle à la température de régulation désirée, ou la consigne, et fournit une sortie à un élément de commande.	Thermostat Capteur
le variateur de vitesse	Cet équipement électrotechnique alimentant un moteur électrique de façon à pouvoir faire varier sa vitesse de manière continue, de l'arrêter jusqu'à sa vitesse nominale.	Le redresseur va permettre d'obtenir un courant quasi continu. A partir de ce courant continu, l'onduleur va permettre de créer de tension alternatives dont on pourra faire varier la valeur efficace et la fréquence. Le fait de conserver le rapport de la valeur efficace du fondamental de la tension par la fréquence constante permet de maintenir un flux tournant constant dans la machine et donc de maintenir constante la fonction reliant la valeur du couple en fonction de la vitesse synchrone des champs magnétique et de la vitesse asynchrone du rotor.	Un redresseur Un onduleur

Appareils	Définition et rôle	Principe de fonctionnement	Principale composantes
le système d'étanchéité	C'est l'élément qui permet de contenir la charge à carboniser uniquement dans la cuve de carbonisation. Cette dernière bien que chauffée par une série de résistance électrique est protégée du vent par un bâti contenant de la laine de roche		Presse étoupe et laine de roche
la résistance électrique	C'est un l'équipement qui fournit la quantité de chaleur désirée à la charge à carboniser.	La chaleur engendrée par les résistances va sécher la charge et élever la température jusqu'à l'amorçage de la pyrolyse qui, ensuite, se poursuivra d'elle-même.	
le système d'enfournement	C'est un équipement qui nous permette d'introduire la matière à carboniser dans la chambre de carbonisation.	Le système d'enfournement sert à introduire la biomasse à carboniser à l'intérieur du carbonisateur.	Couvercle et four
système de défournement	C'est un équipement employé pour enlever la matière à carboniser dans la chambre de carbonisation.	Le système défournement sert à vider le contenu à l'intérieur du four de carbonisation.	Levier de basculement
four de carbonisation	C'est un équipement employé avec succès pour carboniser des matières premières.	Dans le four de carbonisation la chaleur dégagée par la pyrolyse permet de produire du charbon de haute qualité avec un rendement élevé. Sa construction est spécialement étudiée pour rendre homogène la variation de la température dans le temps et dans l'enceinte à carboniser tout en consommant le moins d'énergie.	

Source : auteurs 2017

I.3.3. Principe de fonctionnement du système

La mise en marche du système consiste en son chauffage, au moyen d'une résistance électrique commandé par un régulateur de température. Une sonde soudée à l'extérieure de la cuve de carbonisation va ensuite transmettre au régulateur la température à l'intérieure de la chambre ; si la température voulue est atteinte, le régulateur coupe l'alimentation. A partir de 200°C, un variateur de vitesse doit commander l'actionnaire pour alimenter le malaxeur pour éviter qu'une partie seulement soit bien carbonisée.

I.3.4. Choix de système d'étanchéité

I.3.4.1. Acier inoxydable

L'acier est nécessaire à la construction du four de carbonisation pour qu'elle se fasse dans une température très élevée (400 à 600 degrés Celsius), pour cela il nous faut de choisir l'acier inoxydable.

a. Définition

L'acier inoxydable désigne toutes les sortes d'acier qui ont été fondus selon un processus particulier, qui disposent d'un degré de pureté élevé et qui réagissent régulièrement aux traitements thermiques prévus [19].

b. Type des aciers

Il existe quatre grandes familles d'aciers inoxydables, qui sont : aciers inoxydables ferritiques, martensitiques, austénitiques et austéno-ferritiques (aciers duplex) [20]. Le détail des caractéristiques et les domaines d'utilisation de chaque types d'acier est présenté dans l'annexe 1.

c. Quelles sont les caractéristiques guidant le choix d'un acier inoxydable ?

La caractéristique la plus commune recherchée lors de la sélection d'un acier inoxydable est sa tenue à la corrosion humide ou sèche. A part de celle-ci, il conviendrait prendre en compte les critères suivants [21] :

- Ses caractéristiques mécaniques dictées par les conditions d'emploi (davantage d'aptitude à la déformation, davantage d'aptitude au soudage ou à l'usage...).
- Le facteur sécurité d'usage est aussi primordial ;
- Les conditions en service (biens d'investissement nécessitant des décennies d'usage sans risques de dégradations, biens d'équipement avec maintenance très réduite, biens de consommation considérant une durée de vie limitée... et sans conséquences majeures en cas de dégradation...) ;
- L'état de surface ;
- L'épaisseur finale du produit et son aptitude au soudage.

A cause de tout ce qu'on a évoqué auparavant, pour construire notre cuve de carbonisation, on a choisi l'acier inoxydable austénitiques (aciers au chrome-nickel)18/8 c'est-à-dire la teneur en nickel est supérieure à 8 % alors que celui du chrome est de 18%, de 2 mm d'épaisseur, de 400 mm de diamètre et de 350 mm de hauteur.

1.3.4.2. Isolation thermique

a. Définition

Le garnissage d'un four isole thermiquement la chambre de chauffe de l'extérieur. Le but de l'installation dimensionnée est de minimiser les pertes de chaleur qui se produisent au niveau du four pour augmenter le rendement.

b. Types et caractéristiques des matériaux les plus utilisés

Il existe de multitude des matériaux isolants. Ils sont classés en trois grandes familles, à savoir [22] :

- Les isolants d'origine végétale ;
- Les isolants d'origine minérale ;
- Les isolants d'origine pétrochimie.

Nous nous intéressons aux matériaux de garnissage les plus couramment utilisés pour la construction des fours. D'où le tableau dans l'annexe 2, il évalue les grandes familles de ces matériaux de garnissage les plus utilisés ainsi que quelques caractéristiques essentielles.

c. Critères de choix des isolants

Les matériaux sont sélectionnés en fonction des critères suivants [23] :

- Propriétés thermiques : elle représente sa capacité à accumuler et restituer de la chaleur (inertie thermique).
- Propriétés techniques : elle représente sa capacité à supporter la température de traitement (réfractaires), la perméabilité à la vapeur d'eau, le comportement à l'humidité, la stabilité dans le temps (leur résistance mécanique).
- Propriétés environnementales : impact énergétique de la production, du transport, risques pour la santé, maintenance, traitement en fin de vie (recyclage).

Ainsi, nous avons choisi comme isolant thermique, la laine de roche, étant donné qu'elle possède un pouvoir isolant important. En plus, elle résiste au feu et ne contribue pas à son extension. Elle conserve toutes ses caractéristiques mécaniques (durable, inerte et stable) dans le temps. En outre, la laine de roche n'est pas propice au développement des microorganismes.

Précédemment nous avons vu le choix des équipements du côté mécanique ; maintenant nous allons aborder la partie électrique.

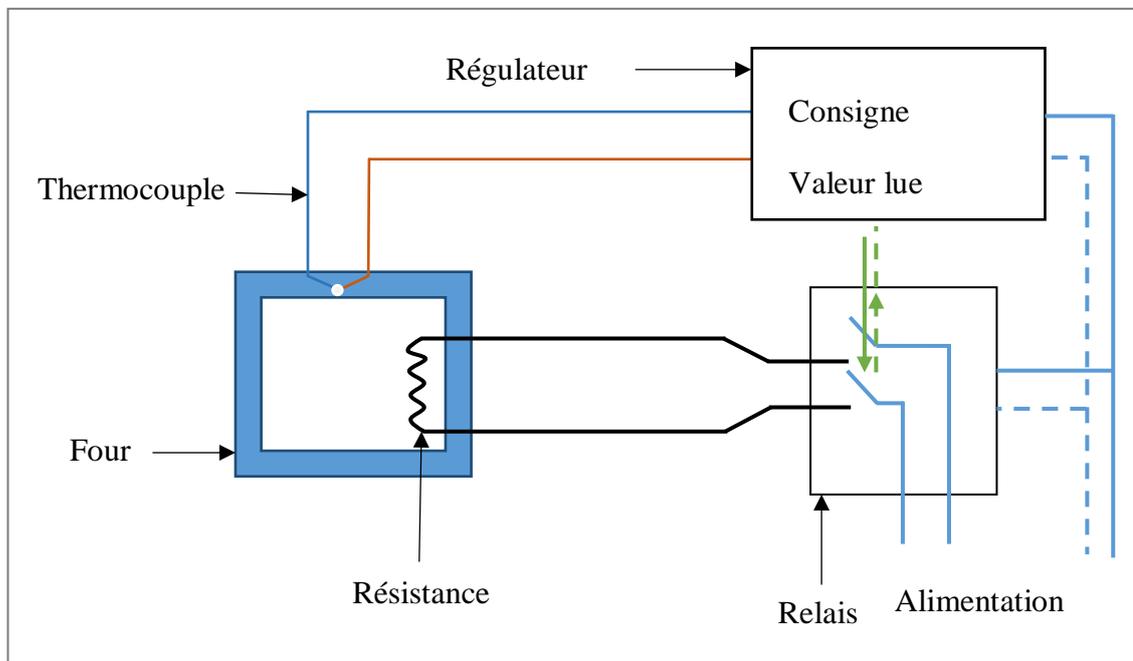
I.3.5. Choix des équipements électriques

Pour réaliser notre carbonisateur, il est nécessaire de faire le choix de chaque équipement électrique nécessaire à la réalisation du carbonisateur à lit fixe et a flux homogène.

I.3.5.1. Choix de système de régulation de la température du four

Le contrôle de température est indispensable pour conduire notre carbonisateur avec précision. Le dispositif de chauffe du four de carbonisation se compose de résistances reliées à une alimentation électrique. Le rôle du régulateur est de commander cette alimentation électrique par action sur un contacteur de puissance pour permettre au four de suivre automatiquement une allure de chauffe selon un programme établi. Il permettra le passage du courant dans les résistances pour suivre très précisément le processus de carbonisation. Pour cela ce régulateur doit surveiller la température du four par l'intermédiaire d'un capteur de température.

A cet effet, le système de régulation de la température doit comprendre les composantes suivantes : le four et ses résistances, un contacteur de puissance, une alimentation de puissance électrique (secteur 220V), un régulateur de température, un capteur de température (thermocouple). La représentation schématique du système de régulation de la température est illustrée à la figure 9.



Source : auteur 2017

Figure 9 : Représentation schématique du système de commande de la température

a. Choix des résistances électriques

Les résistances chauffantes constituent l'élément essentiel du four de carbonisation.

➤ Résistance et résistivité

La résistance dépend des dimensions du conducteur et de la nature du matériau utilisé. La valeur de la résistance R (Ω) d'un corps de chauffe de longueur l (m), de section uniforme S (m^2) et de résistivité ρ ($\Omega \cdot m$) est donnée par la relation [24] :

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (6)$$

L'inverse de la résistance $C = \frac{1}{R}$ c'est la conductance.

La résistivité varie en fonction de la température selon la formule suivante :

$$\rho T = \rho_0 (1 + \alpha T) \quad (7)$$

Avec ρT : résistivité à la température T ,

ρ_0 : résistivité à $0^\circ C$,

α : coefficient de température de la résistivité (en $^\circ C^{-1}$).

La résistivité ρ doit être élevée afin de limiter l'intensité du courant et de réduire les dimensions du corps de chauffe. Le coefficient de température α doit être faible, positif et sensiblement constant pour toutes les températures d'utilisation, afin d'atténuer les variations de courant et de faciliter le réglage de la puissance injectée.

➤ Loi de Joule

Un phénomène important dans une résistance est l'effet Joule. Une résistance parcourue par un courant reçoit un travail électrique et le transforme en transfert thermique. Ainsi, la puissance électrique $P(W)$ dissipée dans l'élément chauffant de résistance $R(\Omega)$ transformée en chaleur est exprimée par la loi de Joule :

$$P = UI = RI^2 \quad (8)$$

Avec $U(V)$: les valeurs efficaces de la tension aux bornes de la résistance ;

$I(A)$: courant électrique qui la traverse.

➤ Familles de résistances électriques

On distingue quatre grandes familles de résistances électriques qui sont utilisées dans les fours industriels [22] :

- *Les résistances métalliques à base d'alliages Ni-Cr et Fe-Cr-Al.*
- *Les métaux spéciaux.* Ils sont utilisés à très hautes températures sous vide, hydrogène et azote.
- *Les résistances non métalliques.*
- *Résistances blindées :* sa conception est sensiblement différente des précédentes. Ces résistances ne rayonnent plus librement car elle est noyée dans un isolant, l'ensemble étant contenu dans une gaine métallique étanche appelée blindage. La présence de l'isolant (généralement de la magnésie) entraîne une forte différence de température entre la résistance et la gaine, ce qui limite la température d'emploi.

➤ Critères de choix de la résistance électrique

Leur choix est établi en tenant compte sans confusion des paramètres suivants [22] :

- La température limite supérieure d'emploi des résistances ;
- La température de fusion des éléments résistifs ;
- La température de la charge et la température de l'enceinte.

A cause de tout ce qu'on a évoqué auparavant, pour chauffer notre chambre de carbonisation, nous avons choisi, trois résistances blindées $R_1 = R_2 = R_3 = 750 * 3W$. Etant donné que ces éléments sont utilisés pour le chauffage de basse température (température limite de la gaine comprise entre 600 et 700 °C) et sont particulièrement indiqués dans le cas d'atmosphères agressives susceptibles de détériorer les résistances.

*b. Choix du Contacteur*¹

Le contacteur est un appareil de connexion à commande électrique actionnée à distance et automatiquement ; et qui permet d'assurer le fonctionnement des moteurs, de résistances ou d'autres récepteurs grâce à des contacts (pôles) de puissance, [A].

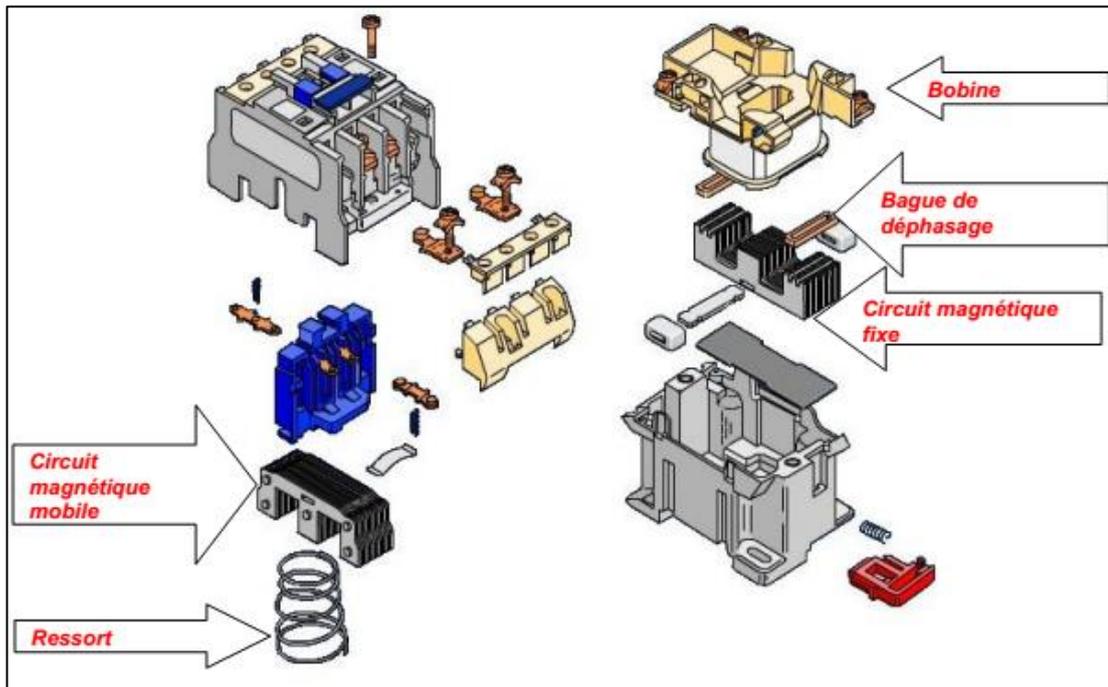
➤ Constitution d'un contacteur

Un contacteur est constitué par : une bobine, un ressort de rappel, 2 à 4 contacts de puissance ou pôles (unipolaires, bipolaires, tripolaires, tétrapolaires), un circuit magnétique constitué d'un aimant fixe et d'un aimant mobile (armature fixe et mobile),

¹ <http://gt.garnier.free.fr/techno/contacteur>

une bague de déphasage qui stabilise les vibrations des bobines alimentées en courant alternatif et des contacts auxiliaires ouverts ou fermés.

La figure 10 illustre les constituants du contacteur.



Source : <http://eleccc.free.fr/forum/index.php>

Figure 10 : Constituants du contacteur

➤ **Fonctionnement d'un contacteur**

La bobine du contacteur, peut-être alimentée en courant alternatif ou en courant continu (24V, 48V, 110V, 230V, 400 V). Lorsque la bobine est alimentée, un champ magnétique se forme, la partie mobile de l'armature est attirée contre la partie fixe et les contacts se ferment (ou s'ouvrent suivant le modèle). Lorsque la bobine n'est pas alimentée, le ressort de rappel sépare les deux parties de l'armature et maintient les contacts de puissance ouverts (ou fermés).

➤ **Principaux critères de choix d'un contacteur**

Les critères de choix suivants sont à considérer :

- La tension de commande de la bobine du contacteur ;
- La tension d'alimentation du récepteur ;
- Le nombre de contacts de puissances (1, 2, 3,4) ;
- La puissance consommée par le récepteur ;
- Le pouvoir de coupure courant maximal que le contacteur peut supporter.

➤ **Catégorie des contacteurs**

Le tableau 2 illustre la catégorie des contacteurs en courant alternatif.

Tableau 2 : Catégorie des contacteurs

Alternation en courant alternatif	Récepteur	Récepteur
	AC – 1	Four à résistances
	AC – 2	Moteur à bagues
	AC – 3	Moteur à cage
	AC – 4	Moteur à cage

Source : <http://gt.garnier.free.fr/techno/contacteur>

Ainsi, nous prendrons comme contacteur, le contacteur de puissance fabriqué par la société "Schneider Electric " (Référence : SCHLC1D09P7) illustrée à la figure 11, dont ses caractéristiques sont dans le tableau qui se suit :

Tableau 3 : Caractéristiques du contacteur

tension de commande	Nombre de pôles	Catégorie d'emploi	Tension assigné d'emploi	Courant assigné d'emploi	Pouvoir assigner de coupure
230V AC	3	AC-1/AC-3	690 v	25 A	250 A à 440V

Source : auteur 2017



Figure 11 : Contacteur

c. Choix du régulateur

Pour contrôler la température de procédé avec précision, nous avons besoin d'un régulateur. En réalité, le système de régulation de température repose sur un régulateur qui accepte un capteur de température comme entrée tel qu'un thermocouple. Il compare

la température réelle à la température de régulation désirée, ou la consigne, et fournit une sortie à un élément de commande.

On distingue trois types de régulateurs [15] :

➤ **Régulateurs purement analogiques**

Ce sont les régulateurs mécaniques, pneumatiques, électroniques à base d'amplis opérationnels. Ces techniques, encore très répandues dans l'industrie, tendent à disparaître au profit des techniques numériques.

➤ **Régulateurs numériques de type analogique : PID**

Ce sont la plupart des régulateurs de tableau. Ils fonctionnent à fréquence d'échantillonnage élevée (période de 100 à 200 ms) quel que soit le processus. Les algorithmes sont simples (essentiellement des PID) et n'utilisent pas les potentialités des algorithmes avancés de l'automatique. Leur comportement est calqué sur celui des régulateurs analogiques. Cependant, grâce aux microprocesseurs, des fonctions additionnelles (autoréglage, autoadaptatif, autocalibration, autotest, etc.) ont pu être rajoutées par rapport aux régulateurs analogiques.

➤ **Régulateurs purement numériques**

Ces régulateurs sont en général mis en œuvre sur calculateur industriel, automate ou régulateur de tableau haut de gamme. La fréquence d'échantillonnage est choisie en fonction de la bande passante du procédé continu. La capacité de calcul permet d'implémenter des algorithmes plus complexes qu'un PID. Le régulateur est évolutif. Changer de stratégie ou le traitement des mesures, revient à modifier le programme contenu en mémoire sans changer le matériel.

On a choisi comme régulateur, un régulateur numérique de type analogique, ses caractéristiques sont mentionnées au tableau 4.

Tableau 4 : Caractéristiques du thermostat

type	Précision de mesure	Plage de température	régulateur
Rex-c100	± 0.5%	0 à 400°C	PID

Source : auteur 2017



Figure 12 : Rex-c100

d. Choix du capteur

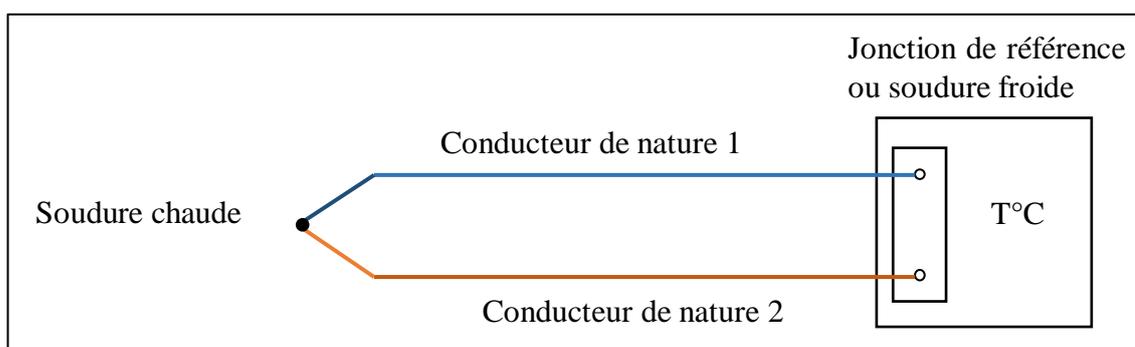
Pour commander la température du four, le capteur s'avère nécessaire. Il faut convertir ces grandeurs physiques en une autre grandeur électrique (tension, courant, charge) pour être numérisées par la suite à l'aide des convertisseurs. Cette conversion est le rôle des capteurs.

On décompose les capteurs de température en deux grandes familles [25] :

- *Les capteurs passifs*, à résistance ou thermistance ;
- *Les capteurs actifs*, à couple thermoélectrique(thermocouple).

C'est la dernière famille (thermocouple) qui est le plus souvent utilisé dans l'industrie car il permet de mesurer les hautes températures.

Un thermocouple est composé de deux fils de métaux différents soudés l'un à l'autre à une extrémité. On chauffe le point de soudure en installant là où la température doit être mesurée et on conserve à l'état froid les deux autres extrémités de fil. Il en résulte une tension électrique. Cette tension dépend de la nature de deux métaux et la différence de températures entre le point chauffé et la borne de raccord. De plus, la mesure délivrée par le thermocouple doit être linéarisée, dans le transmetteur, ou dans le régulateur.



Source : instrumentation CIRA 2006-2007

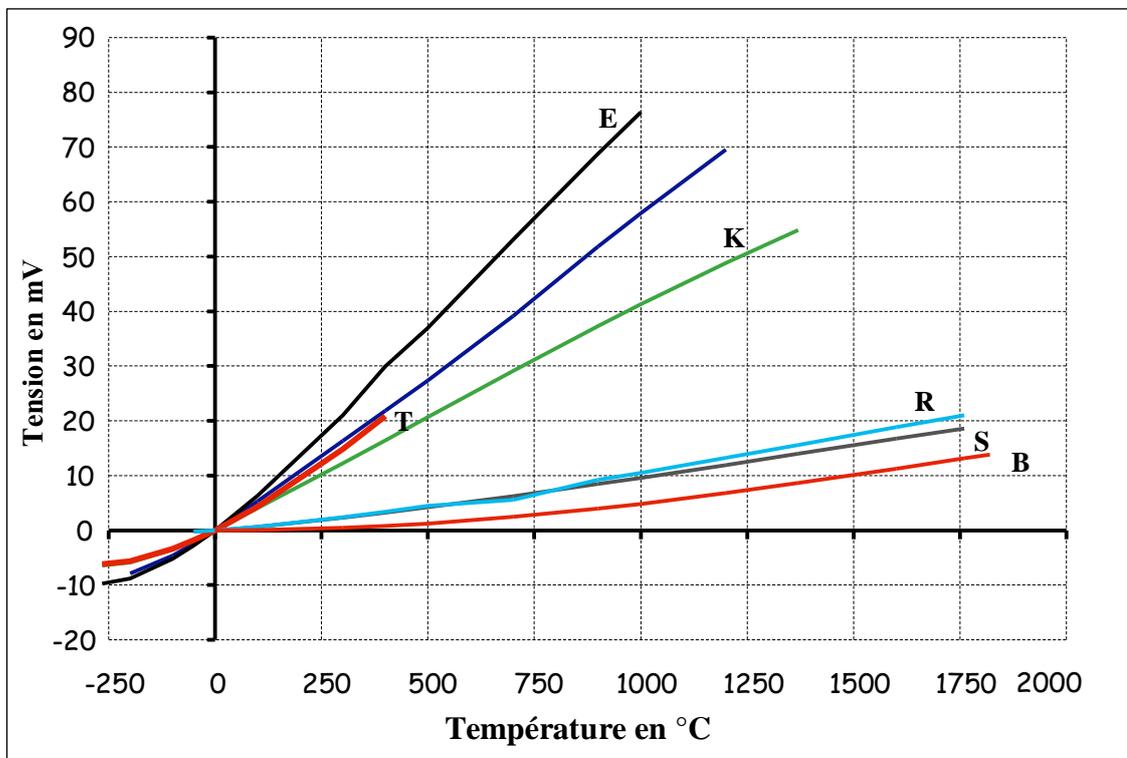
Figure 13 : Structure d'un thermocouple

A part, ces thermocouples, il en existe plusieurs types selon la gamme de température balayée par le four. Le tableau 5 donne les valeurs de ces paramètres pour quelques capteurs définis par la norme CEI 584.1.

Tableau 5 : Caractéristiques simplifiée de thermocouples

Code latéral	Couple	Usage continue usage intermittent	Précision en %	adaptation
K	Nickel -chrome Nickel - aluminium	0°C à 1100°C -180°C à 1300°C	1,5	Bien adapté aux milieux oxydants
T	Cuivre Cuivre – nickel	-185°C à 300°C -250°C à 400°C	0,5	
J	Fer Cuivre – nickel	20°C à 700°C -180°C à 750°C	1,5	Pour milieu réducteur
E	Nickel – chrome Cuivre – nickel	0°C à 800°C -40°C à 900°C	1,5	Utilisation sous vide ou milieu légèrement oxydant
R	Platine – 13% Rhodium platine	0°C à 1600°C 0°C à 1700°C	1	
S	Platine – 10% Rhodium platine	0°C à 1550°C 0°C à 1700°C	1	Résistance à l'oxydation à la corrosion

Source : instrumentation CIRA 2006-2007



Source : instrumentation CIRA 2006-2007

Figure 14 : FEM en fonction de la température de thermocouples

Si on étudie cette différente courbe montrant l'évolution de la différence de potentiel en fonction de la température, nous pouvons constater que ces variations ne sont pas linéaires. Par contre, il est nécessaire de choisir un thermocouple dont la courbe de différence de potentiel varie de manière importante par rapport à la variation de température afin d'obtenir une mesure la plus précise possible.

➤ **Choix du thermocouple**

La première chose importante à prendre en compte est de faire coïncider la plage de température à mesurer avec la plage d'utilisation optimum du thermocouple.

On choisit aussi des fils utilisables dans la zone de température attendue pour mesurer et pour présenter les caractéristiques de précision et de sensibilité convenables. On tient compte également de l'action corrosive du milieu ambiant (atmosphère oxydante, réductrice, sulfureuse, etc....) sur les constituants du couple.

Ainsi, nous avons pu tirer de la figure 15 que seule, la courbe du thermocouple de type K sur une plage de température très restreinte peut être considérée comme constante. En plus, il est bien adapté aux milieux oxydants. A cet effet, nous choisissons ce thermocouple. La figure 14 représente le thermocouple K et son câble dont l'isolation interne est du câble fibre de verre et de blindage externe isolé.



Figure 15 : Thermocouple K et son câble

1.3.5.2. Système de commande de vitesse

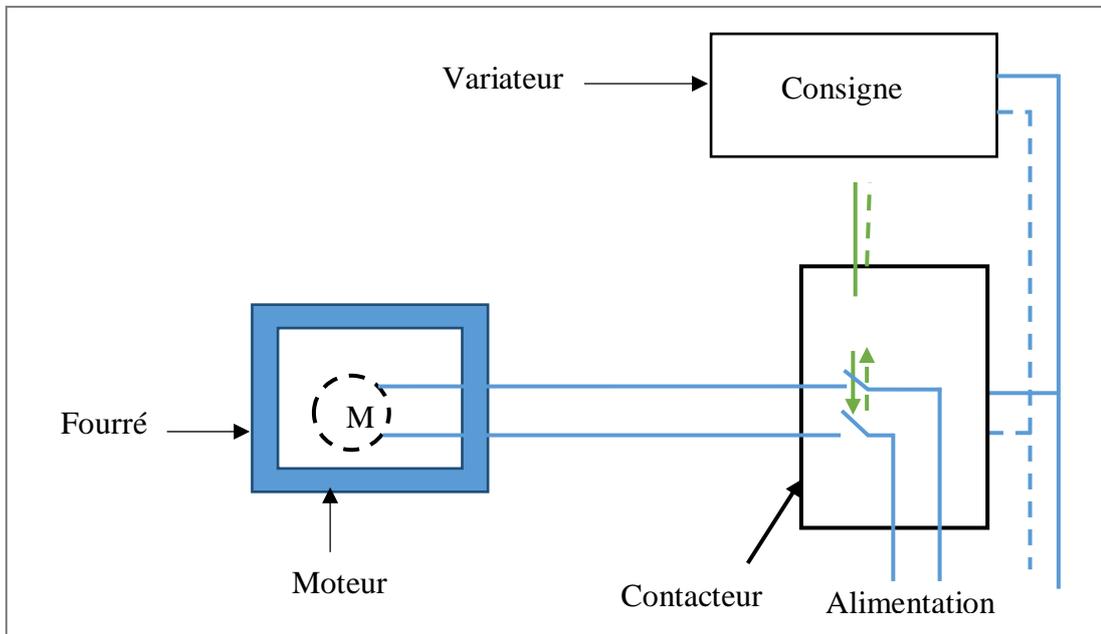
Rappelons que la température à l'intérieur du four doit être homogène pour que toute la biomasse soit bien carbonisée. Pour y arriver, on utilise un variateur de vitesse. Ce dernier modifie la fréquence du courant pour ajuster la vitesse de rotation du moteur à une valeur désirée.

Ainsi, le système de commande de vitesse doit constituer les éléments ci-après :

- Le four et le moteur électrique,

- Le contacteur de puissance ou un relais statique,
- L'alimentation de puissance électrique du four (secteur 220V),
- Un variateur de température,

Pour pouvoir mieux éclaircir, le Système de commande de vitesse, sa représentation schématique est à la figure 16.



Source : auteur 2017

Figure 16 : Représentation schématique de la commande du moteur.

a. Choix du contacteur

Nous avons vu précédemment les critères de choix du contacteur. Ainsi, nous avons choisi le contacteur moeller DIL EM 10G à 3 pôles, dont le catégorie d'emploi est de AC-1, AC-3, AC-4, le pouvoir assigner de coupure est de 115-575V, le courant assigné d'emploi est de 15A est sa tension assigné d'emploi 600V. La figure 17 montre ce contacteur.



Figure 17 : Contacteur moeller DIL EM 10 G

b. Choix de moteur

A l'heure actuelle, il existe plusieurs types de moteurs offrant plusieurs opportunités. Etant donné que chaque type de moteur possède ses caractéristiques propres qui le rendent adapté à des applications particulières, il est nécessaire de connaître le critère de choix de ces moteurs.

Afin de connaître ce choix, nous allons voir les critères suivants [18] :

- Aspects de l'alimentation électrique (réseau de distribution électrique).
- Considérations à propos des moteurs (choix de la classe de moteur).
- Exigences mécaniques de la charge à entraîner.
- Aspects physiques et environnementaux.

a.1. Aspects de l'alimentation électrique

Pour démarrer et faire fonctionner la charge du moteur adéquatement, le réseau de distribution électrique alimentant le moteur doit fournir la tension appropriée et avoir une puissance suffisante.

➤ Tension et fréquence

La tension nominale d'alimentation du réseau électrique et la tension figurant sur la plaque signalétique du moteur diffèrent souvent. Pour que les moteurs à induction triphasés fonctionnent de façon satisfaisante, les variations de tension ne doivent pas dépasser de $\pm 10\%$. En plus, le déséquilibre des tensions de phase doit être inférieur à 1% . Un déséquilibre de tension de $3,5\%$ occasionne une augmentation de température de 25% et un accroissement de courant de l'ordre de 6 à 10 fois la valeur du déséquilibre de tension.

Le déséquilibre de tension se calcule comme suit :

$$\text{Déséquilibre de } V = \frac{\text{écart maximal par rapport à la moyenne}}{\text{Tension } V_{\text{moyenne}}} \times 10 \quad (9)$$

A titre d'exemple, si des tensions de ligne ont été mesurées à 600, 585, et 609 volts, la moyenne est de 598 volts. L'écart maximal par rapport à la moyenne est de 13 volts (598-585) et le déséquilibre de tension est donc de $(13/598) \times 100 = 2,2\%$.

Remarque : on ne devrait pas faire fonctionner un moteur si le déséquilibre de phases est supérieur à 5% .

a.2. Considérations à propos des moteurs

Concernant le choix d'un moteur à induction, les moteurs à induction triphasés à cage d'écureuil d'une puissance de 1 à 200 HP sont identifiés selon leur type de construction : A, B, C ou D. Ces conceptions normalisées conviennent à des catégories particulières d'applications en fonction des charges types de chacune des catégories.

Le tableau à l'annexe 3 sert à déterminer quel type de moteur faut choisir.

a.3. Exigences mécaniques de la charge à entraîner

Pour qu'un moteur puisse entraîner une charge de façon appropriée, il faut qu'il produise un couple suffisant pour accélérer cette charge depuis l'arrêt jusqu'à la vitesse de fonctionnement, et qu'il fournisse une puissance répondant à toutes les demandes éventuelles sans dépasser ses limites théoriques.

a.4. Aspects physiques et environnementaux

Enveloppe

L'enveloppe du moteur devra être choisie pour le protéger dans les conditions d'environnement auquel il est destiné.

Isolation

Le type d'isolation utilisé dans un moteur dépend de la température à laquelle le moteur va fonctionner. Les moteurs sont spécifiés en fonction de la température ambiante et de leur classe d'isolation. La classe A est une catégorie plus ancienne qui est maintenant périmée. La classe B est la norme courante. Les classes F et H sont utilisées dans les applications où règne une température élevée.

D'après les critères suscités, il est commode de choisir la machine électrique de classe B de type Mal 80-2 son numéro de série est de 054. En effet, notre source d'alimentation est de 230V et que le moteur électrique doit tourner à une vitesse constante, à haute fiabilité, et un entretien minimal ; en plus, il demande un couple de démarrage peut élever. Les caractéristiques du moteur dûment choisit sont présentées dans le tableau 6.

Tableau 6 : Caractéristiques du moteur asynchrone du type Mal 80-2

Vitesse nominale (tr/min)	2830
Tension (V)	220
Nombre phase	3
Puissance utile (kW)	0.75
couplage	triangle
Facteur de puissance	0,8
Intensité du courant en ligne (A)	3.2
Poids (kg)	8
Température ambiante	40°C
Fréquence (Hz)	50
Ambiante (°C)	40

Source : auteur 2017

La figure 18 représente machine asynchrone à cage d'écureuil dument choisi.



Source : auteur 2017

Figure 18 : Machine asynchrone à cage d'écureuil

c. Choix du variateur de vitesse

b.1. Critère de choix du variateur de vitesse

Les principaux points habituels qui interviennent dans le dimensionnement d'un variateur de vitesse sont :

➤ **Type de moteur entraîné**

Le type de moteur entraîné est très essentiel au choix de ce régulateur. C'est pourquoi nous allons insister sur le critère de choix de moteur précédemment.

➤ **Caractéristiques du moteur**

Il s'agit non seulement de la puissance, de la tension mais aussi la vitesse de rotation du moteur. Ces trois informations permettent de choisir le calibre du variateur.

➤ **Type d'application**

En prêtant attention à l'application, il est possible de choisir la gamme de variateur.

➤ **Lieu d'installation**

Sur un toit, dans une centrale d'air ou en armoire, le variateur doit se trouver en armoire ou dans un local technique.

Compte tenu de ces principaux points habituels qui interviennent dans le dimensionnement d'un variateur de vitesse, nous avons choisi le variateur T-VERTER de type E2-2201-H1F (figure 19) ; ses caractéristiques sont mentionnées dans le tableau 7.

Tableau 7 : Caractéristiques du variateur de vitesse T-VERTER

type	Puissance maximale	Intensité maximale	Tension d'entrée	Tension de sortie	Poids en kg
E2-2201-H1F	0.75 kW	4.2 A	Mono 230 V	Tri 230 V	0.8

Source : auteur 2017



Source : auteur 2017

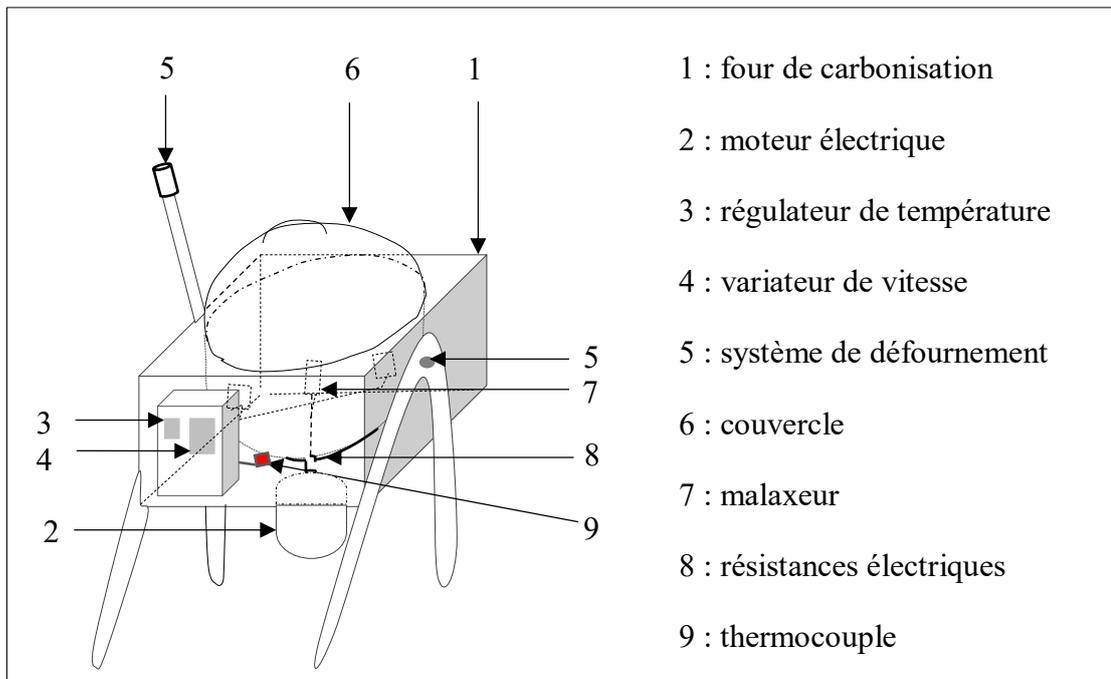
Figure 19 : Variateur de vitesse t-Verter

II. RESULTATS

II.1. Construction du four

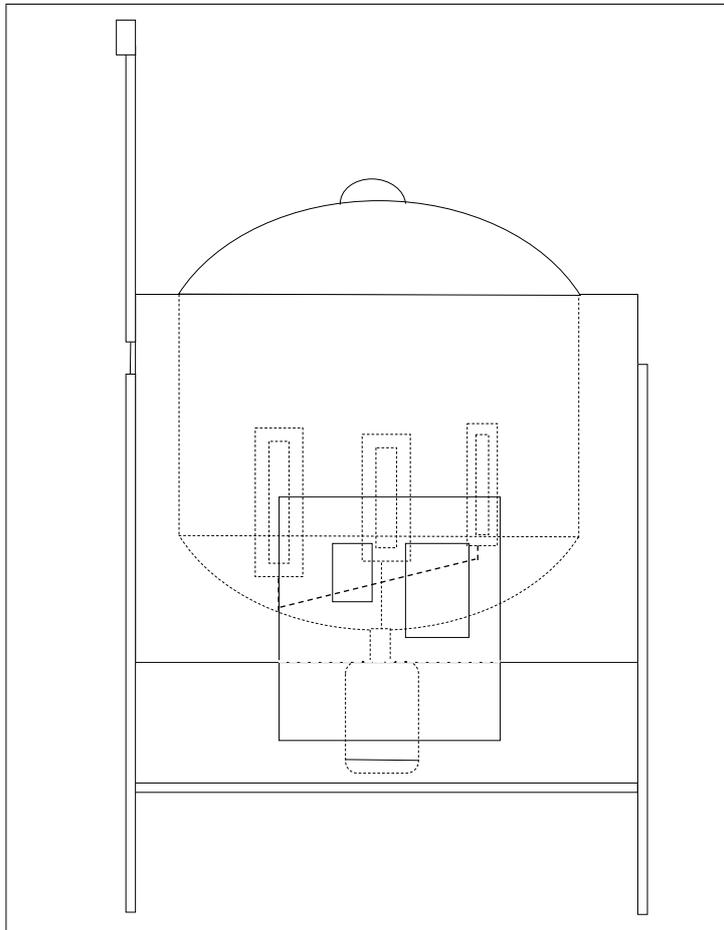
II.1.1. Partie mécanique

Pour pouvoir palper et constater l'efficacité de la technique de commande prédictive étudiée, nous proposons une possibilité de réalisation du carbonisateur à lit fixe et à flux homogène. C'est un four rectangulaire avec une carcasse métallique. L'intérieur est en acier. Rappelons que ce four comporte un régulateur de température et équipé d'un moteur électrique dont le fonctionnement est assuré par un variateur de vitesse. La carbonisation se déroule dans la chambre de carbonisation. L'énergie de traitement est fournie à la charge par l'intermédiaire de résistances chauffantes blindées en évitant tout contact direct entre la biomasse et la source thermique. Le milieu fermé permet de réaliser une carbonisation à l'abri de l'air. Le couvercle est en acier. La figure 20 et figure 21 représentent le four de carbonisation.



Source : auteur 2017

Figure 20 : Vue en perspective du four

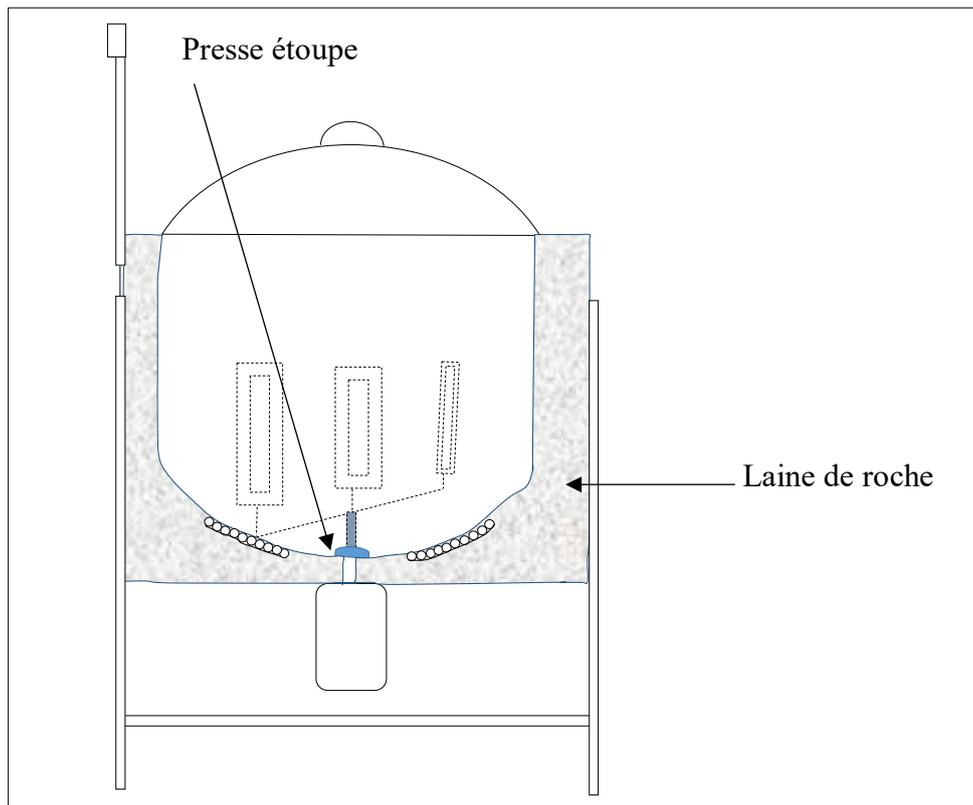


Source : auteur 2017

Figure 21 : Vue de face du four

II.1.1.1. Elaboration du système d'isolation thermique du four

Il faut prévoir un système d'isolation (laine de roche et presse étoupe) afin d'éviter tout risque de dangers (brûlure, accident par précipitation, choc, ...) et surtout pour protéger la chambre de carbonisation contre le choc de variation brusque de température (contact direct avec le milieu extérieur à température ambiante) ou oxydation par l'air afin de concentrer la chaleur à l'intérieure du four de carbonisation. La figure 22 nous montre le positionnement de la laine de roche et la presse étoupe.



Source : auteur 2017

Figure 22 : Positionnement de laine de roche et de la presse étoupe

II.1.1.2. Réalisation du four

La figure 23 montre le four avec son couvercle ainsi que son système de brassage.



Source : auteur 2017

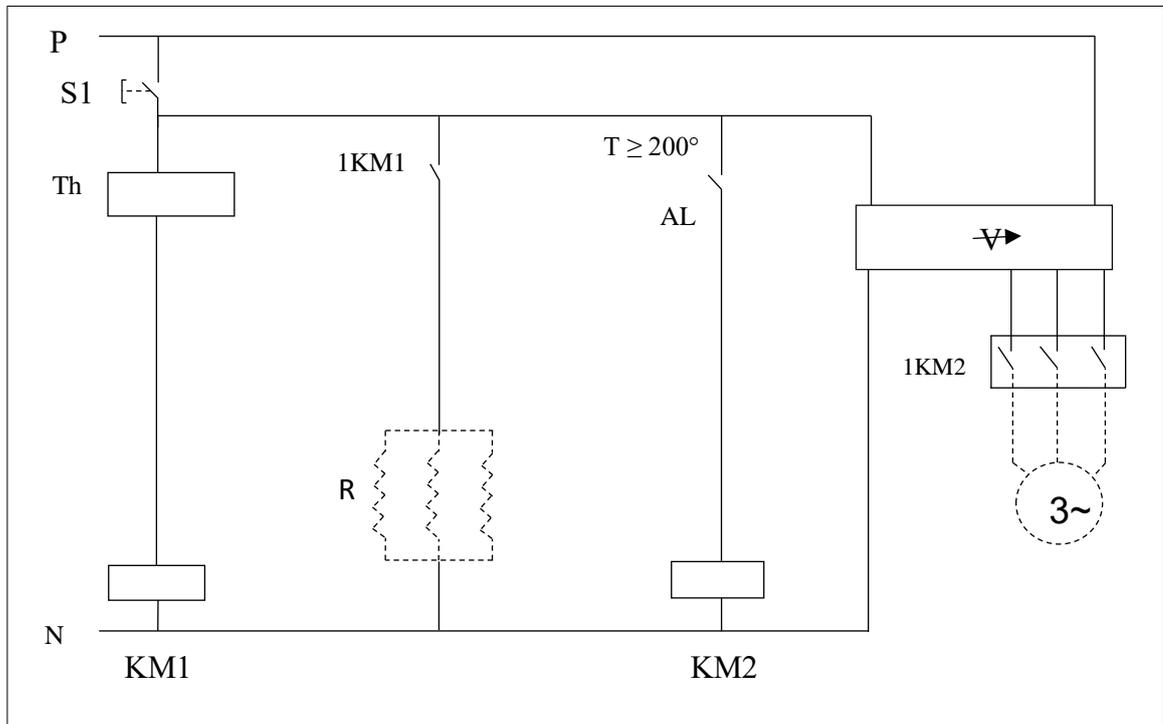
Figure 23 : Four de carbonisation

II.1.2. Montages des équipements électriques

II.1.2.1. Circuit de commande électrique

Le circuit de commande électrique a pour but d'expliquer le fonctionnement de l'équipement, de fournir les bases d'établissement des schémas de réalisation et de faciliter les essais et la réalisation.

Ainsi le schéma électrique du système est représenté à la figure 24.



Source : auteur 2017

Figure 24 : Circuit de commande

Principe de fonctionnement

Impulsion sur S1 entraîne la fermeture de KM1, fermeture de KM1 provoque la fermeture de 1KM1, ainsi alimentations des trois résistances.

Si la température $T \geq 200^{\circ}\text{C}$, l'alarme se déclenche alors KM2 se ferme et la fermeture de ce dernier entraîne la fermeture de 1KM2 ; ainsi, le variateur est alimenté ainsi le moteur tourne.

II.1.2.2. Réalisation de l'armoire de commande électrique

Nous avons groupé les différents systèmes participants à la distribution de l'installation électrique dans armoire de commande électrique. La figure 25 montre le schéma du coffret électrique où l'on implante les différents l'appareillage de commande.



Source : auteur 2017

Figure 25 : Armoire de commande électrique

II.1.2.3. Différentes vues du carbonisateur avec armoire de commande

La figure 26, figure 27, figure 28 permet de voir les vues du carbonisateur à lit fixe et à flux homogène avec armoire de commande et son moteur déjà réaliser.



Source : auteur 2017

Figure 26 : Vue de face du carbonisateur à lit fixe et à flux homogène



Source : auteur 2017

Figure 27 : Vue de gauche du carbonisateur à lit fixe et à flux homogène



Source : auteur 2017

Figure 28 : Vue de dessous du carbonisateur à lit fixe et à flux homogène

Les caractéristiques de ce « carbonisateur à lit fixe et à flux homogène » sont données dans le tableau 8.

Tableau 8 : Caractéristiques du « carbonisateur à lit fixe et à flux homogène »

PUISSANCE (W)	3×2000 + 750
BRANCHEMENT (V)	Monophasé 220
Régulation	PID
Température maximale (°C)	400
chauffage	Résistance chauffante
isolation	Laine de roche monocouche Presse étoupe
Chambre de carbonisation	Acier inoxydable 18/8
Revêtement extérieure (caisson du four)	Tôle TPN
Support (utilisé comme système défournement)	Tube 50/60

Source : auteur 2017

II.2. Charbon de biomasses

Nous avons effectué plusieurs essais au four dans but de montrer que la maîtrise de température, du système de malaxage et du système de calorifugeage jouent un rôle primordial dans la carbonisation pour obtenir de charbon à rendement élevé.

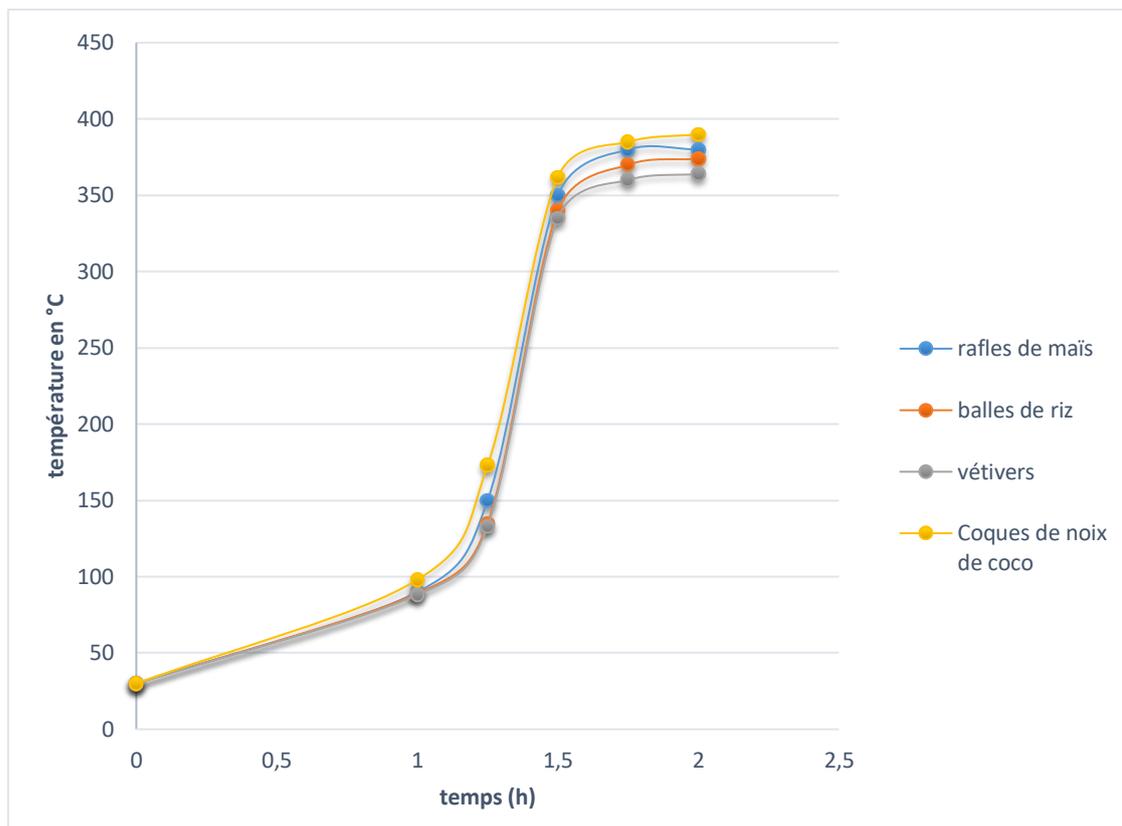
II.2.2. Evolution de la température du carbonisateur à lit fixe et à flux homogène

Carbonisation à 400°C dans notre « carbonisateur à lit fixe et à flux homogène »

Les essais se sont déroulés suivant le protocole défini ci-après :

- La température maximale est de 400°C
- La vitesse de rotation du moteur est fixée à 30 tr/min.

La figure 29 illustre le profil de la température de carbonisation des biomasses à 400°C



Source : auteur 2017

Figure 29 : Profil de la température de carbonisation des biomasses à 400°C

Premièrement, on observe une augmentation de température qui suit une pente identique pour les différentes espèces jusqu'à un peu plus de 100°C. Pendant cette augmentation, il y a un séchage des biomasses dont la durée varie entre 45min et 1h15min environ selon la nature des biomasses. L'allure générale des courbes met en évidence une première étape de montée en température correspondant à l'échauffement des biomasses et aux premières réactions endothermiques de pyrolyse.

Ensuite, on constate une élévation de température due aux réactions primaires et secondaires. Une accélération de cette augmentation marque qu'il y a des réactions exothermiques. Après 350°C, la température commence à se stabiliser. Elle est complètement stabilisée à partir de 2 heures de pyrolyse pour le premier enfournement mais qui serait beaucoup plus rapide pour la suite.

II.2.3. Rendements massiques de charbon

Pour apprécier le meilleur rendement de la carbonisation, nous avons effectué trois essais avec les mêmes conditions opératoires.

II.2.3.1. Pyrolyse à 400°C dans le « carbonisateur à lit fixe et à flux homogène »

Les résultats obtenus lors d'une carbonisation à 400°C sont présentés dans le tableau 9.

Tableau 9 : Rendement massique de la carbonisation à 400°C

Température de carbonisation (°C)	400			
	Masse matières premières avant carbonisation (M_1) [g]	Masse charbon de carbonisation (M_2) [g]	Rendement de Carbonisation (%)	Rendement massique moyenne(%)
vétiver	2000,1	782,0	39,1	39,1
	1974,6	764,1	38,7	
	1897,9	724,9	39,5	
Balles de riz	1937,7	718,8	37,1	36,9
	1955,2	727,3	37,2	
	1962,9	716,4	36,5	
Coques de noix de coco	1999,2	667,7	33,4	33,7
	1875,5	635,8	33,9	
	1976,9	668,2	33,8	
Raffles de maïs	1964,4	648,2	33,0	34,3
	1975,0	693,2	35,1	
	1836,2	637,1	34,7	

Source : auteur 2017

II.2.3.2. Pyrolyse à 500°C dans un autre four de carbonisation du CNRIT

Le tableau 10 nous montre le rendement massique de la carbonisation au four du CNRIT.

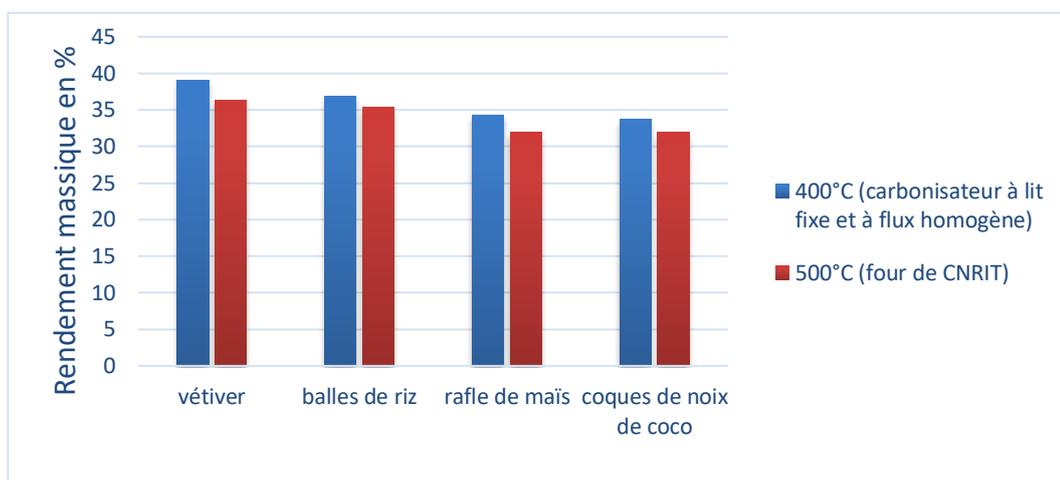
Tableau 10 : Rendement massique de la carbonisation à 500°C

Température de carbonisation (°C)	500			
	Masse matières premières avant carbonisation (M_1) [g]	Masse charbon de carbonisation (M_2) [g]	Rendement de Carbonisation (%)	Rendement massique moyenne(%)
vétiver	457,1	167,7	36,7	36,3
	512,3	183,9	35,9	
	398,4	145,4	36,5	
Balles de riz	442,9	157,2	35,5	35,4
	470,1	164,5	35,0	
	390,2	139,6	35,8	
Coques de noix de coco	755,4	244,7	32,4	31,9
	771,4	246,1	31,9	
	668,0	210	31,5	
Raffles de maïs	573,5	187,1	32,6	31,9
	559,7	179,5	32,1	
	498,3	153,9	30,9	

Source : auteur 2017

II.2.3.3. Evolution du rendement massique du charbon en fonction de température

Nous avons comparé le rendement massique du charbon issu du carbonisateur à lit fixe et à flux homogène avec celui du CNRIT. La figure 30 nous montre l'évolution du rendement de biomasses en fonction de température de consigne.

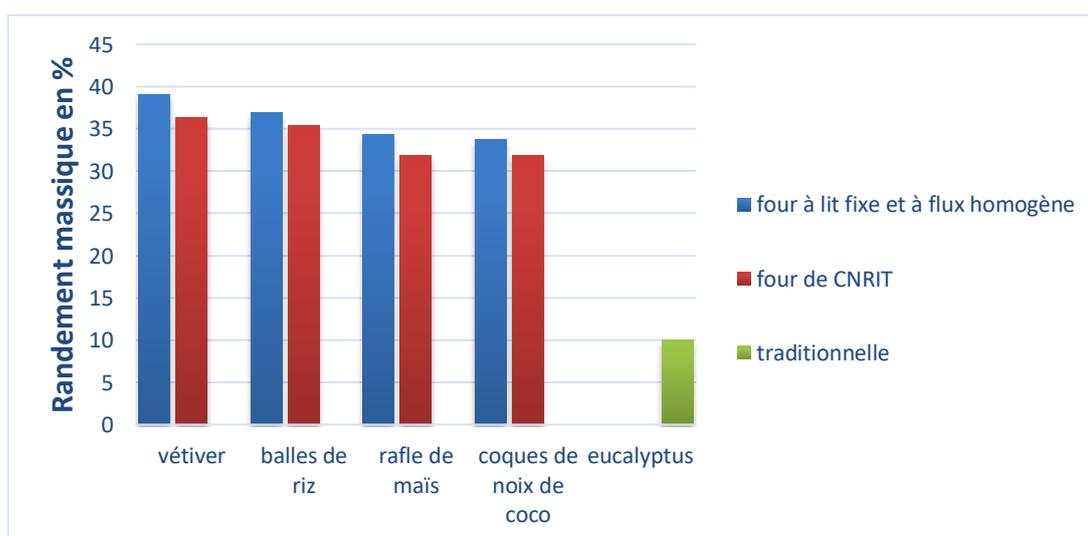


Source : auteur 2017

Figure 30 : Evolution du rendement massique du charbon en fonction de température.

II.2.3.4. Pyrolyse suivant la méthode de carbonisation traditionnelle Malgache

Suivant la méthode traditionnelle, l'eucalyptus est principale bois utilisé à la production du charbon à Madagascar, le rendement massique du charbon fabriqué dans des fosses est environ 10% [B]. La figure 31 compare le rendement massique du charbon issu du four traditionnel malgache et du four de CNRIT par rapport au rendement massique du charbon issu du four à lit fixe et à flux homogène.



Source : auteur 2017

Figure 31 : Comparaison de rendements massiques du charbon

II.2.4. Détermination des taux d'humidité, de cendres, de matières volatiles et de carbone fixe de charbons.

La détermination de ses critères chimiques est important car ils définissent la qualité du charbon obtenu. En effet, plus le taux de carbone fixe est élevé, plus la qualité du charbon est meilleur.

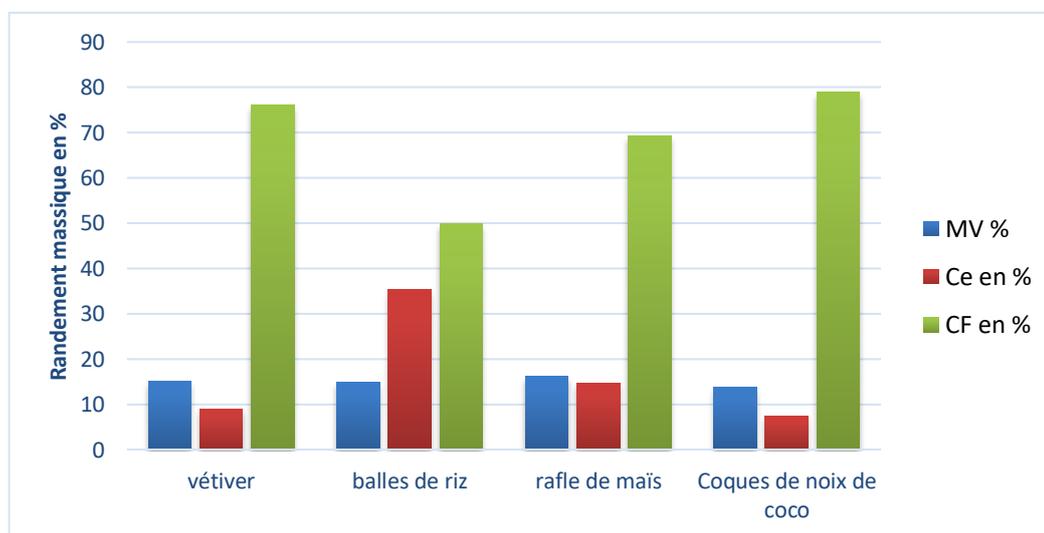
Les procédures suivies pour la caractérisation de ces charbons sont montrées en Annexe II. Elles ont été élaborées et proposées par le CNRIT comme normes à Madagascar étant donné que les matériels souvent disponibles dans les laboratoires de la plupart des pays en voie de développement ne permettent pas de se conformer aux normes Européennes ou Mondiales. Le tableau 11 illustre les caractères chimiques des charbons.

Tableau 11 : Caractéristiques chimiques des charbons

Echantillon de charbon	MV% (400°C)	Ce en % (400°C)	Cfen % (400°C)
vétiver	15,1	8,9	76
Balles de riz	14,9	35,3	49,8
Raffles de maïs	16,1	14,7	69,2
Coques de noix de coco	13,7	7,4	78,9

Source : auteur 2017

Ainsi, la figure 32 montre le diagramme de la caractérisation des charbons carboniser.



Source : auteur 2017

Figure 32 : Caractéristiques des charbons carbonisés

III. DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

III.1. Interprétation et discussion du résultat

Dans notre carbonisateur, nous avons fixé la vitesse de rotation du moteur à 30 tr/min. En effet, si cette vitesse est inférieure à 30tr/min ou supérieure à 30tr/min, les biomasses ne sont pas carbonisées en même temps.

D'après le profil de la température de carbonisation des biomasses à 400°C (Figure 29), nous avons remarqué que la température maximale ne dépasse pas la température de consigne. On peut en déduire que dans le four « à lit fixe et à flux homogène », il y a présence de pyrolyse. C'est-à-dire en absence d'air ou d'oxygène sinon la combustion peut élever la température au-dessus de la température de consigne.

En comparant notre résultat mentionné dans le Tableau 9 par rapport aux autres études, plus particulier aux essais à 500°C par un autre four de CNRIT (dont le résultat est mentionné au tableau 10), le rendement massique du charbon des biomasses à 400°C sont assez élevé par rapport à celle de 500°C. En effet, le rendement massique du charbon issu de vétiver est de 36,3% à 500°C et augmente jusqu'à 39,1% à 400°C. Pour les rafles de maïs, le rendement massique est de 31,9 % à 500°C et 34,3% à 400°C. En outre, le rendement massique du charbon de vétiver est très supérieur par rapport aux autres biomasses. Entre autre, il y a un très grand écart en terme de rendement massique entre les charbons fabriqués dans des fosses de la méthode traditionnelle et de celui de notre four. Notons que le rendement massique du charbon dans des fosses de la méthode traditionnelle tourne autour de 10%. C'est-à-dire qu'il faut détruire au moins 10kg de bois pour produire 1kg de charbon de bois ; alors que celui du carbonisateur à lit fixe et à flux homogène, il est compris entre 33% et 39,5%, particulièrement au vétiver (39,5%). La principale raison de ce dernier est la maîtrise de la température, la maîtrise de vitesse de rotation pour le brassage de charge à carboniser et du système de calorifugeage.

En terme de pourcentage de carbone fixe, pour la balle de riz, et des rafles de maïs, il est assez faible respectivement 49,7 % et 69,2 %, on peut expliquer ce fait par l'abondance de cendres. Par contre, ce taux est élevé (76%) pour le vétiver. Ainsi, le vétiver nous offre du charbon non seulement un rendement massique élevé mais surtout à haute qualité.

III.2. Analyse SWOT

III.2.1. Avantages du four de carbonisation

Les avantages de détermination des paramètres clés à la bonne carbonisation résident essentiellement dans ses potentialités à fournir des rendements significativement plus élevés respectivement plus de 33% pour l'utilisation du four « à lit fixe et à flux homogène » et par rapport à 10% pour la technique traditionnelle.

III.2.1.1. Avantages techniques

D'une part, grâce à l'armoire de commande électrique, la manipulation des paramètres de fonctionnement du système est facile à maîtriser. En effet, le système de régulation disponible assure une très grande précision de température. La répartition judicieuse des chaleurs dans le four est assurée par le malaxeur dont sa vitesse de rotation est assurée par le variateur de vitesse. A cet effet, nous obtiendrons une excellente homogénéité de température. D'autre part, grâce au système de calorifugeage, le mode de transmission de chaleur est facile à adapter aux exigences du procédé thermique demandé par la carbonisation. Les performances thermiques atteintes favorisent l'élaboration de produits à qualité élevée.

III.2.1.2. Avantages écologiques

Du vétiver à la place du bois, la pratique de cette nouvelle technologie a des impacts positifs sur l'environnement. En effet, elle contribue considérablement à la réduction de la déforestation mais aussi à la protection des ressources naturelles. Entre autre, cette déforestation évitée représente une séquestration de carbone additionnelle.

En outre, Madagascar est classé comme pays le plus érodé du monde. En effet, la quantité de terre perdue par an est de 400 tonnes par hectare [C]. Pourtant, avec le vétiver (notre matière première), on peut améliorer la structure du sol (évite l'érosion, diminue la sédimentation et le ruissellement). Le vétiver remonte les éléments minéraux et l'eau en surface. C'est-à-dire il contribue à la restauration de cycle des eaux, à l'assainissement et à la fertilisation du sol. D'où son intérêt en agriculture.

Le charbon végétal issu de cette nouvelle technologie réduit les émissions de CH₄ dues à la production traditionnelle de charbon de bois. L'estimation des réductions d'émissions est basée sur les hypothèses suivantes :

- Chaque tonne de charbon de bois évitée correspond à une déforestation évitée de 5,5 tonnes de bois sec. Ce chiffre conservateur a été choisi par les Fonds Carbone de la Banque Mondiale ;
- Chaque tonne de charbon de bois évitée permet d'éviter une émission de CH₄ équivalente à 3,5t CO₂. Cette valeur est une moyenne entre les émissions issues des techniques de carbonisation traditionnelles.

Ainsi, en adoptant cette technologie, pas seulement la superficie forestière non dégradée sera conservée mais surtout on protège l'environnement.

La technologie utilisée pour ce projet, particulièrement innovante, offre une alternative pérenne à l'utilisation du charbon de bois.

III.2.1.3. Avantages économiques

Les avantages économiques de notre four de carbonisation sont liés aux deux premiers avantages (techniques et écologiques). Cette technologie améliore considérablement l'efficacité de la carbonisation (33-39,5%) par rapport aux méthodes traditionnelles (10%). Grâce au circuit de commande affiché dans l'armoire de commande électrique, la maintenance du four est facile à maîtriser. De plus, la maintenance requise par ce four qui est très sommaire, d'où le taux d'engagement élevé de l'outil de production, améliore la productivité. En outre, le fonctionnement automatique du four réduit les frais de main-d'œuvre.

Aussi, l'utilisation du charbon végétal réduit les dépenses allouées par chaque ménage en bois de chauffe ou en charbon de bois.

III.2.1.4. Avantage social

L'automatisation dispense les opérateurs des tâches fastidieuses, harassantes ou potentiellement dangereuses pour la santé.

III.2.2. Inconvénients du four carbonisation

III.2.2.1. Sur le plan technique

Le four de carbonisation présente cependant quelques inconvénients d'ordre technique par rapport à la méthode traditionnelle. Ceux-ci se rapportent notamment à sa mauvaise manipulation. Prenons comme exemple, le four exige une tension d'alimentation de monophasé de 220V, si nous le branchons sur une alimentation de triphasé, cela provoque le dysfonctionnement des équipements voire même des explosions. Ainsi il faut le manipuler avec de la prudence.

III.2.2.2. Sur le plan social

L'automatisation réduit le nombre des mains d'œuvres salariés vue le taux de chômage dans le pays en voie de développement comme Madagascar est très important.

III.2.3. Opportunités s'offrant au four de carbonisation

En dépit des inconvénients énumérés précédemment, des opportunités intéressantes s'offrent au four de carbonisation améliorée et lui génèrent des perspectives d'évolution. Le four de carbonisation répond bien aux attentes de l'Etat malgache qui visent notamment à surmonter les problèmes de ravitaillement en énergie domestique à prix abordable et à réduire la déforestation. Il apporte non seulement des incitations à la protection de l'environnement mais aussi à l'amélioration du niveau de vie de la population. Il est également à préciser que la production du charbon de bois génère des revenus non négligeables pour de nombreux paysans bien qu'il s'agit d'une activité secondaire. Par ailleurs, compte tenu de la hausse des prix des énergies alternatives (comme le gaz) et du pouvoir d'achat des malgaches, la population urbaine ne pourra pas échapper à l'utilisation du charbon de bois pour satisfaire les besoins en énergie domestique.

Tous ces éléments suscitent l'intérêt de soutenir et de renforcer l'utilisation de ce four « à lit fixe et à flux homogène » pour produire du charbon car c'est une activité très productive qui permet de mieux valoriser les ressources forestières.

III.2.4. Menaces pour la technique de carbonisation améliorée

Néanmoins, plusieurs facteurs risquent de contrarier l'efficacité de cette nouvelle technologie de production de charbon et de limiter son adoption. Premièrement, l'adoption de cette technique est concurrencée fortement par ceux qui utilisent la méthode de carbonisation traditionnelle qui est encore très nombreux. L'utilisation de charbon végétal nécessite une campagne de sensibilisation des populations malgache. En outre, l'adoption de cette nouvelle technologie risque de mettre en péril la principale source de revenu des acteurs² qui dépendent des bois d'énergies. Plus particulièrement pour les ménages producteurs, l'adoption de la nouvelle technologie affecte leur niveau de vie alors qu'ils dépendent fortement à l'exploitation de la forêt pour survivre. Cependant, les pratiques destructives de l'environnement sont principalement liées à l'état pauvreté [26]. Ces faits accentuent la dégradation de la forêt s'il n'y a pas des mesures entreprises.

² Les acteurs de la filière bois énergies sont : les producteurs, les collecteurs/ et les sous collecteurs etc...

CONCLUSION

Face à une ressource énergétique fossile trop chère, la population malgache utilise des ressources provenant du bois pour satisfaire leur besoin en énergie domestique. Ce fait entraîne des graves problèmes environnementaux. Pour y remédier, le Centre National de Recherche Industriel et Technologique a construit un appareil de production du charbon économique. Cependant, la manière de maîtriser les paramètres de fonctionnement du carbonisateur tels que la température, la vitesse de malaxage de la charge à carbonisé et l'étanchéité de cet appareil est une tâche primordiale.

Cette étude nous a permis de déduire que l'armoire de commande permet une gestion automatisée de l'installation, elle est comme le cerveau de ce carbonisateur, où tout commande de cet appareil commence. Elle assure le bon fonctionnement du carbonisateur. En effet, les différents systèmes de commande et les différents systèmes participants à la distribution d'installation électrique sont y groupés. Ainsi, la première hypothèse liée au regroupement des différents systèmes participants à la distribution d'une installation électrique est vérifiée.

Cette étude nous a permis aussi de montrer que le système de calorifugeage est l'un des paramètres clés à la bonne carbonisation. En effet, la réussite d'une carbonisation est en fonction de la température qui est le paramètre le plus déterminant. A part du système de calorifugeage et la température, la vitesse de malaxage de la charge à carbonisé est aussi l'un des paramètres important pour l'obtention de charbon à meilleur rendement. Une vitesse de malaxage élevée ou faible a conduit à la mauvaise carbonisation. En outre, nous avons pu dégagé que le charbon du vétiver offre une meilleure opportunité pour préserver l'environnement et réduire le phénomène de déforestation. Son rendement massique tourne autour de 38 et 39% avec un taux de carbone fixe environ 76%. Ainsi, la seconde hypothèse relative sur les conditions de réussite du processus de carbonisation et le charbon issu du vétiver est un moyen de réduire la déforestation est confirmé.

Ce système de régulation, nous espérons, apportera une solution pour améliorer les produits malgaches en terme de production du charbon. Ce dernier n'est pas seulement un moyen de commander des processus mais aussi un moyen de réduire les pertes de production, d'augmenter la qualité et la quantité des produits, d'augmenter la disponibilité des unités et de diminuer les coûts marginaux de production.

A Madagascar, presque la zone rurale n'est pas électrifiée. L'utilisation de ce four est-il envisageable en ce zone ?

BIBLIOGRAPHIE

- [1] pro-natura international, « Lutter contre les changements climatiques et augmenter la productivité agricole avec le charbon vert », (2010).
- [2] BERTRAND, A., RAMAMONJISOA, B. et MONTAGNE, P. 2010. « Les Filières Péri-Urbaines d'Approvisionnement en Bois Energie des Grandes Villes de Madagascar. In ARINA, Le Charbon de Bois à Madagascar : entre demande urbaine et gestion durable. Pierre MONTAGNE, RAZAFIMAHATRATRA, S. RASAMINDISA, A. et CREHAY, R. (eds.) Antananarivo : CITE/ CIRAD/ CARAMCODEC, 2010, pp. 23 - 36.
- [3] Mémoires et rapports RANDRIAMAMPITA, T. 2004. Evaluation du cadre juridique et institutionnel de GELOSE Bois Energie : Cas du PEDM Mahajanga. Antananarivo : ESSA, Mémoire d'ingéniorat, Option : Eaux et Forêts, 2004. p. 51 + Annexes.
- [4] ECO CONSULT et PROJET GREEN-MAD. - 2007. Le reboisement villageois individuel : Stratégies, techniques et impacts de GREEN-Mad (MEM-GTZ) dans la région d'Antsiranana. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ). Madagascar. 114 page
- [5] OUVRAGE MONTAGNE, P., ANDRIATSIMISETRA, D. et RAZAFIMAHATRATRA, S. 2010. Dans la Région Boeny : du PEDM à CARAMCODEC, Dix ans d'efforts pour la mise en place d'un approvisionnement durable en bois énergie de la ville de Mahajanga. In ARINA, Le Charbon de Bois à Madagascar entre demande urbaine et gestion durable. MONTAGNE, P., RAZAFIMAHATRATRA, S., RASAMINDISA, A. et CREHAY, R. (eds.), Antananarivo : CITE/ CORUS/ FRB ; Antananarivo : CITE/ CARAMCODEC/ CIRAD, 2010, pp. 63-77.
- [6] H.B. KANE : « Etude préparatoire de l'atelier sur la valorisation du typha comme combustible domestique au Mali et en Mauritanie », Mars 2001.
- [7] E.F. IBANEZ : « Etude de la carbonisation et l'activation de précurseurs végétaux durs et mous », thèse de Doctorat ès Science, Université de Neuchâtel, Décembre 2002.
- [8] I. NIANG, P.A. DEME et A.S. NDIAYE : « Rapport de mission : politique de diversification des combustibles domestiques et de substitution au bois énergie », Direction de l'énergie au Sénégal, 7 Avril 2003.
- [9] DOMINIQUE, L. Carbonisation et fabrication du charbon de bois. Montpellier, Campus international de Baillarguet, France. (2014)
- [10] EMRICH W. (1985). Commission of the European Communities, Handbook of charcoal making: "thetraditional and industrial methods, Energy from biomass", Vol. 7, D.Reidel publishing company, 278 p.

- [11] GRØNLI M. (2009). "Industrial production of charcoal". SINTEF Energy Research, Trondheim.
- [12] FREEMAN, S. (2011). "Vetiver in Southwest Haiti". Université Columbia.
- [13] (s.d.). "Le Vétiver Pour un développement durable ". MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DE L'ÉLEVAGE, DES FORÊTS en charge de la formation des métiers de la terre, de la souveraineté alimentaire et des biotechnologies.
- [14] rapport de faisabilité de briquette de vétivers à Haiti. (2015). Briquettes de vétiver. Rapport de faisabilité, Carbon Roots International, Inc.
- [15] Source : Jean François BOURGEOIS, Automatismes et régulation des équipements thermiques, traité Génie Electrique
- [16] J.M. Dutertre Automatique Linéaire 1, 2014
- [17] FAO. (1993). "Techniques simples de carbonisation". Rome.
- [18] Carl Keyes, Guide de référence sur l'efficacité énergétique de moteurs, CEA Technologies Inc, 2007
- [19] Le Steel Construction Institute, Structures en acier inoxydable Guide de conception, Vol 3, 129P.
- [20] CHATORT. ACIERS INOXYDABLES : GENERALITES ET VITESSES DE FISSURATION, EDF1993
- [21] Fédération Française de l'acier (FFA), Mai 2013
- [22] Guy DESCHAMPS, APPLICATIONS INDUSTRIELLES DES FOURS ÉLECTRIQUES, Novembre 2010
- [23] Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (IBGE). (2010). MATERIAUX D'ISOLATION THERMIQUE. GUIDE PRATIQUE POUR LA CONSTRUCTION ET LA RENOVATION DURABLES DE PETITS BATIMENTS.
- [24] Pierre Mayé, Aide-mémoire Composants électroniques, Dunod, 5e édition, 2015
- [25] instrumentation CIRA 2006-2007
- [26] RANDRIANARIJAONA H. (2014). PAIEMENT POUR SERVICES ENVIRONNEMENTAUX (PSE) EN PHASE LA MIGRATION DANS LA ZONE PERIPHERIQUE DE L'AIRE PROTEGEE ANDOHAHELA. 113 pages+annexes. En vue de l'obtention du Diplôme d'Études Approfondies en Agro-management.

Annexe 1 : Caractéristiques et domaines d'utilisation de chaque types d'acier

➤ Aciers inoxydables ferritiques

Les aciers inoxydables ferritiques sont à leur tour répartis en deux groupes : contenant environ 11 à 13 % de chrome ; contenant environ 17 % de chrome (Cr). En raison de leur faible teneur en chrome, les aciers contenant 10,5 à 13 % de chrome sont uniquement désignés comme « inertes à la corrosion ». Ils sont utilisés pour les applications où durée de vie, sécurité et absence d'entretien sont au premier plan, et où aucune exigence spécifique n'est imposée en matière d'aspect. Cela s'applique, par exemple, à la construction de conteneurs, de wagons et de véhicules [20].

➤ Aciers inoxydables martensitiques

Les aciers inoxydables martensitiques contenant 12 à 18 % de chrome et plus de 0,1 % de carbone sont austénitiques à des températures supérieures à 950 - 1 050 °C. Un refroidissement rapide entraîne la formation d'une structure martensitique. Cette structure possède, notamment à l'état trempé et revenu, une résistance élevée, qui s'accroît encore lorsque la teneur en carbone augmente. Les aciers inoxydables martensitiques sont utilisés pour, par exemple, la fabrication de lames de rasoir, de couteaux ou de ciseaux [20].

➤ Aciers inoxydables austénitiques

Les aciers inoxydables austénitiques (également appelés : aciers au chrome-nickel) dont la teneur en nickel est supérieure à 8 % offrent le meilleur compromis en termes d'usinabilité, de résistance à la corrosion et de propriétés mécaniques en vue d'une utilisation pratique. La propriété essentielle de ces aciers inoxydables est leur résistance élevée à la corrosion et leur aptitude à la déformation et expliquent leur emploi dans des domaines très variés. De ce fait, les aciers inoxydables austénitiques sont employés dans des domaines utilisant des milieux agressifs (à la fois à basse température et à haute température), par exemple en cas de contact avec de l'eau de mer chlorurée, ainsi que dans l'industrie chimique et alimentaire [20].

➤ Les aciers inoxydables austéno-ferritiques

En raison de la présence de deux éléments structurels, les aciers austéno-ferritiques sont souvent appelés aciers duplex. Grâce à leur ductilité élevée, associée à une amélioration de la résistance à la corrosion, ces aciers sont particulièrement adaptés à une utilisation dans le secteur des technologies off-shore [20].

Annexe 2 : Tableau inventaire des matériaux de garnissage les plus utilisés

Matériaux	Composant de base	Composition	Température limite d'emploi (°C)	Masse volumique (en 10 ³ kg/m ³)	Conductivité thermique λ [W/(m. °C)]
Matériaux réfractaires lourds	Alumine tubulaire Corindon Chamotte	10 à 99 % Al ₂ O ₃ 30 à 50 % SiO ₂	1 250 à 1 800	1,5 à 3	1 à 1,5
Matériaux légers réfractaires isolant	Chamotte Alumine	30 à 45 % Al ₂ O ₃ 45 à 55 % SiO ₂	1 100 à 1 300	0,5 à 1,3	0,13 à 1,3
Matériaux légers isolants	Vermiculite Diatomées Perlites	60 à 80 % SiO ₂ 10 à 15 % Al ₂ O ₃	< 900	0,5 à 1	0,1 à 0,2
Matériaux à base de fibres silico-alumineuses	Fibres céramiques	45 % Al ₂ O ₃	1200	0,096 à 0,240	0,1 à 0,16 à 600 °C
		30 à 40 % Al ₂ O ₃ + oxyde de chrome ou de zirconium	1350	0,096 à 0,240	
		70 à 99 % Al ₂ O ₃	1600	0,096 à 0,126	0,12 à 0,13 à 600 °C
Siliceux et laine minérale	Si Al Si. Chaux Silice		300 à 900	0,3 à 0,5	
Isolations particulières	Feutre de carbone	94 à 97 %	Sous vide 1 800	0,16 à 0,90	Sous gaz : 1 500 °C : 0,15 2 000 °C : 0,16
	Feutre de graphite	> 99 %	Sous vide 2 200 à 2 500		Sous vide à 1 500 °C : 0,25 à 0,4
			Sous gaz 3 000		Sous gaz à 2 000 °C : 0,5 à 0,66

Source : technique des ingénieurs

Annexe 3 : Choix d'un moteur à induction

Type	Couple de démarrage	Couple de décrochage	Courant de démarrage	Glissement	Applications types
Types A et B : Courant de démarrage normal.	100-200 %	200-250 %	Normal	< 5 %	Ventilateurs, soufflantes, pompes et compresseurs centrifuges, etc., pour lesquels le couple de démarrage est relativement peu élevé.
Type C : Couple de démarrage élevé et courant de démarrage normal.	200- 250%	200-250 %	Normal	< 5 %	Convoyeurs, broyeurs, machines à corder, agitateurs, pompes et compresseurs à pistons, etc., pour lesquels le démarrage en charge est requis.
Type D : Couple de démarrage et glissement élevés.	275 %	275 %	Peu élevé	> 5 %	Charges de pointe élevées avec volants d'inertie comme poinçonneuses, cisailles, monte-charge, extracteurs, treuils et palans, pompes de puits de pétrole et étireuses.
Rotor bobiné	Tout couple inférieur ou égal au couple de décrochage	225-275 %	Selon le couple de démarrage.	Selon la résistance du rotor	Pour lesquelles un couple de démarrage élevé ou une régulation de vitesse limitée sont nécessaires et dans lesquelles une charge à inertie élevée doit être accélérée.

Source : Carl Keyes, *Guide de référence sur l'efficacité énergétique de MOTEURS*, CEA Technologies Inc, 2007

Annexe 4 : Rendement de production de charbon

Rendement de production de charbon

Le rendement massique est la masse de produits carbonés solides obtenus après la pyrolyse par rapport à la masse de matières premières initiales sec.

$$R_m = \frac{M_2}{M_1} * 100$$

Avec :

M_1 : masse des biomasses à l'état sec ;

M_2 : masse de charbon obtenu

Annexe 5 : Proposition de Norme : Détermination des taux d'humidité, de cendres, de matières volatiles et de carbone fixe de charbons à Madagascar.

Mode opératoire à proposer par le CNRIT au bureau des normes du ministère du commerce et de l'industrialisation malgache

1) Teneur en humidité

a) But : connaître la teneur en eau d'un échantillon de charbon de bois

b) Principe : séchage à 105°C d'une prise d'essai pendant 1h30min dans une étuve.

c) Appareillage

Etuve, dessiccateur, balance de précision, boîte à tare en céramique (qu'on fabrique et retrouve facilement au CNRIT)

d) Mode opératoire

Le charbon est broyé. Une boîte à tare en céramique est pesée (m_0) [à 1mg près] ; elle est placée dans l'étuve pendant 20min, séchée à 105°C, refroidie et repesée (m_0) [à 1mg près]. La différence entre la masse à l'entrée et sortie ne doit pas dépasser 0,1mg, sinon changer la boîte. Le charbon est ensuite introduit dans la boîte. L'ensemble est pesé avec une balance de précision [3à 10g, (m_1) [à 1mg près]. L'ensemble est placé dans l'étuve à 105°C pendant 1 h 30min. Sortir cet ensemble et le placer dans un dessiccateur, peser à 1mg près (m_2)

e) Expressions des résultats :

L'humidité exprimée en pourcentage massique est donnée par la formule :

$$H = \frac{m_2 - m_1}{m_1 - m_0} * 100$$

m_0 : masse de la boîte à vide ;

m_1 : masse de charbon +masse de la boîte avant l'entrée à l'étuve ;

m_2 : masse de charbon +masse de la boîte après la sortie de l'étuve.

2) Indice de Matières volatiles

a) But

Déterminer l'indice de matières volatiles qui est la perte de masse exprimée en pourcentage, obtenue dans des conditions normalisées, après pyrolyse du charbon chauffé

en l'absence de l'air, abstraction faite de la perte de masse due à l'évaporation de l'eau d'humidité.

b) Appareillage

Balance de précision, creuset, dessiccateur, four

c) Principe

Chauffer le charbon à l'abri de l'air à 750°C pendant 1h. La protection du charbon contre l'oxydation est réalisée de la manière suivante : le couvercle du creuset en céramique est scellé avec de l'argile

d) Mode opératoire

Peser d'abord et ensuite chauffer dans le four à 750°C pendant 15 à 30min, le creuset en céramique (m_0), le refroidir au dessiccateur puis peser à 0,1mg (m_0). La différence ne doit pas dépasser 0,1mg. Introduire 3 à 10g de charbon dans le creuset, peser à 1mg près (m_1) Recouvrir le creuset d'argile et introduire l'ensemble dans le four à 750°C, laisser séjourner pendant 1h, refroidir dans un dessiccateur puis enlever les morceaux d'argile et peser à 1mg près (m_2).

e) Expression des résultats

L'indice de matières volatiles en pourcentage en masse de charbon est :

$$MV = \left[\frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} * 100 \right] - H$$

m_0 : masse en grammes du creuset et de son couvercle ;

m_1 : masse en grammes du creuset + couvercle et du charbon avant chauffage ;

m_2 : masse en grammes du creuset + couvercle et du charbon après chauffage ;

H : taux d'humidité (en pourcentage massique) calculé précédemment.

3)Teneur en cendre

a) But

Déterminer le taux de résidu après la combustion du charbon

b) Principe

Combustion du charbon à 750°C dans un four de laboratoire. La quantité de résidu est rapportée à la masse initiale de charbon.

c) Appareillage utilisé

Boîte en céramique, dessiccateur, four.

d) Mode opératoire

Le charbon est broyé. Peser et faire entrer dans le four une boîte en céramique à 1mg (m_0) et calciner jusqu'à 750°C pendant 15 à 20min. Refroidir dans un dessiccateur et repeser à 1mg (m_0). La différence de masse à l'entrée et sortie ne doit pas dépasser 0,1mg. Peser le charbon répandu uniformément dans la boîte [3 à 10g] à 1mg près (m_1). Mettre l'ensemble dans le four et chauffer à une vitesse de 2,6°C/min jusqu'à atteindre 750°C. Laisser pendant 3h à cette température puis sortir et refroidir dans un dessiccateur. Repeser à 1mg près (m_2).

e) Expressions des résultats

La teneur en cendre exprimée en pourcentage est donnée par la formule :

$$C_e = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0}$$

m_0 : masse en grammes de la boîte ;

m_1 : masse en grammes de la boîte + le charbon avant calcination ;

m_2 : masse en grammes de la boîte et cendres après calcination ;

Remarque : la montée en température jusqu'à 750°C est dictée par la possibilité du four.

4) Taux de Carbone Fixe

Il se calcule après la détermination des données suivantes :

Humidité en % (H) ;

Indice de Matières Volatiles (MV) ;

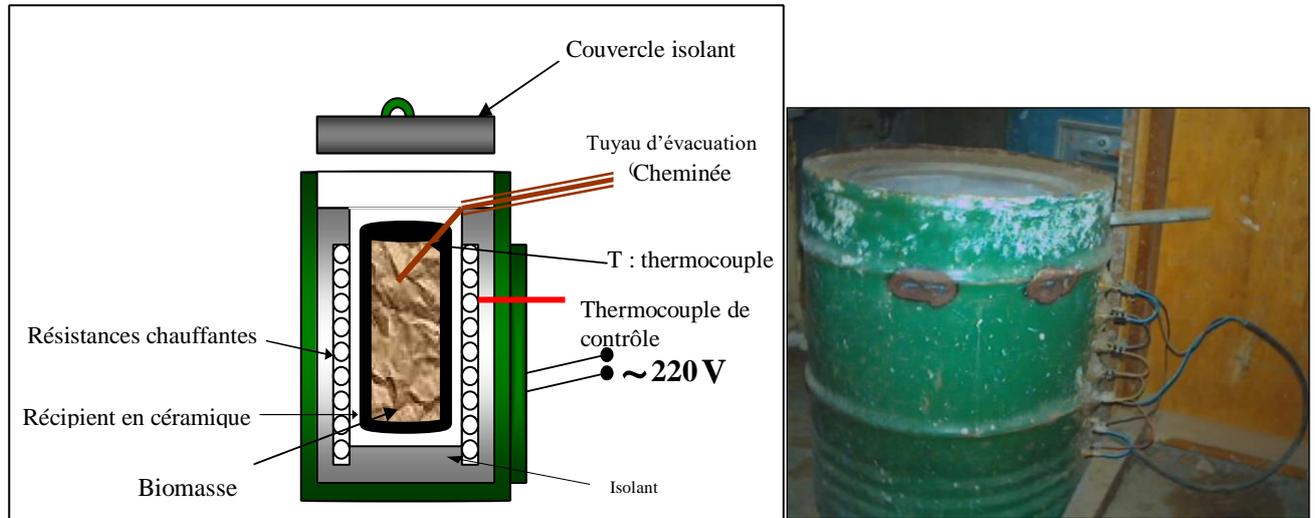
Taux de Cendres (C_e),

Le taux de Carbone Fixe (Cf) exprimé en pourcentage massique par rapport à la masse de charbon brut est donné par la formule :

$$Cf = 100 - (H + MV + C_e)$$

Annexe 6 : Description et procédure du four CNRIT à consigne 500°C

La figure nous représente le schéma de fonctionnement du four de carbonisation du CNRIT.



Profils de température à 500°C

Les essais sur le four de carbonisation du CNRIT se sont déroulés suivant le protocole défini suivant :

La vitesse de montée en température est de : 2,6°C/min ;

La Température de palier est fixée à 500°C ;

Les résultats obtenus pour l'étude de la répétabilité des expérimentations sur le four du CNRIT en pyrolyse à 500°C de température de palier, sont présentés dans le tableau 11

Appareils de laboratoire utilisés pour la caractérisation des matières premières et des charbons



Etuve (CNRIT)



balance de précision (CNRIT)

Auteur : Mr. ANDRINIAINA Noëlson Angelos Stephane

Contacts : 034 73 867 18

E-mail : andrygelos@gmail.com

Titre : Détermination des paramètres clés de carbonisation à lit fixe et à flux homogène.

Nombre de pages : 46

Nombre de figures : 32

Nombre de tableaux : 11

RESUME

Suite à la dégradation de l'environnement due à l'utilisation du bois comme énergie domestique, le Centre National de Recherche Industriel et Technologique a construit un appareil nommé « carbonisateur à lit fixe et à flux homogène » pour fabriquer du « charbon végétal » comme le charbon du vétiver. Toutefois, ce carbonisateur nécessite la maîtrise des paramètres tels que la température, la vitesse de malaxage de la charge à carboniser et le système de calorifugeage. Cette étude se propose alors de résoudre les problèmes liés à ses paramètres et de les maîtriser pour obtenir du charbon à rendement élevé. L'étude bibliographique portant sur la carbonisation, la matière à carboniser et surtout le système de régulation a été faite. Le choix des équipements a permis à la réalisation du carbonisateur avec son armoire de commande. L'étude expérimentale met en exergue que la température finale, la vitesse de chauffe et l'étanchéité du carbonisateur sont des facteurs clés de la fabrication de charbon de bonne qualité et à rendement massique élevé. La pratique de cette nouvelle technologie constitue une alternative efficace pour atténuer les problèmes environnementaux et les problèmes énergétiques.

Mot clé : carbonisation, charbon, rendement, régulation, vétiver.

ABSTRACT

Following the environmental degradation due to the use of Wood as energy domestic, the Centre National de Recherche Industriel et Technologique has built a device named " carbonisateur à lit fixe et à flux homogène" for making of " charbon végétal" as coal of vetiver. However, this "carbonisateur" requires control parameters such as the temperature, speed mixing of load carbonize and system insulation. This study proposes then to solve the problems associated with its parameters and the master for coal high performance. The study bibliographic on the carbonization, material to carbonize and especially the regulatory system has been made. The choice of equipment allowed the achievement of "carbonisateur" with its control panel. The experimental study highlights that the final temperature, the heating rate and the seal of "carbonisateur" are key factors of the manufacture of coal good quality and performance mass high. Practice of this new technology is an effective alternative to mitigate environmental issues and problems energy.

Keyword : carbonization, coal, performance, regulation, vetiver