



REPOBLIKAN'I MADAGASIKARA  
Fitiavana – Tanindrazana – Fandrosoana

-----  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

-----  
UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

-----  
INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR D'ANTSIRABE – VAKINANKARATRA

-----  
Domaine : Sciences de l'Ingénieur

Mention : Génie Civil

Parcours : Matériaux Minéraux

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur en Matériaux Minéraux

**PRODUCTION DE CHARBON COMBUSTIBLE  
ET CHARBON ACTIF À PARTIR DU BAMBOU  
: CAS DE LA VARIETE *DENDROCALAMUS*  
*ASPER* DE LA COMMUNE RURALE  
D'AMBOROBE**

**Présenté par :** Mademoiselle RAZAFIMANANTSOA Nomenjanahary Sarobidy Elodie

**Rapporteur :** Monsieur RASOANAIVO Jean Luc, Professeur

**Soutenu le :** 02 Mars 2023



REPOBLIKAN'I MADAGASIKARA  
Fitiavana – Tanindrazana – Fandrosoana

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR D'ANTSIRABE – VAKINANKARATRA

Domaine : Sciences de l'Ingénieur

Mention : Génie Civil

Parcours : Matériaux Minéraux

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur en Matériaux Minéraux

# **PRODUCTION DE CHARBON COMBUSTIBLE ET CHARBON ACTIF À PARTIR DU BAMBOU : CAS DE LA VARIETE *DENDROCALAMUS ASPER* DE LA COMMUNE RURALE D'AMBOROBE**

**Présenté par** : Mademoiselle RAZAFIMANANTSOA Nomenjanahary Sarobidy  
Elodie

**Rapporteur** : Monsieur RASOANAIVO Jean Luc, Professeur

**Président du jury** : Monsieur RANARIVELO Michel, Maître de conférences

**Examineurs** : - Monsieur RAVONINJATOVO Achille Olivier, Professeur  
- Monsieur RATSIMBAZAFY Hery Mikaela, Professeur  
- Monsieur KOERA Rasoloniaina Antoine, Docteur

**Soutenu le** : 02 Mars 2023

**Promotion** : 2022

**Année universitaire** : 2021-2022

---

## TENY FISAORANA

Ny voalohanteny dia misaotran'Andriamanitra lehibe aho nohon'ny fahasovana sy ny fitahiana ary fahasalamana nomeny ahy nandritran'ny fotoana izay nianarako sy teo am-panatontosana ity boky ity.

Haneho ny fisaorako an'ireto olona manaraka ireto ihany koa ny tenako :

- Andriamatoa **ANTSONANTENAINARIVONY Ononamandimby**, tale ankehitriny ny toeram-pampianarana ambaratonga ambony IES-AV eto Antsirabe ankehitriny nandray ahy ka nahafahako nianatra tao amin'ny oniversite tarihiny ;
- Andriamatoa **RAJAONARISON Eddie Franck** tale taloha ny toeram-pampianarana ambaratonga ambony IES-AV eto Antsirabe izay nandray ahy ka nahafahako nianatra tao amin'ny oniversite izay notarihiny taloha ;
- Andriamatoa **RANDRIAMIHAJA Samimananindrina Jean Aimé** tompon'andraikitra voalohany ankehitriny ny lalampiofanana « *Génie Civil* » eto anivon'ny oniversite IES-AV eto Antsirabe ;
- Andriamatoa **RANDRIANARIVELO Lanja** tompon'andraikitra taloha ny lalampiofanana « *Génie Civil* » eto anivon'ny oniversite IES-AV eto Antsirabe ;

Faly ihany koa ny tenako hisaotra an'ireto olona manaraka ireto:

- Andriamatoa **RANARIVELO Michel**, Maitre de conférences, izay nanaiky ho filoha mpitsara ity famelabelarana ity ;
- Andriamatoa **RASOANAIVO Jean Luc**, Profesora, "Directeur de mémoire" izao asa izao sady Lehiben'ny "Département Energétique" ao amin'ny CNRIT izay nanampy betsaka tamin'ny fahalalana sy ireo torohevitra maro, nandray an-tànana sy nanoro lalana ity asa fikarohana ity sady koa nanaiky nanolotra ny fotoanany tamin'ny fanatontosana ny rafitr'asa ary nandrindra sy nitsara ny asa koa nandritra ny fanantaterahana ny asa rehetra teo anivon'ny CNRIT na dia teo aza ny adidy sy andraikitra maro sahaniny;
- Andriamatoa **RAVONINJATOVO Achille Olivier**, Profesora sy tompon'andraikitra eo anivon'ny CNRIT izay nanaiky ny hanaovako ny "stage de mémoire" tao amin'ny CNRIT" sady nanoro lalana ity asa fikarohana ity ihany koa sy nanaiky nanolotra ny fotoanany tamin'ny fanatontosana ity asa ity na dia teo aza ny adidy sy andraikitra maro sahaniny ary mbola nanaiky ho mpanara maso ity asa ity;
- Andriamatoa **RATSIMBAZAFY Hery Mikaela**, Profesora, izay nanaiky ho anisan'ny mpanara maso ity asa ity ;

- 
- Andriamatoa **KOERA Rasoloniaina Antoine**, Dokotera, izay nanaiky ihany koa ho anisan'ny mpanara maso ity asa ity;

Tsy hay koa ny tsy hisaotra an'ireto olona manaraka ireto:

Ireo tompon'andraikitra rehetra miasa ao amin'ny IES-AV sy ireo mpampianatra rehetra izay nanome fahalalàna sy nanampy ahy nandritran'ny fotoana rehetra nianarako.

Hamaranako azy dia maneho ny fisaorana ho an'ny fianakaviko rehetra aho sy ireo namako izay nanampy ahy ary nampahery ahy.

---

## REMERCIEMENTS

Tout d'abord je tiens à remercier Dieu tout puissant pour la santé, l'amour et la bénédiction qu'il m'a offert durant mes études et pendant la préparation de ce mémoire.

J'adresse mes vifs remerciements à :

- Monsieur **ANTSONANTENAINARIVONY Ononamandimby**, le Directeur de l'Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe Vakinakaratra ;
- Monsieur **RAJAONARISON Eddie Franck**, l'ancien Directeur de l'Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe Vakinakaratra ;
- Monsieur **RANDRIAMIHAJA Samimananindrina** Jean Aimé, le nouveau chef de mention du Génie Civil de l'Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe Vakinakaratra ;
- Monsieur **RANDRIANARIVELO Lanja** l'ancien chef de mention du Génie civil de l'Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe Vakinakaratra ;

Je tiens aussi à remercier :

- Monsieur **RANARIVELO Michel**, Maître de conférences, d'avoir accepté de présider cette soutenance ;
- Monsieur **RASOANAIVO Jean Luc**, Professeur, "Directeur de mémoire", ainsi que Chef de Département Energétique du CNRIT ainsi que Directeur de mémoire de ce travail pour sa disponibilité et les connaissances qu'il m'a transmis pour l'accomplissement de ce thème de mémoire, et d'avoir suivi de près mon travail durant la réalisation effectuée au laboratoire CNRIT malgré ses différentes occupations ainsi que pour les temps qu'il a consacré aux corrections de ce travail ;
- Monsieur **RAVONINJATOVO Achille Olivier**, Professeur, responsable au sein du laboratoire CNRIT de m'avoir permis de faire mon stage de mémoire au sein du laboratoire CNRIT et je suis reconnaissante pour ses conseils durant la réalisation de cet travail malgré ses différentes tâches au sein du CNRIT et qui siège ici présent parmi les jurys en tant qu'examineur ;
- Monsieur **RATSIMBAZAFY Hery Mikaela**, Professeur, qui a accepté de faire partie des jurys en tant qu'examineur ;
- Monsieur **KOERA Rasoloniaina Antoine**, Docteur, qui a accepté aussi de faire partie des jurys en tant qu'examineur ;

---

Merci aussi pour le personnel administratif et le corps enseignant de l'Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe Vakinakaratra pour leur aide et connaissance qu'ils m'ont transmis durant ces années d'études.

Pour terminer, j'adresse mes plus profonds remerciements à ma famille, mes amis pour leur aide et encouragements.

---

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : les différentes ressources de la biomasse.....	5
Figure 2 : structure chimique du charbon actif .....	18
Figure 3 : Principaux adsorbants .....	19
Figure 4 : charbon actif en poudre .....	24
Figure 5 : charbon actif en grain .....	24
Figure 6 : Clichés de microscopie électronique à balayage de la structure d'un charbon actif .....	25
Figure 7 : Représentation schématique de la structure poreuse du charbon actif. ....	27
Figure 8 : Fonctionnalité de surface d'un carbone activé .....	28
Figure 9 : fabrication des charbons actifs.....	30
Figure 10 : représentation simplifiée de la méthodologie de recherche adoptée .....	55
Figure 11 : Localisation géographique d'Amorobe (source : mapcarta.com).....	56
Figure 12 : Méthode de transformation.....	62
Figure 13 : Evolution de la température de carbonisation en fonction tu temps.....	79
Figure 14 : évolution de la température d'activations en fonction du temps .....	84
Figure 15: Test d'adsorption noir de carbone et Charbon Actif .....	88
Figure 16 : Logo du CNRIT .....	I

---

## LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Bambou.....	34
Photo 2 : Différents chaume de bambou .....	36
Photo 3 : Turion.....	36
Photo 4: Culture du bambou.....	37
Photo 5 : Pyrolyseur électrique .....	46
Photo 6 : Flacons en verre .....	46
Photo 7 : Clef.....	47
Photo 8 : Distillateur à voie sèche .....	47
Photo 9 : Fourneau .....	48
Photo 10 : Cône d'aération.....	48
Photo 11 : Colonne de distillation munie d'un creuset .....	48
Photo 12 : Souffleur .....	49
Photo 13 : Thermomètre infrarouge .....	49
Photo 14 : Balance électronique.....	49
Photo 15 : Charbon de bois .....	50
Photo 16 : Mortier et pilon en granite .....	50
Photo 17 : Passoire .....	50
Photo 18 : Solution résidu d'un distillateur d'alcool.....	51
Photo 19 : Etuve .....	51
Photo 20 : Fours à moufle .....	52
Photo 21 : Creusets et ses couvercles correspondants .....	52
Photo 22 : Dessiccateur .....	53
Photo 23 : Balance de précision.....	53
Photo 24 : Pince à creuset et un plateau isolant .....	54
Photo 26 : Commune Rurale d'Amborobe.....	56
Photo 25 : plaque de la commune d'Amborobe situé sur la RN12, (source : Auteur).....	56
Photo 27 : Poteau en bambou de la Mairie d'Amborobe, .....	59
Photo 28 : Poutre en bambou d'un bâtiment .....	59
Photo 29 : Revêtement mural d'une maison .....	59
Photo 30 : Revêtement sol en bambou .....	60
Photo 31 : Bambou servant de support pour porter des bananes .....	60

---

Photo 32 : Clôture en bambou.....	60
Photo 33 : Support de culture.....	60
Photo 34 : Panier en bambou.....	61
Photo 35 : Extraction des matières premières .....	63
Photo 36 : Pesages des matières .....	63
Photo 37 : Découpage des matières.....	63
Photo 38 : Activation.....	65
Photo 39 : Tamisage du CA .....	66
Photo 40 : Broyage du CA .....	66
Photo 41 : Mélange en repos .....	67
Photo 42 : Mélange CA et noir de carbone en repos.....	68
Photo 43 : Séance de drop test du charbon de bambou.....	71
Photo 44 : Balance électronique.....	72
Photo 45 : Récipient gradué .....	72
Photo 46 : Multimètre .....	72
Photo 47 : Cocotte marmite N° 34 .....	73
Photo 48 : Foyer Amélioré (CNRIT).....	73
Photo 49 : Test d'ébullition d'eau .....	74
Photo 50: Charbon de bambou .....	77
Photo 51: Jus pyroligneux .....	77
Photo 52: Charbon actif brut .....	81
Photo 53 : charbon actif en grain (CAG) .....	86
Photo 54 : charbon actif en poudre (CAP) .....	86
Photo 55: Comparaison du CAP avec le CAG .....	87
Photo 56 : vue du CNRIT.....	III

---

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 : La teneur en éléments majeurs des bois sur matière sèche .....	10
Tableau 2 : Avantages et inconvénients des charbons actifs en poudre et granulé [4] .....	26
Tableau 3 : évolution de la température des carbonisations des différents essais.....	78
Tableau 4 : Résultats des différents essais de carbonisations du bambou .....	80
Tableau 5 : évolution de la température d’activations des différents essais .....	82
Tableau 6 : résultats des différents essais d’activations du bambou .....	84
Tableau 7 : Caractères physico chimiques du charbon de bambou.....	89
Tableau 8 : Détermination de la consommation en charbon de bambou en utilisant le foyer amélioré.....	90
Tableau 9 : Détermination de la puissance et de l’efficience énergétique du foyer amélioré par l’utilisation du charbon de bambou. ....	91
Tableau 10 : Comparatif du charbon de bambou avec d’autres combustibles .....	92

---

## **LISTE DES ANNEXES**

Annexe N°1 : PRESENTATION DU LIEU DU STAGE .....	IV
Annexe N°2 : METHODE DE CALCUL DE LA SURFACE SPECIFIQUE D'UN ADSORBANT.....	VII

---

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

CA : Charbon Actif

CAP : Charbon Actif en Poudre

CAG : Charbon Actif en Grain

CAT : Charbon Actif en Tissu

BML : Biomasse liquide

BMS : Biomasse Solide

PC : Pouvoir Calorifique

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur

PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur

CNRIT : Centre National de Recherches Industrielles et Technologiques

TEE : Test d’Ebullition d’Eau

CB : Charbon Bambou

CDB : Charbon De Bois

BDC : Bois De Chauffe

---

## **SOMMAIRE**

TENY FISAORANA

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

INTRODUCTION

PARTIE I : ETAT DE CONNAISSANCES

Chapitre I : LA BIOMASSE

Chapitre II : LE CHARBON ACTIF

Chapitre III : GÉNÉRALITÉS SUR LES BAMBOUS

PARTIE II : MATERIELS ET METHODES

Chapitre IV : LES MATERIELS UTILISES

Chapitre V : METHODES

Chapitre VI : ETUDES EXPERIMENTALES

PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Chapitre VII : RESULTATS

Chapitre VIII :DISCUSSIONS

Chapitre IX: IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU PROJET

CONCLUSION

REFERENCES

REFERENCES WEBOGRAPHIQUE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

TABLE DES MATIERES

ANNEXES

RESUME

---

## INTRODUCTION

Autrefois appelées l'île verte, Madagascar n'est plus recouvert que par 11,5 millions d'hectare de forêts. Le pays a perdu plus de 40% de ses forêts naturelles au cours de ses six dernières décennies. Tous les dix ans, c'est un millions d'hectares de forêts qui partent en fumées, défrichés et détruits, causant d'importants problèmes d'érosion de sols et de perte de biodiversité. Le bois énergie constitue la principale source d'énergie à Madagascar puisque 90% des ménages malgaches utilisent encore des produits forestiers ligneux comme sources d'approvisionnement de bois énergie que se soit en forme de charbon ou bois de chauffe et c'est la cause principale de la déforestation à Madagascar.

Aux fins de préserver le monde, le continent, le pays, de ces calamités dues aux problèmes liés à l'environnement, la solution a toujours été la préservation de toute ressource forestière.

C'est dans ce cadre que ce travail de recherche visant la "Production de charbon combustible et charbon actifs à partir du bambou : cas de la variété *Dendrocalamus Asper* de la commune rurale "d'Amborobe " a été initié.

L'objectif étant de fabriquer un combustible solide, potentiel, apte à concurrencer le bois énergie et efficient sur le plan énergétique et écologique à partir du bambou et aussi de produire du charbon actif.

En effet, le bambou est l'un des matériaux travaillés par les premiers hommes. Son utilisation dans l'industrie est encore faible, pourtant sa croissance rapide et sa capacité à capter le CO<sub>2</sub> en font un allié remarquable du développement durable. Dans le monde, on recense environ 2300 espèces de bambou appartenant à 75 genres. Il existe depuis des centaines d'années en Asie, en Amérique latine et dans certaines régions d'Afrique. Il pousse aujourd'hui de manière sauvage dans les zones tropicales, subtropicales, et tempérées de toutes les régions du monde, à l'exception de l'Europe et de l'Asie occidentale. Parmi les pays d'Afrique, Madagascar possède la plus grande diversité de bambous, avec 11 genres et près de 40 espèces dont 35 endémiques. Les bambous occupent une place importante dans la vie de nombreux ménages tant ruraux qu'urbains à Madagascar. Ils sont distribués essentiellement le long des massifs centraux de l'île et dans la forêt humide de l'Est.

Ainsi pour mieux cerner le sujet, ce travail a été organisé en trois parties :

- la première partie comporte l'état de connaissances, incluant les concepts fondamentaux et les principales définitions indispensables pour ce projet ;

- 
- la seconde concerne les matériels utilisés et méthodes adoptés pour concrétiser ce projet, la troisième et dernière partie a été consacrée aux résultats et discussions qui essaieront d'évoquer les perspectives du projet.

# **PARTIE I : ETAT DE CONNAISSANCES**

---

# Chapitre I : LA BIOMASSE

## I.1. Introduction [1]

Par rapport aux énergies fossiles comme le charbon, le pétrole, le gaz et l'uranium, les énergies renouvelables sont liées « en principe » à des sources inépuisables comme le soleil, le vent, la marée, l'énergie hydraulique, la géothermie, la biomasse et les déchets. Leur exploitation est accompagnée d'une émission minimale de déchets et de polluants contrairement au cas des énergies fossiles.

Les énergies renouvelables peuvent être réparties en cinq grandes familles selon l'origine de la source, à savoir : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie géothermique et la biomasse comprenant l'incinération des déchets.

En fonction de la finalité et/ou de la nature de l'énergie obtenue à partir de la source (chaleur, électricité, carburant liquide, combustible gazeux), on distingue actuellement neuf types d'énergies renouvelables, à savoir : le solaire photovoltaïque, le solaire thermique, l'hydraulique, l'éolien, la géothermie, l'énergie issue du bois, les biocarburants, le biogaz, et la valorisation énergétique des déchets.

Parmi les énergies renouvelables, c'est l'énergie issue de la biomasse qui est de loin la plus importante puisque la plus prometteuse.

## I.2. Définitions et généralités

Grâce à l'énergie solaire, à l'eau et aux éléments minéraux contenus dans le sol, les plantes absorbent le gaz carbonique et renouvellent le stock d'oxygène de notre atmosphère. Par le mécanisme de la photosynthèse, elles fabriquent des hydrates de carbone constituant principal des matières végétales [1]. Au sens large, « la biomasse » désigne l'ensemble de la matière vivante. Depuis le choc pétrolier de 1973, cette terminologie s'applique aux produits organiques végétaux ou animaux utilisés à des fins énergétiques ou agronomiques, que l'on classe couramment, selon leur taux d'humidité, en deux grandes familles [1] :

- La « biomasse sèche » qui comprend la « biomasse ligneuse » (bûches, rémanents forestiers et petits bois de haie, produits connexes de la transformation du bois, élagages urbains et des bords de routes, bois de rebut, ainsi que les pailles et autres résidus de récoltes ;
- La « biomasse humide » qui regroupe les flux de déchets organiques issus de l'activité agricole (déjections animales), des industries agroalimentaires (abattoirs, laiteries, cidreries distilleries, etc.) et des collectivités (déchets verts, boues d'épuration, fraction fermentescible des ordures ménagères, graisses organiques et produits résiduaux) [1].

Selon une autre définition, la biomasse est toute matière provenant du vivant. Elle a la propriété d'être une source soit d'énergie soit de matière première [1].

---

La biomasse est la fraction organique biodégradable des produits végétaux et animaux, des déchets, résidus et sous-produits provenant de l'agriculture, de la pêche, de la sylviculture et des écosystèmes naturels, ainsi que des industries aval de transformation, tout comme des déchets industriels ou ménagers [2]. La plupart sont en fin de vie et peuvent être transformées pour produire de l'électricité, de la chaleur ou du carburant. Il s'agit d'un gisement d'énergie local, renouvelable et propre. Une exploitation durable et équilibrée des gisements de biomasse (tout en préservant la durabilité des ressources) contribue considérablement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et au développement pérenne d'une économie locale [3].

La biomasse est souvent qualifiée par ses ressources (bio-ressources) ou par sa faculté de produire et de stocker du carbone renouvelable photosynthétique, utilisable par de très nombreuses filières (« carbone vert ») dans le cadre de ce qu'on appelle désormais la « bio-économie ». Elle est essentiellement constituée de polymères complexes de carbone, hydrogène, oxygène et azote, de soufre en faible proportion et d'éléments inorganiques. L'aspect renouvelable introduit une distinction qui permet de n'en retenir qu'une fraction d'une part, d'y ajouter la production fatale de déchets issus d'autres composés organiques naturels industriellement transformés, donc pas toujours naturels, d'autre part [4].

La biomasse est en effet valorisable et valorisée sous forme d'aliments, de fertilisants organiques, de matériaux, de molécules dédiées à la chimie, et sous forme d'énergies variées comme les bio-carburants, le gaz, la chaleur ou l'électricité. Toutes ces filières sont renouvelables et sont parfois qualifiées de « sans carbone ». Elles sont fortement créatrices d'emplois dans les territoires [2].

Par ces divers types de conversion que la biomasse représente, elle est classée en deux types, la biomasse liquide et la biomasse solide [5].

### **I.2.1. Biomasse liquide (BML) [5]**

Elle consiste en une conversion par voie humide des matières lignocellulosiques tel que canne à sucre, le bananier,...

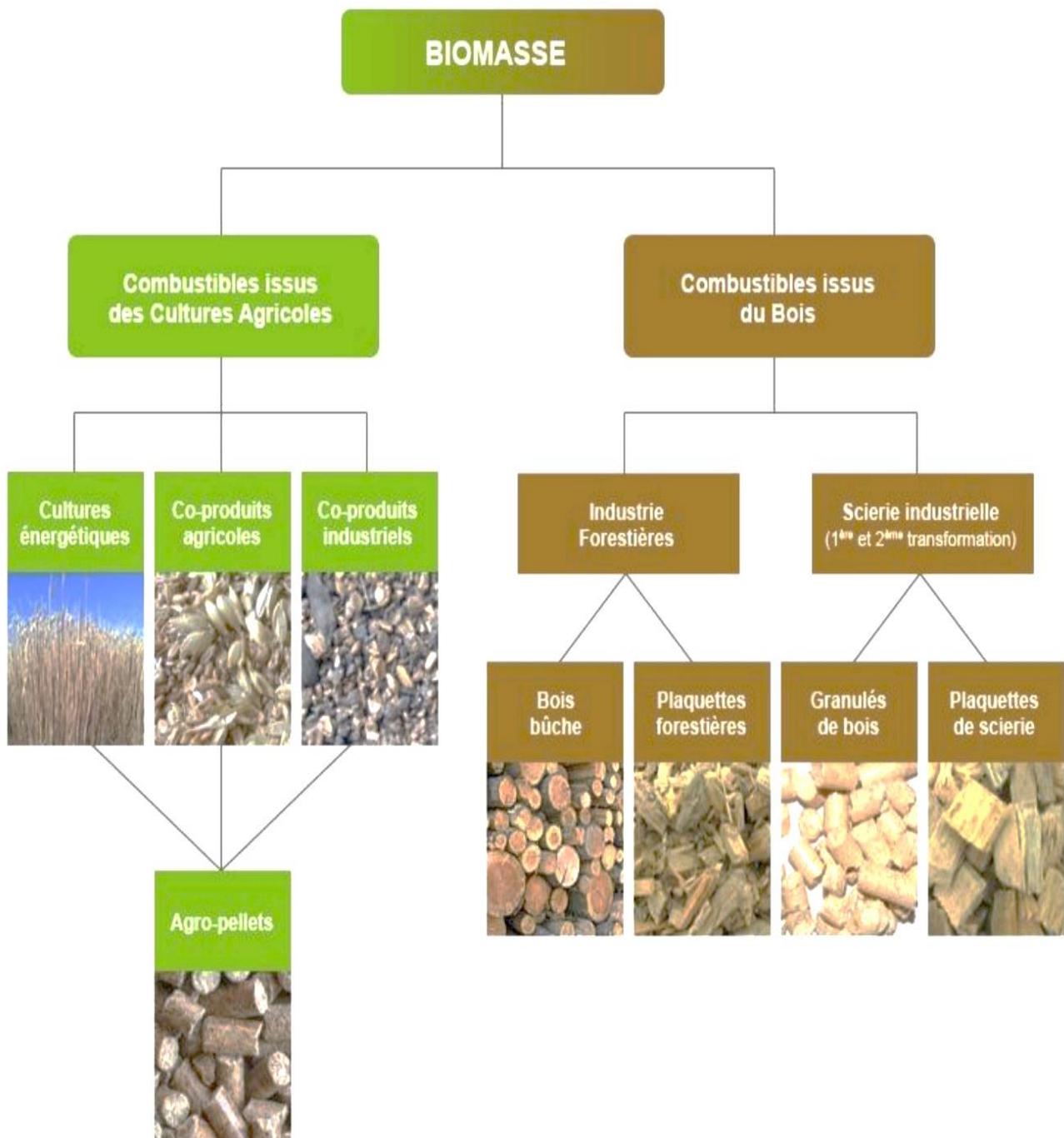
La principale filière de cette voie est la méthanisation. Il s'agit d'un procédé basé sur la dégradation par des micro-organismes de la matière organique. Elle s'opère dans un digesteur chauffé et sans oxygène (réaction en milieu anaérobie). Ce procédé permet de produire :

- **Le biogaz** qui est le produit de la digestion anaérobie des matériaux organiques ;
- **Le digeste** qui est le produit résidu de la méthanisation, composé de matière organique non biodégradable.
- **Le biocarburant**

## I.2.2. Biomasse solide (BMS) [5]

Elle consiste en une conversion par voie sèche des résidus solides tels que les coques (noix de coco, arachide, la balle de riz, les os,...)

La voie sèche est principalement constituée par la filière thermo-chimique, qui regroupe les technologies de la combustion, de la gazéification et de la pyrolyse :



**Figure 1** : les différentes ressources de la biomasse.

---

### **I.3. Les composés organiques produits par la nature**

#### **I.3.1. La production directe de biomasse [4]**

Il s'agit là de biomasse brute : arbres et arbustes des forêts, végétaux poussant naturellement ou productions agricoles, matières aquatiques diverses comme le goémon, les algues ou le varech.

Le monde animal n'intervient pas en production directe d'énergie : aucun animal n'est élevé ou chassé pour produire exclusivement de l'énergie. En effet, la teneur en eau est généralement élevée, 80 % pour l'être humain, ce qui ne permet pas de disposer d'un PCI élevé. Ceci pourrait évoluer si l'on pouvait disposer localement d'une énergie de séchage peu onéreuse. On peut imaginer que les nuages de criquets africains puissent éventuellement devenir une ressource énergétique sous réserve de pouvoir les collecter et de les sécher, à l'énergie solaire par exemple. Le monde végétal constitue la seule ressource de biomasse énergie cultivée spécifiquement ou produite naturellement et récoltée : bois et produits agricoles, voire aquacoles. Il se répartit en deux catégories :

- Les organismes hétérotrophes (incapables d'effectuer par eux-mêmes la synthèse de leurs constituants issus de la matière minérale) et chimiotrophes (récupérant l'énergie d'oxydation des composés organiques réduits qu'ils assimilent) comme les champignons.
- Les organismes autotrophes (aptés à assimiler les éléments inorganiques pour les besoins de la synthèse de leurs constituants organiques) et phototrophes (captant l'énergie lumineuse afin de fournir l'énergie nécessaire aux différentes étapes chimiques de production de leurs constituants). Ce sont les végétaux chlorophylliens.

---

### **I.3.2. La production indirecte de biomasse [4]**

On évoque aussi l'expression de biomasse secondaire ou biomasse des déchets et des sous-produits. Elle désigne tous les résidus issus de matières premières provenant des mondes végétal ou animal ayant ou non subis des modifications chimiques ou physiques. Ces déchets sont issus de l'industrie, des particuliers, du commerce ou des collectivités locales. Certains déchets sont parfois des résidus de traitement de matières issues du monde vivant avec des composés minéraux qui se retrouvent en partie dans leur composition, c'est le cas des liqueurs noires des usines papetières, du papier, du carton, du caoutchouc naturel, des huiles de friture usagées... C'est le caractère fermentescible du déchet qui permet de l'assimiler ou non à de la biomasse. On distingue deux catégories de produits :

- Les déchets de la biomasse directe comprenant les déchets animaux et végétaux issus de leur production agricole (pailles, enveloppes des graines...), forestière (houppiers, racines, écorces, bois mitraillés pendant les guerres et impropres à toute valorisation matière...) ou d'élevage (fumiers, lisiers, litières...).
- La biomasse des déchets constituée de la fraction fermentescibles des déchets des collectivités locales (déchets verts, boues de stations d'épuration urbaines) et de certaines industries (agroalimentaires, papeteries, textiles...).

### **I.3.3. Le carbone fossile [4]**

Charbon, pétrole et gaz naturel sont issus de la biomasse vivante décomposée au fil des millénaires et accumulée dans le sous-sol. Ainsi stockés, ils ne génèrent pas de CO<sub>2</sub> supplémentaire dans l'atmosphère. Leur combustion produit du CO<sub>2</sub> qui se dilue dans l'atmosphère en accroissant sa concentration : l'extraction et l'utilisation ne s'opèrent qu'une fois et ne présentent pas un caractère renouvelable. Ces matières bien qu'issues de la biomasse ne sont donc pas considérées comme de la biomasse.

---

### **I.3.4 Les produits intermédiaires [4]**

#### **I.3.4.1 La tourbe [4]**

Elle est produite à partir de plantes en décomposition dans des tourbières. Ce sont des zones humides permanentes gorgées d'eau à pH acide du fait de la matière organique des plantes qui s'y développent et s'y décomposent sur place en fournissant des acides humiques et fulviques. Les tourbières croissent par épaissement du sol à la vitesse de 2 à 3 cm par siècle : la tourbe est donc lentement renouvelable. Ce sont des sites présentant une forte biodiversité tant animale que végétale. Dans les pays européens peu pourvus en tourbières comme la France, ce sont des sites protégés. Certains espaces européens comme la Finlande, l'Irlande, l'Allemagne de l'Est, la Pologne ou l'Écosse présentent de grandes étendues de tourbières dont l'exploitation, déjà ancienne, comme combustible (pour la production de whisky par exemple) ou comme amendement pour les sols, se perpétue.

Pour l'Union européenne, la tourbe n'est pas considérée actuellement comme de la biomasse (absence de mesures réglementaires favorables) puisqu'il convient de ne pas favoriser l'exploitation des tourbières qui tend à réduire la biodiversité locale.

#### **I.3.4.2 Le gaz des mines de charbon fermées [4]**

Il provient du dégagement de méthane se désorbant des matériaux présents dans les galeries. Il s'agit là d'un gaz fatal, véritable déchet rémanent laissé sur place par l'exploitation minière. Valorisé en production d'énergie, ce n'est pas à proprement parler de la biomasse, mais il est considéré comme une énergie nouvelle renouvelable permettant de récupérer des permis d'émission CO<sub>2</sub> au même titre que le biogaz des décharges afin de favoriser son exploitation et l'élimination d'un gaz 21 fois plus actif que le CO<sub>2</sub> au niveau du renforcement de l'effet de serre. Le raisonnement est ici identique à celui du biogaz des décharges.

#### **I.3.4.3. Le bois traité par des produits chimiques toxiques [4]**

Le bois traité par des produits chimiques toxiques (créosote, chrome-cuivre arsenic...) pour ne pas se décomposer n'est plus vraiment un déchet biodégradable. Il ne peut donc en toute rigueur être assimilable à de la biomasse.

---

## **I.4. Les cultures dédiées à la production d'énergie [1]**

### **I.4.1. Les plantes agricoles [1]**

L'emploi de grains des cultures traditionnelles (avoine, blé) n'est pas rentable au niveau de l'exploitation agricole pour produire un combustible pour chaudière en ce qui concerne la production de biocarburants, on observe que ce sont les plantes habituellement utilisées pour produire soit de l'éthanol, soit des huiles, qui sont cultivées afin de les mélanger avec les carburants fossiles en faibles proportion : ce sont des carburants de première génération. Les plantes concernées par la production d'éthanol sont la betterave, le blé, le maïs et la canne à sucre.

Pour la production d'huile ce sont le colza, le tournesol, le soja, le palmier et l'arachide qui sont utilisés.

La seconde génération de biocarburants vise plutôt des plantes permettant de maximiser la production de la biomasse afin de générer le maximum de gaz de synthèse au niveau de gazeur.

### **I.4.2. Le bois et les forêts [1]**

Le bois subit différentes transformations dont la première concerne l'évaporation de l'eau, suivie de la pyrolyse et l'oxydation. Ces différentes étapes font intervenir des phénomènes de transferts de chaleur au sein du solide qui sont directement fonction de la conductivité thermique du matériau (exprimé en  $W.m^{-1} C^{-1}$ ).

Le bois est connu pour être un mauvais conducteur de chaleur du fait de la forte porosité du matériau et du nombre peu élevé d'électrons libres susceptibles d'être délocalisés. De nombreux facteurs influencent la conductivité thermique du bois, les plus importants sont la direction du flux par rapport à l'orientation des fibres, l'humidité, la densité et la structure du bois. Et enfin les transferts de chaleur au sein du bois sont fonction de la taille des morceaux présents dans le foyer. Plus les échantillons sont volumineux et plus lents vont être les transferts de chaleur dans le matériau. Le pouvoir calorifique (PC) d'un matériau est l'expression du contenu énergétique du matériau ou encore la quantité de chaleur libérée lors de la combustion dans l'air de ce matériau. Le PC est habituellement mesuré en termes d'énergie par unité de masse ou de volume, soit MJ/kg pour des solides, MJ/l pour des liquides ou MJ/Nm<sup>3</sup> pour des gaz. Le PC d'un combustible peut être exprimé de deux manières : le PC brut ou pouvoir calorifique supérieur (PCS) et le pouvoir calorifique inférieur (PCI).

---

La teneur en éléments majeurs des bois sur matière sèche est donnée par le tableau n°1 ci-dessous.

**Tableau 1 :** La teneur en éléments majeurs des bois sur matière sèche

Carbone	49% - 57%
Hydrogène	5.5% - 6.5%
Oxygène	36% - 44%
Azote	0% - 0.25%
Soufre	0% - 1%

**Source :** [1]

### **I.4.3. Les plantes aquatiques et les algues [1]**

Les plantes aquatiques construisent un gisement potentiel de biomasse intéressant. Leur forte humidité implique un séchage préalable pour atteindre un PCI suffisant ou un traitement biologique anaérobie pour produire du biogaz ; Les plantes aquatiques peuvent convenir à une production de biomasse énergétique.

Ce ne sont naturellement pas les seules et ce type d'applications nécessiterait de multiplier les études complémentaires car ce domaine demeure moins investigué que celui des végétaux terrestres.

### **I.5. Diversité des ressources et diversité des usages [3]**

La biomasse comprend une grande variété de matières organiques, pour la plupart en fin de vie pouvant être valorisées sous forme énergétique.

La diversité des matières organiques disponibles et des différents procédés technologiques mis au point pour valoriser la biomasse en énergie permet d'obtenir différents types d'énergie que ce soit de l'électricité, de la chaleur, ou encore des produits intermédiaires (sous forme liquide, gazeuse ou solide) à finalité énergétique, par exemple le biogaz ou le biocarburant.

Voici quelques exemples concrets de transformation de la biomasse en énergie :

#### **I.5.1. Transformation par combustion**

C'est une technique ancestrale de conversion en énergie de la biomasse. Elle produit de la chaleur par l'oxydation complète du combustible, en général en présence d'un excès d'air. L'eau chaude ou la vapeur ainsi obtenues sont utilisées dans les procédés industriels ou dans les réseaux de chauffage urbain. La vapeur peut également être envoyée dans une turbine ou un moteur à vapeur pour la production d'énergie mécanique ou, surtout, d'électricité [5]. La combustion est le principal procédé de valorisation du bois dans des millions de foyers malgaches et celui de la bagasse de canne sucre dans les chaudières des sucreries [5].

---

Brûler une buche constitue la plus ancienne méthode de valorisation énergétique de la biomasse. La combustion de biomasse solide (tels les résidus de bois) génère de l'énergie thermique. Celle-ci peut être utilisée comme tel pour alimenter par exemple un réseau de chaleur ou être transformée en électricité (par l'intermédiaire d'une turbine vapeur), voire les deux (grâce à un moteur à cogénération) [3].

La combustion de granulés de bois (ou pellets) constitue une alternative de chauffage économique et écologique en comparaison aux énergies fossiles polluantes, que ce soit à l'échelle d'un ménage ou d'une industrie. Les appareils de chauffage proposés sur le marché deviennent, quant à eux, de plus en plus performants en termes de rendement et d'émissions.

Ajoutons que la majorité des pellets ou granulés de bois produits en Belgique sont fabriqués à partir de co-produits de bois (résidus tels les copaux, les sciures...) issus soit de l'industrie du bois ou de la filière forestière. Le miscanthus (cultivé notamment à des fins énergétiques) est également utilisé comme alternative en combustion (généralement dans petites chaudières décentralisées) [3].

### **I.5.2. Transformation par gazéification**

La gazéification de la biomasse solide est réalisée dans un réacteur spécifique, le gazogène. La gazéification des matières organiques solides (tels les résidus de bois) est un procédé thermochimique qui transforme la biomasse en un gaz de synthèse combustible, appelé syngas (un mélange de deux gaz combustibles : le monoxyde de carbone (CO) et l'hydrogène (H<sub>2</sub>)). Il s'agit d'un procédé à la frontière entre la pyrolyse et la combustion en l'absence d'oxygène, lors duquel le carbone plutôt que de se combiner avec l'oxygène pour former du CO<sub>2</sub>, va prendre de l'hydrogène ou une partie de l'oxygène qui traîne et produire du monoxyde de carbone (CO). Ce gaz est brûlé dans un moteur pour la production d'énergie mécanique ou d'électricité et de chaleur [3]. Le résultat est la transformation complète de la matière solide, hormis les cendres, en un gaz combustible composé d'hydrogène et d'oxyde de carbone [1].

Ce gaz, après épuration et filtration, est brûlé dans un moteur à combustion pour la production d'énergie mécanique ou d'électricité et de chaleur [3]. La cogénération est également possible avec la technique de gazéification [5].

***Projet urbain :*** *Une déchetterie qui collecte des palettes d'expédition, emballage et bois de construction non utilisé, peut investir dans une installation de gazéification. Dans un réacteur spécifique, elle transforme les résidus de bois en gaz qui peut être brûlé pour produire de l'électricité...*

Il est à noter que la gazéification constitue pour certaines applications le moyen le plus performant pour valoriser des déchets [3].

---

### **I.5.3. Transformation par méthanisation [3]**

Le procédé de méthanisation est destiné à une biomasse généralement plus humide, du type résidus agricoles, déchets de l'industrie (ex : agroalimentaire) ou effluents ménagers (voir liste de la fiche biogaz...). Il consiste en la digestion des matières organiques en l'absence d'oxygène sous l'action combinée de micro-organismes. La méthanisation des matières organiques fermentescibles permet de produire du biogaz. Il peut ensuite être transformé en électricité et/ou en chaleur ou en biocarburant destiné au transport. Certaines installations de production du biogaz valorisent également les plantes et cultures dédiées à des fins énergétiques. (Pour en savoir plus, lire la fiche « cultiver des plantes pour en faire de l'énergie, est-ce bien raisonnable ? »)

*Projet industriel : Un producteur agroalimentaire, une industrie chimique, une papeterie ou encore une station d'épuration peuvent valoriser en biogaz les déchets organiques issus de leur activité.*

*Projet agricole : Un agriculteur ou un éleveur peut également valoriser en énergie les restes agricoles ou d'élevage. La production du biogaz vient ainsi compléter son activité agricole existante en générant diverses retombées positives.*

### **I.5.4. Production des biocarburants [3]**

En fonction des différentes sources de biomasse, la production des biocarburants fait appel à des procédés technologiques très variés. Les différentes générations de biocarburants se développent à des stades variés de maturité.

Les biocarburants de 1ère génération se développent aujourd'hui à l'échelle commerciale. Ils concernent les procédés technologiques permettant de transformer de manière physicochimique (ex. l'extraction, la fermentation...) des matières alimentaires riches en sucre, en amidon (ex. le blé, le maïs, la canne à sucre ou encore la betterave) ou en huiles (ex. le colza). Les biocarburants de 1ère génération sont produits à partir de cultures alimentaires. Il s'agit principalement du bioéthanol et du biodiesel.

Les biocarburants de 2ème génération sont, quant à eux, déjà produits. Il s'agit principalement du biométhane (biogaz épuré, voir fiche "Roulera-t-on demain au gaz renouvelable ?"), principalement issu de résidus et de déchets, ainsi que de cultures spécifiques. Ces carburants sont aussi parfois utilisés pour des applications stationnaires (ex. unité de cogénération fonctionnant au biodiesel).

Deux autres filières se développent à côté :

- Les autres biocarburants de 2ème génération produits par pyrolyse ou gazéification à partir de matières ligno-cellulosiques et non alimentaires (ex. la paille, la tourbe ou les résidus de bois...)

- 
- Les biocarburants de 3ème génération qui sont encore au stade de recherche et qui visent à exploiter la biomasse algale par le procédé de bioconversion (modification génétique des algues).

Pour 2020, l'Union européenne s'est fixée pour objectif d'atteindre 10% d'énergie renouvelable dans le secteur des transports. Dans le cadre de cet objectif, la Commission Environnement du Parlement européen s'est prononcée pour une limitation du recours aux biocarburants de 1ère génération, plafonnés à 6% de l'objectif global (Commission du 24 février 2015). La volonté des députés européens est d'encourager le recours aux biocarburants dits «avancés» fabriqués à partir de biomasse non-alimentaire (de 2ème et 3ème génération).

## **I.6. Diversité des opportunités [3]**

La diversité qui caractérise la biomasse et ses technologies rend les filières des bioénergies souvent complexes mais renforce leur haut potentiel de développement...

### **I.6.1. Sur le plan énergétique (complémentarité et stabilité)**

Grâce à une production stable et son caractère stockable, l'énergie produite à partir de la biomasse (dont l'électricité et la chaleur) est complémentaire aux autres sources d'énergie renouvelable intermittentes (comme l'éolien ou le photovoltaïque).

Elle occupe dès lors une place cruciale dans un bouquet énergétique renouvelable permettant d'améliorer notre indépendance énergétique [3].

### **I.6.2. Sur le plan environnemental (équilibre naturel et cycle de vie)**

Nos besoins en énergie sont devenus vitaux, tout comme l'est l'exploitation durable de nos ressources naturelles. Le développement des bioénergies permet de concilier les deux : une production énergétique locale via la valorisation de matières organiques recyclables. Une fois transformées, certaines matières retournent à la terre sous forme de fertilisants. Ceci permet de diminuer le recours aux engrais de synthèse dont la fabrication est fortement dépendante des ressources fossiles.

C'est le cas notamment de la biométhanisation qui produit, en plus du biogaz, du digestat qui est utilisé comme fertilisant naturel. Cette technologie présente ainsi une double valeur ajoutée et constitue un parfait exemple de l'économie circulaire [3].

### **I.6.3. Sur le plan socio-économique (nouveaux débouchés et emplois)**

L'essor des filières dans les bioénergies offre des opportunités de développement à toute une chaîne d'acteurs économiques locaux. Elle permet notamment la diversification de l'activité agricole en offrant des alternatives et en réduisant la dépendance par rapport à un seul secteur (ex. l'agro-alimentaire) [3].

---

La valorisation du biogaz peut également constituer une source de revenus supplémentaires pour les agriculteurs ou toute entreprise industrielle, leur assurant de surcroît une plus grande autonomie énergétique grâce à l'énergie autoproduite. Une cartographie, réalisée par le cluster Tweed, répertorie ainsi plus de 1.060 emplois dans le secteur de la biomasse en Wallonie. Grâce au biogaz, de nombreux emplois peuvent être créés en zones rurales [3].

## **I.7. Les résidus de la biomasse**

### **I.7.1. Agriculture [1]**

Les déchets de culture constituent un gisement de biomasse particulièrement intéressant. Alors que l'on peut considérer que la culture principale nécessite eau, engrais, insecticides, fongicides pour son développement, ces résidus profitent de ces apports et constituent ainsi une source renouvelable ne nécessitant pas un apport spécifique de ces ingrédients contrairement à une culture dédiée. Par contre, ces résidus abandonnés sur leur site de production contribuent au maintien des teneurs en matière organique et en minéraux du sol qui finirait avec les prélèvements racinaires par s'épuiser.

### **I.7.2. Les forêts [1]**

Les rémanents désignent les petits arbres, les branches, les houppiers et les bois non commercialisables laissés sur place et parfois employée comme combustible. Ils sont produits lors d'éclaircissement ou d'amincissements.

### **I.7.3. La biomasse des déchets**

La biomasse des déchets s'étend à toutes les formes de déchets issus de l'industrie, des collectivités locales, voire de l'agriculture comme les feuillages de pommes de terre ou de betteraves.

## **I.8. Les avantages et inconvénients de la filière biomasse [5]**

La biomasse est une source d'énergie qui présente les avantages suivants :

- Une production par hectare ne nécessitant qu'un investissement relativement modeste ; une forme de stockage automatique de l'énergie solaire dont la technologie de production fondée sur l'agriculture est bien maîtrisée, contrairement à d'autres technologies ;
- Une technologie de transformation disponible et peu sophistiquée ; des possibilités de décentralisation à la production et à l'utilisation de l'énergie : il n'y a pas de problèmes de transport de cette énergie par fil, par camion-citerne, par wagons. et ceci permettrait sa répartition équitable, pour un développement équilibré entre les villes et les campagnes ;
- Une compétitivité économique satisfaisante avec les énergies fossiles ;

- 
- Une production génératrice d'emplois.

Elle présente cependant les quelques inconvénients suivants :

- Elle a une teneur en énergie faible et une dispersion dans l'espace relativement importante.

Aussi, sa collecte ou son transport peut s'avérer coûteux si on ne peut pas l'utiliser sur place ou la transformer en combustible liquide ou gazeux facilement transportable ;

- Sa production peut concurrencer. La production de plantes vivrières dans les pays où la sur population existe. Heureusement à Madagascar les terres ne manquent pas encore : il faut seulement les aménager ;
- Sa production peut aussi engendrer de nouveaux besoins en engrais et en eau. Aussi, il est nécessaire de faire une analyse précise de son bilan énergétique de production.

---

## **Chapitre II : LE CHARBON ACTIF**

### **II.1. Introduction**

Le charbon actif ou encore charbon activé est un matériau constitué essentiellement de matière carbonée à structure poreuse, ayant subi une préparation particulière et qui, de ce fait, possède, à un haut degré la propriété de fixer et de retenir les fluides amenés à son contact. Il s'agit d'une structure amorphe composée principalement d'atomes de carbone et généralement obtenue après une étape de carbonisation à haute température, présentant une très grande surface spécifique qui lui confère un fort pouvoir adsorbant [6]. Aujourd'hui, la production mondiale annuelle en charbons actifs atteint 420 000 tonnes [6].

Le carbone activé est l'adsorbant le plus utilisé dans le traitement des eaux polluées. Sa chimie de surface et ses remarquables propriétés d'adsorption lui permet de trouver des applications dans différents domaines tel que la décoloration et la purification des liquides, la récupération des solvants, l'adsorption des polluants ou encore la séparation des gaz [7]. Le charbon actif est un produit adsorbant obtenu à partir de matières premières riches en carbone (le bois, la tourbe, le charbon, le lignite, l'écorce de coco...) [8].

### **II.2. Généralités sur les charbons actifs**

Le charbon actif est historiquement parlant le premier matériau adsorbant utilisé [7]. De par ses propriétés médicinales, il était déjà employé dans l'Égypte antique [7]. L'emploi du charbon comme matériau adsorbant pour la fixation des contaminants remonte à des milliers d'années. En effet, son utilisation pour des fins médicales remonte à 1550 ans avant J.C et celle relative au traitement de l'eau et particulièrement l'élimination des goûts et des couleurs à 200 ans avant J.C. Mais la première application du charbon sous sa forme activée, dans l'industrie et plus précisément celle du raffinage du sucre date de 1900, lorsque la capacité de décoloration des os calcinés (noir animal) a été découverte en Angleterre. Les propriétés adsorptives des charbons actifs ont été mises en évidence vers la fin du 19<sup>ème</sup>, début du 20<sup>ème</sup> siècle et les premiers procédés industriels pour fabriquer des charbons actifs aux propriétés bien définies, ont été développés par V.Ostrejko (1900, 1901) pour l'activation à la vapeur et les processus d'activation chimique par Bayer (1915) [3]. Il est constitué d'atomes de carbone organisés en feuillets (carbone de type sp<sup>2</sup>). Ces feuillets sont plus ou moins organisés sous forme d'empilements de quelques dizaines (ou moins) de feuillets en une structure de type papier froissé, traversée de pores allant de quelques Angströms à quelques dizaines de nanomètre [7].

---

L'appellation générique « charbon actifs » désigne un large éventail de produits carbonés issus de précurseurs naturels ou synthétiques contenant une part importante de carbone dans leur composition élémentaire chimique [9]. Ce sont des matériaux solides, amorphe, caractérisés par une grande surface spécifique et une texture poreuse très développée [9]. Toutes matières premières organique qui contient du carbone, est à priori susceptible de convenir pour l'obtention de charbon actif [8].

Le choix de la matière première sera essentiellement dépendant des possibilités d'approvisionnement locales permettant des prix de revient compétitifs.

Néanmoins, les matières premières utilisées conditionneront en grande partie la qualité finale du charbon actif. Une fois ces matières premières sélectionnées, elles sont activée physiquement ou chimiquement dans des fours d'activation. Par cette activation on obtient, une structure de carbone hautement poreuse et très active [8]. Cette structure poreuse permet aux particules de charbon actif de développer une importante surface de contact avec le milieu extérieur [7]. Les charbons actifs peuvent être produits à partir de précurseurs végétaux, animaux et minéraux tels que le bois, l'écorce, la patte de bois, les coques de noix de coco, les noyaux d'olives, la tourbe et les résidus pétroliers. Actuellement, on distingue deux voies de fabrication des charbons actifs [9] :

La voie physique qui consiste en une carbonisation suivie d'une activation sous atmosphère contrôlée (vapeur d'eau, CO<sub>2</sub>) à haute température, généralement comprises entre 900 et 1000 °C [9] ;

La voie chimique qui met en jeu un agent chimique favorisant la déshydratation, puis une réorganisation structurale à des températures plus faibles allant de 400 à 600 °C [9].

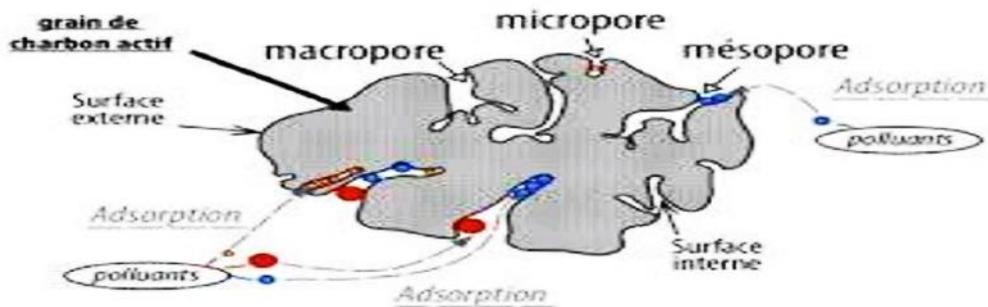
Dans de nombreux cas et afin d'améliorer leur comportement vis-à-vis d'une application particulière ou spécifique, les propriétés surfaciques des charbons actifs peuvent être modifiées en jouant sur le matériau d'origine, le types d'activation et les conditions de leur mises en œuvre. Il en découle que la structure poreuse et la surface spécifique qui déterminent la texture d'un charbon actifs dépendent fortement de la méthode d'activation et du précurseur utilisé [9].

En se basant sur la classification de Dubinin, l'UIPAC distingue trois catégories de pores classés selon leur diamètre en macro, méso et micropores. La texture poreuse des charbons actifs est hétérogène et les trois catégories de pores coexistent. En plus de la surface spécifique et de la porosité qui jouent un rôle primordial dans la capacité d'adsorption des charbons, il existe un autre paramètre aussi important et qui peut influencer considérablement sur le pouvoir d'adsorption des charbons actifs.

---

Ce sont les fonctions de surfaces dont la nature peut être oxygénée et quelques fois azotés, soufrés ou halogénés [9].

La structure interne du carbone activé est constituée d'un assemblage plus ou moins aléatoire de feuillets élémentaires aromatiques. L'espace entre ces feuillets constitue la microporosité du charbon. L'aspect aléatoire de la distribution de taille de pores peut rendre la sélectivité du matériau très faible [7].



**Figure 2 :** structure chimique du charbon actif

## **II.3. Adsorption sur les carbones activés**

### **II.3.1. Définition de l'adsorption**

L'adsorption est un phénomène de surface par lequel des molécules de gaz ou de liquides se fixent sur les surfaces solides des adsorbants selon divers processus plus ou moins intenses : la chimisorption et la physisorption. Le phénomène inverse par lequel les molécules se détachent est la désorption. De plus, l'adsorption est un phénomène spontané et se produit dès qu'une surface solide est mise en contact avec un gaz ou un liquide. On appelle généralement « adsorbat » la molécule qui s'adsorbe et « adsorbant » le solide sur lequel s'adsorbe la molécule [7].

### **II.3.2. Types d'adsorption**

La nature des liaisons formées ainsi que la quantité d'énergie échangée lors de la rétention d'une molécule à la surface d'un solide permettent de distinguer deux types d'adsorption : L'adsorption physique et l'adsorption chimique [7].

### **II.3.3. Adsorption physique**

Appelée également physisorption, elle est caractérisée par une faible énergie de liaison (inférieure à 40 kJ.mol<sup>-1</sup>) et elle correspond à l'établissement de liaisons de type Van der Waals. Dans le cas d'une telle adsorption, le temps de rétention de la substance adsorbée est court et la surface adsorbante peut être recouverte de multiples couches moléculaires de produit adsorbé [7].

### II.3.4. Adsorption chimique

Appelée également chimisorption, elle met en jeu une énergie élevée (supérieure à 40 kJ mol<sup>-1</sup>) et correspond aux liaisons covalentes plus permanentes entre l'adsorbant et la molécule adsorbée. Les mécanismes les plus fréquents dans ce cas sont la protonation et l'échange d'ions. Dans ce type d'adsorption, le temps de rétention est long et seule la première couche liée à la surface adsorbante est chimiquement adsorbée, les autres couches, dans le cas où elles existent, sont retenues par physisorption [7].

### II.3.5. Les adsorbants

Tous les solides agissant comme adsorbant sont caractérisés par une structure microporeuse qui leur confère une très grande surface active de masse. Les adsorbants utilisés dans la pratique sont, soit de nature organique (végétale ou animale), soit de nature minérale.

Ils sont employés tels quels ou après un traitement d'activation ayant pour but d'augmenter leur porosité [10].

Les adsorbants les plus utilisés dans les applications de traitement des eaux sont les suivants :



**Figure 3 :** Principaux adsorbants

---

## II.4. Préparation des carbones activés

Les charbons actifs peuvent être produits à partir de tout matériau composé en grande majorité du carbone et contenant un faible pourcentage de matière inorganique. Ces matières premières peuvent être d'origine végétale (coque de noix de coco, bois, noyaux d'olives, noyaux de dattes...), animale (os) ou synthétique (résidu de l'industrie du pétrole) [9].

Actuellement, on peut dire que les charbons actifs sont produits pratiquement dans tous les pays du monde où les ressources ligneuses sont abondantes. En effet, l'utilisation des sous-produits de l'industrie s'inscrit dans une démarche de développement durable et de valorisation des déchets.

La fabrication du charbon actif s'effectue soit par activation physique ou bien par activation chimique. Dans le cas de l'activation chimique, il y a généralement une seule étape de traitement thermique combiné à un traitement chimique. Dans le cas de l'activation physique, la préparation se fait selon deux étapes : la pyrolyse de différentes matières premières carbonées suivie d'une activation physique [7].

### II.4.1. Pyrolyse

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) [11]. La pyrolyse ou la carbonisation est aussi un craquage thermique sans produits oxydants. Sous l'action de la chaleur, elle décompose la biomasse en en trois principales phases dont l'importance relative varie suivant les conditions opératoires [8].

La pyrolyse est une décomposition thermique du bois en l'absence de l'air. En réalisant une distillation sèche : "pyrolyse" dans un ballon pyrex et à l'abri de l'air, on chauffe des petits morceaux de bois. Puis les gaz échappés lors de cette distillation sont condensés. Et, l'ensemble des liquides résultant de l'expérience s'appelle : jus pyroligneux [4]. Le but de la pyrolyse est d'obtenir un produit fortement carboné, avec une microporosité rudimentaire qui pourra ensuite être développée dans le processus d'activation [11].

#### II.4.1.1. Techniques de carbonisation [11]

On distingue trois modes opératoires de carbonisation

- Carbonisation par combustion partielle ;
- Carbonisation par injection de gaz chauds dans la charge ;
- Carbonisation en vase clos ou cornue.

---

#### **II.4.1.1.1. Fours à combustion partielle [11]**

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. Tous les produits condensables ainsi que les gaz ne sont généralement pas récupérés.

La transformation du bois en charbon selon ce mode opératoire est mauvaise, puisque plus de 50% de l'énergie initiale est perdue. En outre, l'inconvénient de cette méthode, est de ne pas permettre la carbonisation des pailles, des roseaux, des tiges de coton ainsi que la biomasse de faible granulométrie comme la balle de riz, la parches de café et la sciure de bois. Les principales raisons sont :

- Mauvais transfert thermique dans la charge à carboniser ;
- Formation de cheminés dans la charge empêchant le transfert thermique latéral dans le cas des pailles ;
- Difficultés de contrôle des entrées d'air pouvant entraîner

#### **II.4.1.1.2. Carbonisation par contact de gaz chauds [11]**

L'énergie nécessaire à la carbonisation est fournie par des gaz chauds provenant d'un foyer externe et mis en contact direct avec la charge. Cette méthode a un bon rendement de production de l'ordre de 30 à 35 % mais le coût de l'installation reste assez élevé. Il faut noter aussi que le fonctionnement de ces réacteurs est difficile à contrôler sans une instrumentation adaptée.

#### **II.4.1.1.3. Carbonisation en cornue**

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. Le foyer peut être alimenté par tout combustible. Une fois que le processus de carbonisation est amorcé, les gaz de pyrolyse peuvent être injectés dans le foyer pour entretenir la pyrolyse. L'avantage de ces réacteurs est de pouvoir carboniser des matières végétales de faible granulométrie et d'avoir un rendement de production de l'ordre de 35 % [11].

#### **II.4.2. Activation**

En général, la réaction d'activation est un procédé qui fait intervenir un agent oxydant à une température élevée, de manière à produire un produit fortement poreux. Les procédés divers de préparation des charbons actifs se rattachent à l'un des deux modes d'activation dénommés activation physique et activation chimique [7].

---

#### **II.4.2.1. L'activation physique**

Au cours de ce procédé la matière carbonisée est activée à des températures de l'ordre de 850-1100 °C dans des fours rotatifs ou des fours à cuve, sous atmosphère oxydante. Les gaz oxydants généralement utilisés sont le dioxyde de carbone, le dioxygène, la vapeur d'eau ou le mélange de ces deux. Yang et al ont comparé l'activation du noyau de pêche et du bois d'eucalyptus, à la vapeur d'eau et du CO<sub>2</sub>. Ils concluent que la vapeur d'eau favorise à la fois le développement des micros et des mésopores tandis que le CO<sub>2</sub> favorise sélectivement le développement des micropores. Un mélange de CO<sub>2</sub> et de vapeur d'eau est souvent utilisé pour l'activation à l'échelle industrielle. Les charbons activés physiquement ne présentent pas d'impuretés liées à l'agent d'activation utilisé. Leurs propriétés texturales dépendent fortement de la réactivité de l'atmosphère oxydante [8].

L'activation physique suit deux phases. La première phase, dite de carbonisation, est en général menée à des températures relativement modérées (400 à 500 °C). Elle a pour but l'élimination de composés organiques et la formation d'un carbonisât. Ensuite, le matériau subit une activation poussée par traitement à la vapeur d'eau ou au dioxyde de carbone à 800 °C ou encore par un mélange de ces gaz. Cette seconde phase conduit à l'ouverture des pores et à l'obtention d'une très grande surface spécifique (entre 500 et 3000 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>), alors que le carbonisât original n'a en général qu'une surface spécifique faible (de 50 à 250 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>) [11].

#### **II.4.2.2. L'activation chimique :**

L'activation chimique est une activation en phase liquide : le matériau traité préalablement est imprégné dans l'agent activant puis pyrolysé sous atmosphère inerte [8], dans l'activation chimique, les matières carbonées brutes telles que sciures de bois, tourbe, mélasse, déchets végétaux, sont mélangées avec des produits chimiques tel que l'acide sulfurique, le chlorure de calcium, le chlorure de zinc, l'acide phosphorique, l'hydroxyde de potassium, etc. [11]. Après carbonisation (400 à 500°C), le carbone est séparé de la substance inorganique activant en dissolvant cette dernière par un lavage approprié. Le chlorure de zinc et l'acide phosphorique sont les agents activant les plus couramment utilisés [11].

Elle ne nécessite qu'un seul traitement thermique à des températures comprises entre 400 et 800°C, valeurs inférieures aux températures usuelles d'activation physique [8]. L'agent activant, le taux d'imprégnation, la température et la durée de l'activation sont les principaux paramètres de l'activation chimique ; ils conditionnent les propriétés des charbons obtenus en terme de volume poreux, de répartition de taille de pore et de composition chimique de la surface.

---

Le contrôle de tous ces paramètres et la détermination de leur impact respectif sur les propriétés finales du produit activé ne sont pas aisés ; les caractéristiques chimiques et texturales des charbons activés chimiquement sont en réalité difficilement prévisibles. L'acide phosphorique, le chlorure de zinc et l'acide sulfurique comptent parmi les agents d'activation chimiques les plus utilisés.

Le choix de l'agent activant est bien souvent dicté par la nature des matériaux précurseurs (pour un précurseur donné, certains agents activant sont mieux adaptés) et par les propriétés requises par le produit final. Tseng et Al ont montré que l'activation par KOH est plus efficace que par les agents classiques  $H_3PO_4$  et  $ZnCl_2$  [8].

#### **II.4.2.3. Comparaison des deux procédés d'activation**

L'activation chimique apparaît être plus une méthode plus avantageuse que l'activation physique pour les raisons suivantes : La synthèse de charbons actifs par activation chimique est réalisée en une seule étape alors que l'activation physique nécessite deux étapes distinctes de carbonisation et d'activation. Vu leurs températures d'activation, l'activation physique occasionne un coût énergétique plus important. Par contre, avec l'activation chimique le rendement de charbon actif est meilleur puisque la carbonisation à très haute température est évitée. L'inconvénient majeur de cette technique réside dans les traitements de lavage, indispensables pour l'élimination de l'agent activant, qui constituent des étapes supplémentaires dans le procédé d'élaboration des charbons actifs [8].

### **II.5. Morphologie**

Les charbons actifs commerciaux existent sous plusieurs formes. Le classement en général se fait à partir de la taille et de la forme des particules de charbon. Dans le cas le plus commun, la particule peut se présenter sous forme de poudre ou de grain. Les carbones activés peuvent aussi se présenter sous forme de fibres (précurseur à base de fibres végétales ou synthétiques) ou de tissu (les précurseurs sont dans ce cas des tissus) [7].

#### **II.5.1. Charbon actif en poudre ou (CAP)**

Le charbon actif en poudre se présente sous forme de fines particules de granulométrie comprise entre 1 et 100  $\mu m$ . Les particules ont une large surface externe et une faible profondeur de diffusion  $\mu$  la vitesse d'adsorption est très rapide. Le charbon actif en poudre est fréquemment utilisé pour le traitement d'effluents liquides. Par contre il est difficile à manipuler et à récupérer ce qui pose des problèmes de régénération [7]. Il est généralement issu du procédé de fabrication chimique et est fréquemment utilisé pour le traitement d'effluents liquides [8].

---

### II.5.2. Charbon actif en grain OU (CAG)

Le charbon actif peut-être fabriqué sous forme de grains formés de particules de taille supérieure à 1 mm, Il est caractérisé par une grande surface interne et une surface externe relativement faible. Il en résulte que les phénomènes de diffusion à l'intérieur des pores prennent une grande importance dans les processus d'adsorption. Ainsi la cinétique d'adsorption est beaucoup plus lente que dans le cas d'un charbon actif en poudre [7]. Les caractéristiques physiques des granulés de charbon actifs varient considérablement selon les produits. Les granulés utilisés pour le traitement des gaz proviennent essentiellement d'une activation physique [8].

### II.5.3. Tissu de carbone activé

Les tissus de carbone activé sont préparés à partir de tissus synthétiques ou fabriqués à partir de fibres végétales (par exemple à partir de rayonne tissée), carbonisés à haute température puis activés. Depuis quelques années, l'intérêt pour ces matériaux est croissant car ils présentent des cinétiques et des capacités d'adsorption supérieures aux charbons en grains et en poudre. Ils possèdent des structures microporeuses très développées, une surface spécifique très élevée pouvant atteindre 2000 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> et sont facilement manipulables [7].



**Figure 5 :** charbon actif en grain

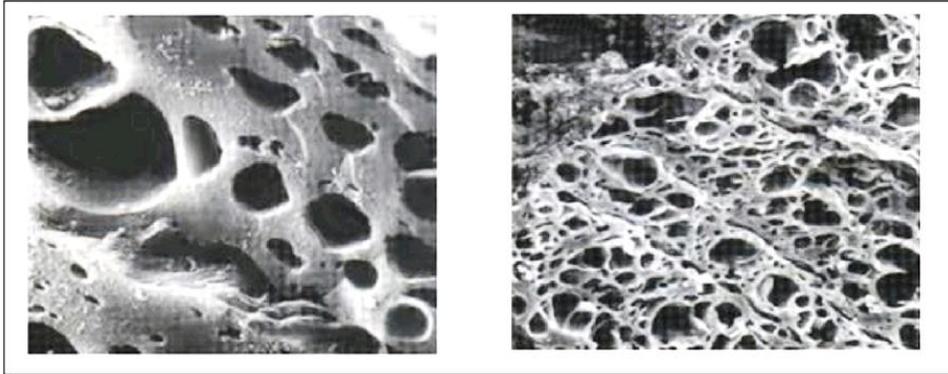


**Figure 4 :** charbon actif en poudre

---

#### II.5.4. Charbon actif texture

Il est fabriqué différemment des charbons actifs en grain ou en poudre, c'est à dire que la matière première carbonée est finement broyée puis soumise à une oxydation partielle sous air. Un liant est ajouté à cette poudre afin d'obtenir une pâte qui par un dispositif d'extrusion produit des extrudés cylindriques de diamètre et longueur déterminés (0,8 à 5 mm de diamètre jusqu'à 10 mm de longueur). Ces extrudés sont ensuite carbonisés à 900°C dans un four rotatif puis activés sous flux gazeux. Ces matériaux sont surtout employés pour les applications en phase gazeuse [8].



**Figure 6** : Clichés de microscopie électronique à balayage de la structure d'un charbon actif

**Tableau 2 :** Avantages et inconvénients des charbons actifs en poudre et granulé [10]

<b>Rubrique</b>	<b>Charbon actif en poudre</b>	<b>Charbon actifs granulé</b>
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Le charbon actif en poudre est 2 à 3 fois moins cher que le charbon actif en granulé</li><li>• Des quantités supplémentaires peuvent être rajoutées en cas de pointes de pollution accidentelles ou temporaires.</li><li>• L'adsorption est rapide dans la mesure où une grande partie de la surface de contact est directement disponible.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Il est inerte et on peut l'utiliser en toute sécurité.</li><li>• Il est facilement disponible et de bon marché.</li><li>• Il a une grande capacité d'adsorption pour les substances organiques en particulier les solvants.</li></ul>
<b>Inconvénients</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Il est difficile d'enlever les dernières traces d'impuretés sans ajouter une quantité très importante de charbon actif en poudre</li><li>• La détection des pointes de pollution est problématique et sa concentration applicable est limitée.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Durée de vie limitée.</li><li>• Préfiltration : Les carburants dissous et les matières en particules peuvent rapidement encrasser le charbon, nécessitant un prétraitement dans la plupart des cas.</li></ul>

**Source :** [10]

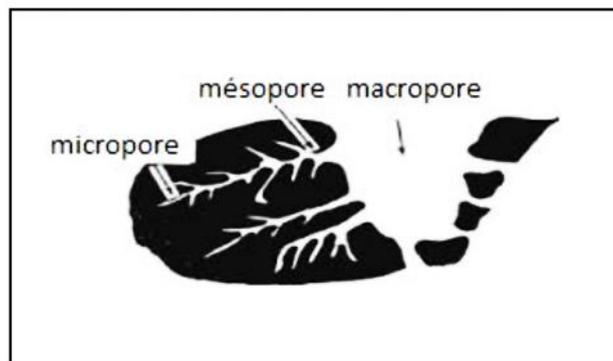
---

## II.6. Structure poreuse [7]

Un charbon actif est un matériau poreux, qui possède des cavités ou des canaux, appelés pores, dont les parois sont responsables d'une augmentation de l'aire spécifique. Un pore est par définition une cavité plus profonde que large, qui existe dans un grain de matière. Un volume poreux ouvert peut être défini à partir du volume d'une substance fluide adsorbée, nécessaire pour saturer tous les pores ouverts d'un gramme de ce solide. Un pore ouvert débouchant à la surface du grain sera accessible au fluide. Ce volume  $V_p$  Selon la classification de l'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), les pores sont répartis en trois groupes :

- Les pores de diamètres supérieurs à 50 nm appelés macropores,
- Les pores de diamètres compris entre 2 et 50 nm appelés mésopores,
- Les pores de diamètres inférieurs à 2 nm appelés micropores.

Les micropores sont divisés en deux sous-groupes : les supermicropores dont la largeur des pores est comprise entre 0,7 et 2 nm et les ultramicropores de largeur inférieure à 0,7 nm.



**Figure 7 :** Représentation schématique de la structure poreuse du charbon actif.

Par définition, la surface spécifique d'un adsorbant est une surface par unité de masse, généralement exprimée en  $m^2.g^{-1}$ , représentant l'aire disponible pour adsorber une monocouche de molécules. Pour le charbon actif, cette aire spécifique est comprise entre 500 et 2500  $m^2.g^{-1}$ . Ce sont essentiellement les micro- et méso- pores qui créent de la surface. Plus la surface d'adsorption est grande, plus la quantité de matière adsorbée est importante. La surface spécifique est obtenue en appliquant la théorie de Brunauer, Emmett et Teller, dite méthode BET, à partir des mesures effectuées par d'adsorption -désorption d'azote à 77K.

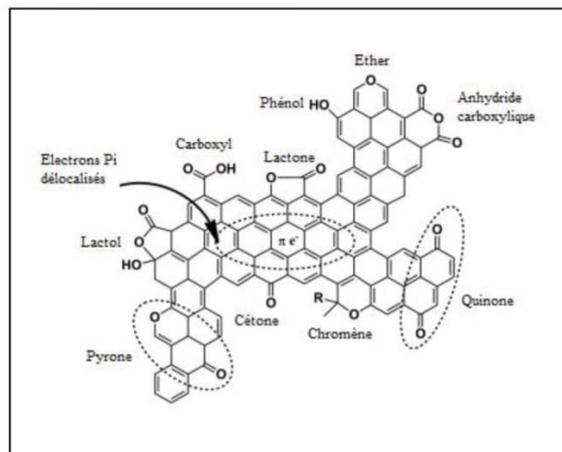
## II.7. Nature chimique de la surface d'un charbon activé [7]

Les fonctions de surface sont introduites lors de l'étape d'activation mais elles dépendent de la composition du précurseur et du mode d'activation. A la surface des charbons actifs on trouve principalement des sites oxygénés et, éventuellement des sites aminés. Si le carbone activé a subi un traitement chimique, d'autres groupes fonctionnels peuvent être introduits spécifiquement. Les groupements oxygénés additionnels sont formés quand le charbon actif est traité avec des agents oxydants en phase gazeuse ou en solution.

Ces traitements créent trois types de sites à la surface : acides, basiques et neutres. Les sites de type acide sont des groupes carboxyliques (Ph-COOH), phénoliques (Ph-OH), carbonyliques (Ph-C=O), anhydrides (Ph-(C=O-O-O=C)), éther (Ph (-O-)Ph'), quinone (O=Ph=O) et lactoniques (PhC=OO-Ph'). Les sites acides rendent le charbon actif plus hydrophile, diminuent le pH en suspension aqueuse et augmentent la densité de charge négative à la surface.

Les sites basiques sont essentiellement du type de Lewis associés à des régions riches en électrons  $\pi$  situées aux plans basaux. Ces derniers représentent les feuillets polyaromatiques constituant la structure du charbon actif. Le processus d'oxydation augmente la proportion en oxygène et, par conséquent, décroît la basicité à la surface.

La caractérisation des propriétés de surface est indispensable pour comprendre l'adsorption des molécules ou ions en solution aqueuse par des carbones activés. Le caractère acide ou basique de la surface d'un carbone activé peut être étudié par une variété de techniques : méthode de Boehm, pH de charge nulle, IRTF (Infra Rouge à Transformée de Fourier), XPS (spectroscopie de photoélectron X) et distribution des pKa.



**Figure 8 :** Fonctionnalité de surface d'un carbone activé

---

## **II.8. Elaboration de charbon actif [8]**

### **II.8.1. Matières premières**

La fabrication du charbon actif passe nécessairement par l'identification et le choix de la matière première. Les matières premières peuvent être obtenues à partir d'un grand nombre de matériaux contenant le carbone d'origine végétale, animale ou minérale.

#### **II.8.1.1. Origine végétale**

Il existe une multitude de produits d'origine végétale qui peuvent intervenir dans la synthèse des charbons actifs et sous différentes formes variées :

- Déchets agricoles non utilisables exemple : Noyaux de fruit, coque de noix de coco, bagasse de canne à sucre
- Paille et enveloppes de céréales exemple : blé et riz
- Arbre sous forme de copeaux ou de sciure de bois exemple : Bouleau, chêne, eucalyptus.

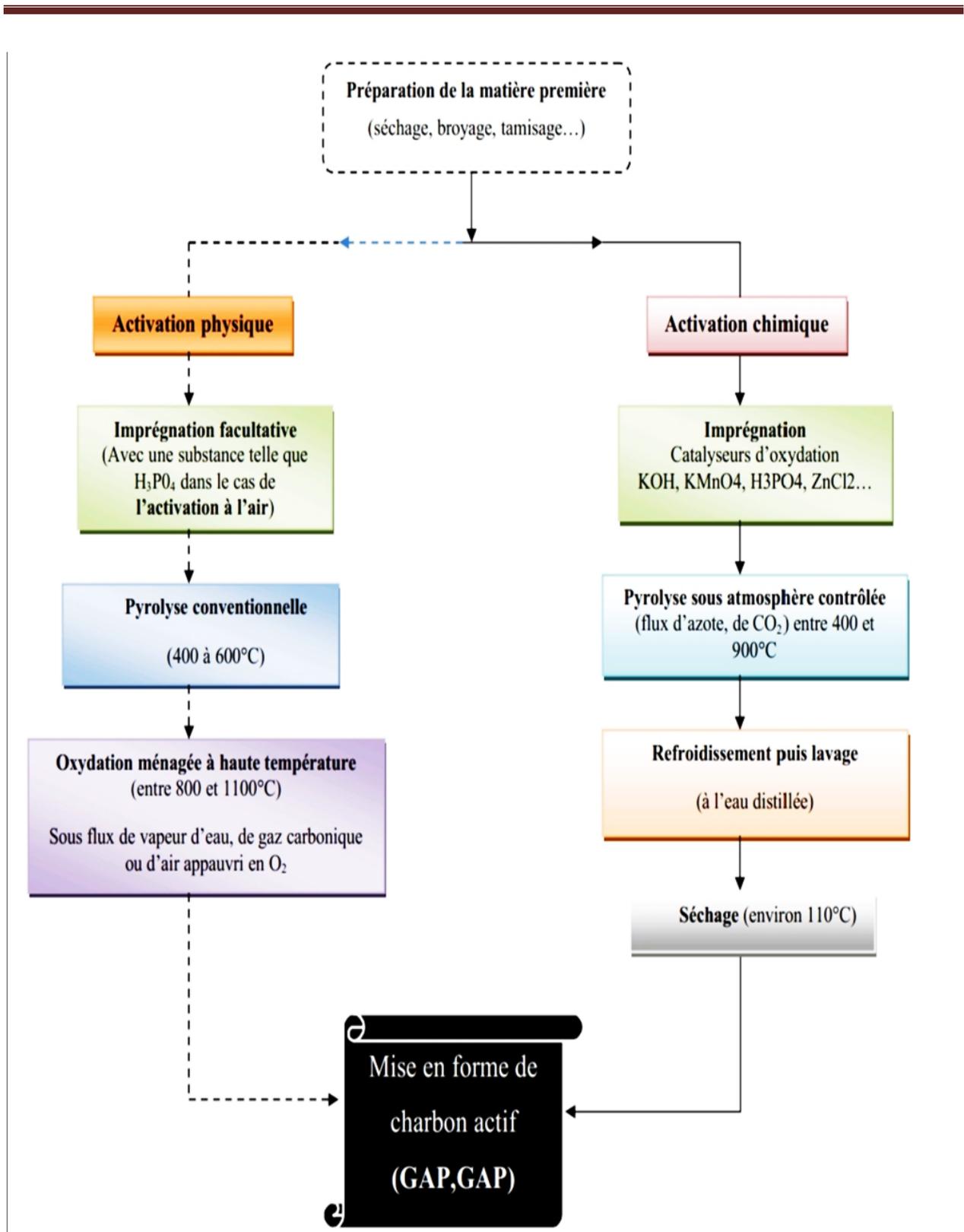
#### **II.8.1.2. Origine animale**

Les charbons activés sont essentiellement obtenus à partir d'ossements d'animaux, mais aussi à partir de leur sang voire de leur chair.

#### **II.8.1.3. Origine minérale**

Les charbons actifs sont obtenus en grande majorité à partir de matériaux combustibles comme le charbon minéral (houille, coke) ou la tourbe.

Les différentes étapes de fabrication de charbon actif se résument dans la figure qui suit :



**Figure 9** : fabrication des charbons actifs

## II.9. Les bienfaits du charbon actif [W1]

Avec le degré de pollution de nos nappes phréatiques par divers produits chimiques et métaux lourds, on n'est pas toujours confiants en buvant de l'eau du robinet. Le charbon actif est une solution naturelle permettant de purifier l'eau du robinet.

---

- **Le charbon actif est un filtre naturel**

Le charbon actif, encore appelé charbon activé est un type de charbon d'origine naturelle qui a subi un processus particulier de préparation. Obtenu à base de toute matière végétale riche en carbone, le charbon actif est produit dans un processus de chauffe appelé « carbonisation » ou « calcination » grâce auquel il sera activé et obtiendra toutes ses propriétés bienfaitrices. À l'état brut, il se présente comme une matière carbonée à structure poreuse.

- **Il est connu et utilisé depuis des millénaires**

Le charbon actif est en effet connu pour sa grande capacité d'absorption et il est utilisé depuis des millénaires dans la filtration de l'eau. Les archéologues ont trouvé l'utilisation du charbon actif en Égypte et en Grèce antique. Il est très souvent commercialisé sous forme de morceaux, de poudre noire, de granulés, de comprimés, de pastilles ou de gélules dans le souci de faciliter ses divers usages.

- **La capacité d'absorption du charbon actif**

L'une des caractéristiques essentielles du charbon actif est sa porosité qui lui permet de retenir dans ses pores les substances qu'il intercepte. La surface développée par le charbon actif est juste incroyable. Imaginez, grâce à sa porosité un seul gramme de charbon actif a une surface spécifique entre 400 et 2 500 m<sup>2</sup> ! Cela permet d'accrocher beaucoup de particules indésirables lors de la filtration d'eau. Il agit comme un aimant en attirant les particules nocives. Cependant, il n'absorbe pas l'eau car il est hydrophobe.

- **Le charbon actif élimine des multiples particules nocives**

Sa vertu essentielle est donc l'absorption des particules toxiques ou indésirables. Que ce soit du chlore libre, des agents organiques, des facteurs de goûts et d'odeurs indésirables, le charbon actif débarrasse votre eau de métaux lourds et des pesticides. Il vous permet d'avoir à la fin une eau plus saine et sans odeur.

- **Le charbon actif : un produit écologique et bon pour la santé**

Filtrer votre eau à l'aide du charbon actif permet d'éliminer la pollution et améliorer le goût de l'eau, tout en filtrant toutes les impuretés. Le charbon actif conserve tous les oligo-éléments et minéraux tels que le magnésium, le potassium, calcium, fer, etc. Une fois utilisé, le charbon actif peut être recyclé vers d'autre usage ! Par exemple pour purifier l'environnement de votre poubelle ou tout autre espace de la maison. Aussi, vous pouvez l'utiliser comme compost pour vos plantes.

---

## Chapitre III : GÉNÉRALITÉS SUR LES BAMBOUS

### III.1. Introduction

Originaire de Chine avant de coloniser le Japon depuis plusieurs millénaires, Le bambou fait partie de la famille des graminées, plus précisément des Poacées. Son aire de répartition s'étend du 40° parallèle au sud et au 40° parallèle au nord de l'équateur. Dans les forêts tropicales, il peut pousser jusqu'à 3000 m d'altitude. Au 19<sup>e</sup> siècle, il arrive en Europe avec les importateurs de soie qui en rapportaient des spécimens pour faire des cadeaux à leurs clients ou pour les planter dans leurs propriétés. En 1911, il existait déjà 230 espèces de bambous en France. Dans le monde, on recense aujourd'hui environ 90 genres de bambous et plus de 2300 espèces [W2].

Depuis les années 1980 et l'ouverture du pays à l'économie de marché, une très grosse industrie de fabrication d'objets en bambou s'est développée autour de différentes villes chinoises dont les principales sont Anji, Maishan, Yong'an et Hangzhou [W3]. Derrière la Chine qui exporte aujourd'hui 70 % des produits en bambou fabriqués dans le monde, des pays comme l'Inde, le Vietnam et l'Indonésie ont ces dernières décennies, eux aussi, développé des filières de production d'objets en bambou [W3]. En Europe, les objets en bambou font maintenant partie de notre vie quotidienne. Nous savons moins que ces produits ont une faible empreinte carbone grâce aux caractéristiques uniques de cette plante [W3].

Le bambou n'est ni un arbre ni un arbuste, mais une herbe. Botaniquement c'est une monocotylédone (plante dont la graine n'a qu'un seul cotylédon), appartenant à la famille de Poacées (graminées), et à la sous famille des Bambusoïdées [W1]. Le bambou est une plante ligneuse qui appartient à la famille des graminées. Il existe plus de 1500 espèces de bambou à travers le monde, situées essentiellement dans les pays à climat tropical à subtropical, couvrant une superficie totale d'environ 35 millions d'hectares [W3].

Le bambou est une plante bien connue, Il s'agit d'une graminée au port arborescent, possédant des tiges ligneuses appelées chaumes. Le bambou est une espèce végétale étonnante. C'est la plante qui pousse le plus vite au monde, En outre, elle peut mesurer plus de 30 mètres de hauteur. Le bambou est également écologique. À poids équivalent, le bambou absorbe 5 fois plus de CO<sub>2</sub> qu'un arbre. Il est également reconnu pour sa grande résistance, et pour sa grande flexibilité [W4]. Le bambou est même capable de pousser en altitude, d'ailleurs, il est présent à plus de 3000 mètres dans la chaîne de l'Himalaya. Si le bambou est une plante asiatique, sachez également qu'elle est indigène d'Amérique, et plus particulièrement en Amérique du Sud [W4].

---

Le bambou est matériau léger, durable et esthétique. Ses caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques ont permis le développement d'applications industrielles dans des domaines aussi variés que la construction, l'ameublement, le papier, le textile ou encore l'agro-alimentaire. Les premières traces de l'utilisation du bambou remontent à plus de 5000 ans en Chine [W3].

La zone de répartition du bambou comprend également Madagascar, l'Afrique, mais aussi l'Australie. Néanmoins, sachez qu'il existe plus d'un millier d'espèces de bambous différentes. En effet, il peut prendre plusieurs aspects en fonction de l'altitude, du type de sol ou du climat. En d'autres termes, le bambou est une plante polymorphe. C'est toutefois en Asie que l'on retrouve le plus d'espèces de bambou différentes, environ 600[W4].

Le bambou peut prendre de très nombreuses teintes. En effet, il peut être vert, noir ou encore jaune. En outre, certaines variétés de bambous peuvent être tachetées, ou même rayées. De ce fait, cette plante est très appréciée pour ses qualités ornementales [W4]. Le bambou a beaucoup d'atout : comme sa rapidité de croissance, la densité de ses feuilles persistantes, mais aussi il contribue à purifier l'air [W1].

Il existe deux types de bambou bien distincts [W3] :

- Les Sympodials qui poussent en touffe et qui sont originaires de régions tropicales tels que les genres *Dendrocalamus* et *Bambusa* [W3].
- Les bambous Monopodials sont eux originaires des régions au climat tempéré et poussent avec un système de racinaire en ryzhome qui peut s'avérer envahissant. C'est le cas des *Phyllostachys*, genre de bambou qui est très plus répandues en Chine.

Les plants de bambou sont auto-générateurs. Après leur récolte, de nouveaux chaumes poussent à partir du même système racinaire [W3]. La moyenne de vie d'une touffe de bambou varie entre 60 et 100 ans selon les espèces. La mort du bambou résulte souvent de la floraison du bambou qui est un évènement rare [W3].



**Photo 1:** Bambou

### **III .2. Les caractéristiques du bambou**

Le bambou, comme nous l'avons mentionné à plusieurs reprises, c'est une plante étonnante de par ses nombreuses caractéristiques. En plus de ses multiples qualités, notamment ornementales, le bambou permet de lutter contre l'érosion des sols, grâce à son réseau de rhizomes. Sa culture nécessite très peu d'énergie, il est donc particulièrement écologique. Mais intéressons-nous à ses propriétés dimensionnelles, et notamment à sa structure [W4].

Considéré comme une « herbe géante » , le bambou a une structure représentée en quatre parties distinctes dont les rhizomes, le turion, le chaume et le feuillage [13].

#### **III.2.1. Le rhizome**

Le rhizome est une tige souterraine horizontale se situant dans les 30 premiers centimètres du sol [W5]. C'est une tige creuse et cloisonnée régulièrement (fistuleux). Les nœuds portent également des bourgeons [W5].

Il s'agit en réalité d'un vaste réseau de tiges souterraines. Ce sont les rhizomes qui fournissent la plante en nourriture. Le rhizome donne naissance à un turion, une pousse souterraine qui donnera elle-même naissance au futur bambou [W4]. Le rhizome c'est la partie la plus primordiale du bambou. En effet, sa croissance doit être toujours une priorité lors des plantations [W6]. Ils permettent à la plante de croître en formant des touffes plus ou moins serrées. Le rhizome est aussi un organe de réserve, il stocke les réserves nécessaires à la croissance spectaculaire des turions (jeunes pousses). Les rhizomes ont besoin d'une terre aérée et perméable pour se développer [W1]. Il se propage sous terre, affleurant de temps à autre à la surface et il est la source du développement des bambous, de la propagation de la plante. Les rhizomes sont l'intermédiaire entre les cannes (chaumes) et les racines secondaires qu'ils produisent tous deux. Selon l'espace disponible, le climat et la constitution du sol, le comportement du rhizome peut fortement changer [W6].

On distingue deux sortes de rhizomes chez le bambou. Le rhizome leptomorphe (bambou traçant) et le rhizome pachymorphe (bambou cespiteux) [W14].

---

### **III.2.1.1. Les rhizomes cespiteux**

Ils sont courts et renflés. Chaque rhizome produit un chaume, les nouvelles cannes se développeront dans la périphérie immédiate du pied. Cette spécificité fait que ces bambous cespiteux ne sont pas envahissant ( les Fargesia sont des bambous de ce genre) [W6].

### **III.2.1.2. Les rhizomes traçants**

Ils sont longs, ils ondulent à l'approche de la surface et peuvent se développer très rapidement, de plusieurs mètres en une saison. Ils s'étendent en lignes avant de donner un nouveau chaume, et ils peuvent également générer d'autres rhizomes, qui provoqueront un réseau racinaire tellement dense, qu'il sera difficile par la suite d'arracher ce genre de bambous (Phyllostachys, Sasa, Plieoblastus) [W6].

### **III.2.2. La feuille**

Le bambou est une plante à feuillage persistant. Les feuilles ont une forme allongées, effilées à la pointe et arrondies à la base. Protégées par une gaine. Les feuilles ont une nervure centrale principale très marquée et des nervures secondaires parallèles. Les feuilles sont très différentes autant par la taille que par la couleur. Certaines sont panachées [W5].Le feuillage du bambou est dense et fourni. Les feuilles possèdent une forme allongée très reconnaissable [W4].

La durée de vie d'une feuille n'excède pas une année. Le bambou change son feuillage en deux périodes sur partie à l'automne et la seconde partie au début du printemps [W5].

### **III.2.3. Le chaume**

Le chaume désigne la tige principale chez les graminées [W2]. Les chaumes sont dépourvus d'écorces, et sont généralement lisses et peuvent en fonction des espèces être de couleurs différentes. Il est aussi appelé canne [W5].

C'est la tige du bambou, la partie creuse permettant de fabriquer des meubles, instruments de musique et autres objets. La tige du bambou peut mesurer jusqu'à 30 mètres de haut. Le chaume possède de nombreuses caractéristiques. En effet, il est flexible et peut se balancer dans le vent sans rompre. En outre, il est particulièrement léger, mais robuste [W4]. Le chaume est un tube creux, cloisonné aux nœuds. La cicatrice visible aux nœuds est la trace de la gaine des feuilles tombées [W2].

Les chaumes sont les tiges aériennes et dressées des bambous, sur lesquelles apparaîtront les branches et les feuilles. En moyenne, la durée de vie d'une canne est de six à dix ans selon les conditions. Ces tiges sont l'atout décoratif des grands bambous surtout les Phyllostachys avec sa grande diversité de couleurs (vert, jaune, noir, panaché, tacheté, rayé fin, épais, en zigzag) [W6].

---

Elles peuvent être noires comme pour le *phyllostachysnigra*, jaunes, vertes ou striées de différentes couleurs comme pour le *phyllostachyscastillonis* [W5].



**Photo 2 :** Différents chaume de bambou

#### **III.2.4. Turion :**

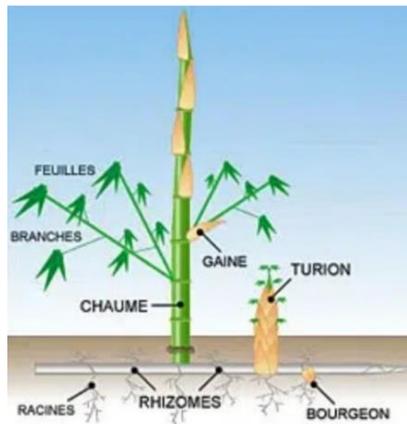
Cette jeune pousse, encore tendre, sort de terre sans branches ni feuilles. C'est cette partie du bambou qui est comestible [W2]. La pousse du bambou est nommée turion. La pousse renferme déjà la tige de bambou en comprimé [W5]. La croissance en est par conséquent très rapide. Certaines espèces dans leur milieu naturel peuvent dépasser 1 m par jour. Dans la région, on a déjà constaté 60 cm par jour. Elles sont généralement comestibles (certaines sont toxiques) [W5].



**Photo 3 :** Turion

#### **III.2.5. Les racines secondaires**

Les racines secondaires ont juste un rôle : c'est d'aller chercher l'humidité dont le bambou nécessite pour croître. Elles ne produisent aucun nouveau chaume. Elles se développent en couronne autour des nœuds des rhizomes.



**Photo 4:** Culture du bambou

### III.2.6. Les gaines de chaumes

Le chaume est entouré de gaines jusqu'à sa pleine croissance et porte des rameaux garnis de feuilles des dimensions variables qui se renouvellent régulièrement en cas de froid ou sècheresse [W6].

La fonction des gaines est de protéger le chaume lors de sa croissance. À chaque entre nœud correspond une gaine. Le chaume abandonne ses gaines lorsque sa croissance est terminée [W5].

Le feuillage du bambou est persistant et reste vert toute l'année [13]. Ces gaines sont bien visibles. Pour le jardin, elles seront très décoratives car elles sont très colorées. Elles sont d'un très grand intérêt pour les jeunes pousses car ce sont elles qui procurent leurs couleurs si caractéristiques [W6]. Elles peuvent posséder une teinte crème, ou une couleur rouge, verte. Pour la plante, elles serviront de protection aux chaumes. Elles permettent d'identifier les espèces [W6].

### III.3. Floraison du bambou

La floraison peut conduire à la mort du bambou. Le phénomène de floraison est encore mal connu [W5]. Il existe des floraisons sporadiques (un seul sujet), semblant répondre à un cycle de floraison (pouvant s'étendre sur des dizaines d'années), et des floraisons grégaires concernant l'ensemble de l'espèce ou de la variété sur l'ensemble du globe (une telle floraison peut s'étaler sur 5 à 7 ans) [W5].

Alors que la plupart des végétaux fleurissent régulièrement chaque année, les bambous restent de longues années sans développer la moindre fleur [14].

Le record est détenu par le bambou à tiges noires, dont la dernière floraison remonte à 1920 [14]. Lorsqu'un bambou fleurit, sa floraison peut être soit individuelle, c'est-à-dire ne se manifeste que sur un ou quelques plantes de l'espèce ou de la variété.

---

On dit alors que la floraison est ‘sporadique’ soit collective, ce qui signifie que tous les plants d’une lignée de la même espèce ou variété fleurissent en même temps quel que soit leur situation géographique et les conditions climatiques sous lesquelles ils vivent. Cette floraison est dite ‘grégaire’. Après cela les chaumes se dessèchent et meurent après avoir fleuri [6].

Constatée maintes fois, la simultanéité de floraison n'a pas encore été scientifiquement expliquée. Une des hypothèses serait une mémoire génétique, une information contenue dans l'ADN du bambou et différente selon chaque variété. Les fleurs, plutôt rares, apparaissent à l'aisselle des feuilles, aussi bien sur des tiges jeunes que sur des tiges âgées. Elles sont groupées en épillets [6].

### **III.4. Croissance et propriétés du bambou**

#### **III.4.1. Croissance**

Les bambous ont la croissance végétale la plus rapide au monde. Pendant la saison des pluies, les chaumes de bambou poussent jusqu'à 45 cm par jour et atteignent leur pleine hauteur (jusqu'à 20-25 m selon les espèces) en l'espace de quelques semaines [W3]. Selon les variétés, le bambou absorbe pendant sa croissance entre 96 et 392 tonnes de CO<sub>2</sub>/ha/an soit 30 à 35 % plus de CO<sub>2</sub> que les forêts de feuillus. Il produit également 30 % d'oxygène de plus que la moyenne des arbres [W3].

Généralement, le bambou repousse toute seule sans l'intervention humaine et peut atteindre une taille adulte en 100 jours. Cette régénération naturelle s'effectue grâce à son système racinaire. Son cycle biologique est déterminé par l'intervalle qui sépare la germination des graines et la floraison voire la mort de la plante, variant entre 20 et 120 ans [13].

#### **III.4.2. Propriétés du bambou**

Les caractéristiques technologiques diffèrent selon l'espèce, néanmoins que toutes les espèces présentent la particularité de se travailler comme le bois [13]. Outre que son élasticité, la fibre de bambou possède une résistance élevée<sup>1</sup> que le bois et le fer de construction. Et grâce à sa teneur importante en silice, le bambou a un pouvoir calorifique<sup>2</sup> (PCI) élevé que la plaquette de bois, ce qui le rend intéressant pour la production d'énergie renouvelable comme le charbon et le bioéthanol [13].

Le bambou est sensible aux attaques d'insectes et au développement de moisissures, mais uniquement lorsqu'il est en contact avec de l'eau ou de l'humidité. De ce fait, il ne peut être envisagé dans la construction de mobilier de jardin. La durée de vie en milieu humide d'un bambou non traité est seulement de 1 à 3 ans, alors qu'à l'intérieur, dans un climat peu humide, sa durée de vie est de 10 à 15 ans [W3].

---

### **III.5. Répartition géographique du bambou**

Les bambous sont largement répandus dans le monde, de la zone tempérée à la zone tropicale, même si la majeure partie de ses espèces sont principalement originaires d'Asie et d'Amérique. Ils se développent naturellement sur tous les continents, excepté l'Europe, et se sont adaptés à une multitude de climat et font partie d'écosystèmes très variés. Certaines espèces, d'environ une vingtaine, sont aussi natives d'Afrique et d'Océanie [13]. Quelques rares espèces sont spontanées en Afrique continentale et en Océanie. Aucune n'est spontanée en Europe. Leur aire de répartition a connu une forte progression par la culture [6].

### **III.6. Bienfaits environnementaux**

Les forêts de bambous sont des réservoirs de biodiversité importants. Des espèces animales menacées d'extinction comme le Panda et l'Hapalémur gris de Madagascar se nourrissent quasi exclusivement de jeunes pousses de bambou [W3].

Une plante qui régénère les sols, Le bambou peut pousser sans l'aide d'engrais ni de pesticides, sur des sols pauvres en nutriments et également dans des régions arides où les sécheresses font échouer les autres cultures [W3].

Les feuilles des bambous qui tombent régulièrement permettent de fertiliser naturellement le sol en formant un compost naturel [W3].

Grâce à son système de rhizome qui trace à faible profondeur, le bambou est utile pour empêcher l'érosion des sols lorsqu'il est planté dans le long des berges et sur les flancs de coteaux raides. Chaque touffe de bambou peut retenir en moyenne 6 m<sup>3</sup> de terre [W3].

Capables d'absorber les métaux lourds présents dans le sol, des variétés de bambou sont utilisées pour régénérer des sols dégradés par l'extraction minière. Certaines espèces et peuvent également être utilisées pour filtrer naturellement les eaux usées [W3].

### **III.7. Le bambou source de bioénergie**

De nombreux pays en voie de développement sont touchés par la déforestation dont la principale cause est l'utilisation du bois et du charbon de bois comme source d'énergie pour les besoins quotidiens [W3]. Grâce à sa croissance rapide et sa régénération annuelle, le bambou transformé en charbon est une source d'énergie alternative et renouvelable qui réduit la pression sur d'autres ressources forestières et réduit ainsi la déforestation [W3].

Une étude estime que l'Afrique subsaharienne a le potentiel de production annuelle d'environ 9 millions de tonnes de charbon de bambou, ce qui pourrait potentiellement remplacer 64% de la consommation de charbon de bois [W3].

---

Enfin, contrairement au charbon de bois, le charbon de bambou ne dégage pas de fumée lors de sa combustion et donc limite les maladies pulmonaires [W3].

### **III.8. Les utilisations du bambou**

Aujourd'hui, l'utilisation du bambou prend de plus en plus de l'ampleur dans le monde avec la Chine comme leader [13]. De multiples usages avec plus de 1500 utilisations connues ; le bambou est utilisé particulièrement dans la construction [13], En effet, il permet la conception d'échafaudages, en raison notamment de sa grande solidité et de sa légèreté [W4], la menuiserie, le design, la papeterie, le textile, la phytothérapie, l'alimentation, la phytoremédiation et la production de biomasse [13].

Désormais, le travail du bambou n'est plus au stade de l'artisanat ; il fournit à présent une matière première pour le secteur industriel [13]. Les processus de transformation et de fabrication sont spécifiques et diffèrent selon les produits voulus [13].

Bien sûr, le bambou permet de fabriquer des meubles divers et variés, mais aussi du parquet, et même de petites maisons [W4]. Les architectes optent de plus en plus pour le bambou dans la conception de ponts, de revêtements externes, et même de pilotis ou de cloisons. Grâce à ses nombreuses propriétés, le bambou permet de concevoir une multitude de structures [W4]. Nous pouvons citer d'autres usages du bambou, comme la fabrication de pâte à papier. D'ailleurs, les Chinois maîtrisent depuis plusieurs siècles cette technique. On retrouve également de nombreux instruments en bambou, comme les flûtes notamment, et même les orgues [W4].

Les fibres de bambou sont employées quant à elles dans la fabrication de vêtements. En effet, le secteur textile est particulièrement friand de cette matière, qui est par ailleurs antibactérienne et extrêmement absorbante [W4]. Elle assure donc un grand confort et est appréciée des consommateurs [W4].

### **III.9. Importances socio-économiques et écologiques du bambou [13]**

Grâce à sa croissance très rapide et sa multifonctionnalité, le bambou représente un potentiel économique considérable en acquérant une place importante dans le commerce international. Sous forme de chaume ou de produit fini, le bambou représente une valeur d'échange de 2 milliards de dollar par an. En incluant son utilisation comme un moyen de subsistance, cette valeur change est de plus de 4,5 milliards de dollar par an. Dans certains pays les plus tributaires de bambou, il est exploité à l'échelle industrielle, à l'exemple de l'industrie papeterie en Inde.

Du côté social, de nombreux ménages dépendent du bambou en leurs fournissant des produits-clés de subsistance et de revenus. Utilisé directement après la récolte ou sous-forme transformé, le bambou sert à une foule d'usages dans de nombreuses régions du monde.

---

Sur le plan environnemental, les bambous sont aussi appréciés pour leurs vertus écologiques, les bambous jouent un rôle dans le contrôle de l'érosion du sol, la conservation d'espèces endémiques, l'épuration des ressources en eaux, la réhabilitation des terres agricoles et l'atténuation du changement climatique en séquestrant<sup>3</sup> de plusieurs façons le carbone.

### III.10. Classifications [6]

#### III.10.1. Classement botanique

La classification que l'on pourrait qualifier de scientifique est celle des botanistes. Ce sont eux qui donnent un nom à chacun les rattachant à un genre, à une espèce, puis à une variété, un cultivar ou une forme, cette classification repose en grande partie sur l'organisation du système floral. Non seulement elle est assez complexe chez les bambous, mais, en outre, les caprices de leur floraison font qu'il est difficile, voire impossible parfois de les observer.

Les bambous appartiennent à la famille des Graminées. Les 520 espèces connues correctement sont classées en 42 genres différents, parmi lesquels sont cultivés en Europe, notamment, les *Arundinaria*, *Dendrocalamus*, *Fargesia*... Les genres *Phyllostachyset Sasas* sont très représentés parmi les bambous d'ornement.

#### III.10.2. Classement par types

Sans entrer dans le détail de la nomenclature des bambous, nous ferons la différence entre deux types bien distincts par leur mode de développement :

- **Les bambous cespiteux**

Ils restent en touffes plus ou moins compacte. Les rhizomes pachymorphes ont pour devise « Allons voir là-haut s'il fait beau » : croissance verticale.

- **Les bambous traçants**

Ils ont tendance à s'étendre en surface. Les rhizomes leptomorphes ont pour devise "toujours droit devant" : croissance souterraine. On constate qu'en générale les bambous tropicaux sont cespiteux et les bambous tempérés sont traçants.

#### III.10.3. Classement par taille

Ce classement est purement horticole car il ne peut être rigoureux. On y distingue :

- Les bambous nains : < 1,50m,
- Les petits bambous : 1,50 – 3 m,
- Les bambous moyens : 3 - 9 m,
- Les bambous géants : > 9 m

---

### III.11. Bambous *dendrocalamus asper* [W7]

- **Famille :** Poaceae (Gramineae)
- **Synonymes :** *Gigantochloa aspera*
- **Noms vernaculaires:** *Bambou géant* (Fr). *Giantbamboo, rough giant bamboo, sweet bamboo* (En)

#### III.11.1. Origine et répartition géographique

L'origine de *Dendrocalamus asper* est incertaine, mais elle se situerait en Asie du Sud-Est. *Dendrocalamus asper* est planté dans toute l'Asie tropicale et a été introduit dans d'autres pays tropicaux, notamment au Ghana, au Bénin, en R.D. du Congo, au Kenya et à Madagascar [W7].

*Dendrocalamus asper*, appelé aussi parfois *Bambusa aspera*, le bambou *asper* est un bambou géant, une plante arborescente appartenant pourtant à la famille des graminées, les Poacées. Son origine, bien qu'asiatique et tropicale, est incertaine, ou du moins imprécise car le bambou géant *asper* est largement cultivé, aussi bien pour ses tiges solides, utiles en construction que pour ses jeunes pousses comestibles.

C'est également une remarquable plante ornementale pour les zones les moins gélives, avec ses tiges denses et bien droites, si épaisses [W8]. *Dendrocalamus asper* est un bambou géant non traçant très utilisé dans la construction, car la paroi de ses chaumes est très épaisse. D'un point de vue général, tous les *Dendrocalamus* sont de toute façon des bambous géants non traçants : *D. latiflorus*, *D. sinicus*, *D. membranaceus*, *D. strictus*, *D. hamiltonii* [W9].

#### III.11.2. Description du *Dendrocalamus asper*

*Dendrocalamus asper* est un bambou tropical géant très utilisé à des fins commerciales dans certaines régions du monde. Ses pousses sont comestibles et appréciées pour leur douceur, et ses chaumes ont des qualités mécaniques idéales pour la construction [W9]. La paroi de ses chaumes est plus épaisse (3 cm +) que d'autres bambous tropicaux tels que les espèces du genre *Gigantochloa* et *Bambusa*, ce qui en fait un bambou tropical de premier choix pour la construction [W9]. Lorsqu'une petite plante est bien installée et arrosée, les tiges pourront atteindre 1 à 2 cm d'épaisseur dans leur première année, puis 2,5 à 4 cm de diamètre l'année suivante, et enfin jusqu'à 9 cm de diamètre la 3e ou 4e année. *Dendrocalamus asper* ne fait ses tiges les plus épaisses qu'à partir de 5 à 6 ans de culture, moment où l'on pourra ponctionner éventuellement une ou deux jeunes pousses pour les déguster (il faudra toujours en laisser un minimum de 4 nouvelles par an) [W8].

---

Les chaumes de *Dendrocalamus asper* sont robustes et peuvent peser entre 60 kg et 80 kg. Sur 1 hectare de *Dendrocalamus asper*, il est possible de récolter plus de 50 tonnes de biomasse sèche par an [W9]. Bien qu'un peu moins imposant que *Dendrocalamus gigantea*, le bambou géant asper est parmi les bambous les plus imposants. Ses cannes atteignent, sur un plant mature, jusqu'à 12 m de hauteur, pour un diamètre de 8 à 20 cm. Les cannes sont libres de ramification sur les premiers mètres, et poussent très serrées les unes contre les autres sur le rhizome souterrain.

*Dendrocalamus asper* forme un bosquet de fortes tiges cespiteuses, dénudées, montrant ainsi les entrenœuds inférieurs lorsque les gaines chutent. Ceux-ci sont longs de 10 à 20 cm, séparés par des nœuds renflés, ils présentent parfois des racines aériennes. Les jeunes tiges sont vertes puis gris-brun à maturité, sauf la variété '*BetungHitam*', qui devient presque noire au bout de 4 ans [W8]. Les ramifications n'apparaissent qu'au niveau des nœuds supérieurs [W8].

Les feuilles persistantes, alternes et simples, mesurent jusqu'à 60 cm avec un limbe étroit de 7 cm pour une longueur de 50 cm [W8].

Les fleurs apparaissent sur un cycle long de 60 à 120 ans. La plante est monocarpique et fleurit presque simultanément partout dans le monde une fois par siècle pour mourir ensuite. La multiplication sexuée est donc rare, et la variabilité génétique pauvre, bien que l'espèce soit très répandue par division végétative [W8].

Le bambou géant *asper* est une espèce de régions relativement chaudes et arrosées. Il résiste aux gelées jusqu'à -4°C, et pourra ainsi être cultivée en zone méditerranéenne protégées, à l'aide d'arrosages réguliers. Il apprécie un sol riche, dont la nature importe peu, si ce n'est qu'il faudra enrichir un sol trop compact avec de la matière organique, par exemple avec du fumier qui fera un excellent engrais naturel [W8]. Il est planté ou divisé au printemps, au moment de la reprise des rhizomes. Durant sa première année de culture, il demande des arrosages très suivis. Une fois bien implanté, il peut supporter quelques manques d'eau, mais qui provoqueront un arrêt de la croissance des tiges en cour, jusqu'aux apports hydriques suivants. Les amendements en matières organiques seront toujours les bienvenus.

Même si une fois mature, les nouvelles tiges de ce bambou géant croissent d'une douzaine de mètres en une année, son développement est assez lent. L'espèce n'est pas considérée comme envahissante, elle n'est pas traçante et ne risque pas d'émerger 10 m plus loin de là où elle a été plantée. Cependant une fois mature, le pied s'épaissit peu à peu, et vu la force des tiges, il est capable de détruire les aménagements les plus proches : il faut donc lui laisser de l'espace alentour [W8].

---

Enfin, les jeunes chaumes de *Dendrocalamus asper* ont montré des qualités intéressantes pour une application industrielle en fort développement : L'utilisation de la fibre de bambou comme agent de texture dans les produits transformés. En effet, le chaume du bambou est riche en fibres surtout la première année de sa sortie. Ces fibres peuvent être extraites sous forme de farine, qui peut ensuite être utilisée dans l'industrie agro-alimentaire pour améliorer la texture des aliments. La « farine de bambou » est ainsi déjà utilisée dans les aliments sans gluten par exemple [W9].

### III.11.3. Variétés ou espèces intéressantes [W8]

29 espèces dans le genre

- *Dendrocalamus gigantea*, le plus grand des bambous
- *Dendrocalamus minor*, une petite espèce très droite
- *Dendrocalamus brandisii*, aux grandes feuilles
- *Dendrocalamus asper* 'Betung Hitam', une variété aux cannes sombres

### III.11.4. Usages

Au Bénin, les tiges sont utilisées en construction et comme support d'antennes de télévision. En Asie, les tiges adultes servent pour la construction, la fabrication de meubles, de planches, d'instruments de musique, d'ustensiles pour la maison, l'artisanat, les tangons des bateaux de pêche et pour la fabrication de papier, les entrenœuds supérieurs servant de récipients et pour la cuisson. Quant aux jeunes et tendres turions, ils sont consommés comme légume [W7].

### III.11.5. Propriétés

Les tiges ont des parois épaisses et elles sont très solides et durables. à 8% d'humidité, la densité des parois est de 0,7–0,8 g/cm<sup>3</sup>. à 15% d'humidité, le module de rupture est de 103 N/mm<sup>2</sup>, la compression axiale de 31 N/mm<sup>2</sup> et le cisaillement de 7 N/mm<sup>2</sup> [W7].

Les dimensions moyennes des fibres de la tige sont : longueur 3,8 mm, diamètre 19 µm, largeur du lumen 7 µm, épaisseur de la paroi 6 µm. La composition chimique de la tige est approximativement : holocellulose 53%, pentosanes 19%, lignine 25% et cendres 3% [W7].

La solubilité est de 4,5% dans l'eau froide, de 6% dans l'eau chaude, de 1% dans l'alcool-benzène, et de 22% dans une solution de NaOH à 1% [W7].

La partie comestible des jeunes turions est d'environ 34%, ils pèsent en moyenne 5,4 kg avant d'être pelés et 1,8 kg après l'avoir été. Ce sont les turions de *Dendrocalamus asper* qui passent pour les meilleurs de toutes les pousses de bambous d'Asie tropicale. Ils supportent bien la mise en conserve [W7].

---

### **III.11.6. Ecologie**

En Asie tropicale, *Dendrocalamus asper* est planté ou naturalisé jusqu'à 1500 m d'altitude. C'est cependant à 400–500 m d'altitude, dans des zones où la pluviométrie annuelle moyenne est d'environ 2400 mm, qu'il prospère le mieux. *Dendrocalamus asper* pousse sur tout type de sol, mais il préfère les sols lourds bien drainés [W7].

### **III.11.7. Perspectives**

*Dendrocalamus asper* pousse rapidement et donne de longues tiges. Il pourrait remplacer le bois en Afrique tropicale, par exemple comme source de matériau de construction, pour la fabrication de pâte à papier et comme combustible. En tant que matériau de construction, il faut impérativement le protéger efficacement contre les attaques de vrillettes. Parmi les domaines qui nécessitent des recherches plus poussées, citons la multiplication et la conduite de la culture [W7].

## **PARTIE II : MATERIELS ET METHODES**

---

## Chapitre IV : LES MATERIELS UTILISES

Il s'avère nécessaire de présenter au préalable les matériels et leurs rôles respectifs dans la production. Ainsi ce chapitre sera axé sur la description des différents matériels de laboratoire utilisés pour la transformation du bambou en charbon combustible et charbon actifs ainsi que ceux destinés pour leur classification et caractérisation.

### IV.1. Description des matériels rôles respectifs

- **Un pyrolyseur électrique**

#### Rôles

Il est utilisé pour effectuer la carbonisation lente du bambou.



**Photo 5 : Pyrolyseur électrique**

- **Flacons en verre**

#### Rôles

Servent à Collecter les jus pyroligneux issus des différents essais effectués avec le pyrolyseur électriques et le distillateur à voie sèche.



**Photo 6 : Flacons en verre**

- 
- **Une clef**

### **Rôles**

Assure la fermeture et ouverture du pyrolyseur



**Photo 7 : Clef**

- **Un distillateur à voie sèche (réacteur d'activation)**

Pour l'activation du charbon actif, le matériel de laboratoire utilisé est le réacteur d'activation ou distillateur à voie sèche alimenté.

Le modèle de distillateur à voie sèche, objet de ce travail de recherches et des essais d'expérimentation au laboratoire est constitué d'un assemblage de divers éléments tels que le fourneau, le creuset, le cône conduite d'air, le ventilateur électrique et une colonne de distillation et qui se présente comme suit :



**Photo 8 : Distillateur à voie sèche**

---

Le distillateur à voie sèche est constitué par :

➤ **Le four de distillation**

Le four de distillation sert à chauffer le mélange que l'on veut distiller, celui-ci est alimenté par du charbon.



**Photo 9 : Fourneau**

➤ **Cône de ventilation**

Un cône a été conçu pour canaliser l'air dans l'orifice du fourneau.



**Photo 10 : Cône d'aération**

➤ **Une colonne de distillation**

A la base, le creuset sert de retenir la matière première. Il est couvert par la colonne de distillation muni d'un tube en acier inoxydable servant la récupération du distillat par sa partie supérieure surmontée d'un petit tuyau également en acier inoxydable.



**Photo 11 : Colonne de distillation munie d'un creuset**

---

➤ **Un souffleur**

Le souffleur accélère le chauffage nécessaire à la carbonisation de la matière première en soufflant dans la partie réservée au charbon de bois servant de combustible.



**Photo 12 : Souffleur**

- **Thermomètre infrarouge**

Le thermomètre infrarouge est utilisé pour repérer l'évolution de la température afin de pouvoir la régulariser dans le mieux possible.



**Photo 13 : Thermomètre infrarouge**

- **Une balance électronique**

La balance sert à effectuer les différentes pesées durant les travaux d'expérimentation ;



**Photo 14 : Balance électronique**

---

- **Charbon de bois**

Le charbon de bois est ici utilisé comme combustible pour chauffer le creuset.



**Photo 15 :** Charbon de bois

#### **IV.2. Matériels pour la classification des charbons actifs**

- Mortier et pilon en granite



**Photo 16 :** Mortier et pilon en granite

**Rôles :**

Broyages manuels du charbon actif.

- Passoire



**Photo 17 :** Passoire

**Rôles :**

Tamiser les charbons actifs afin de les classer.

---

### IV.3. Matériels pour la caractérisation expérimentale des charbons actifs

- Deux flacons en verre

#### Rôles :

Les flacons en verre sont utilisés pour contenir les solutions qui servent à tester la capacité d'adsorption et surface spécifique du charbon actif.

- Solution résidu venant d'un distillateur d'alcool



**Photo 18 :** Solution résidu d'un distillateur d'alcool

### IV.4. Matériels pour la détermination des caractères physico-chimiques

- Etuve

#### Rôles :

L'étuve est le matériel utilisé pour la détermination de la masse de la matière sèche de l'échantillon et par suite de calculer l'humidité, cette étuve possède les caractéristiques suivantes : une température nominale de 220°C, une tension de 230 V, une fréquence de 50/60Hz et une puissance de 0,80 kW.



**Photo 19 :** Etuve

---

- **Fours à moufle**

**Rôles :**

Le four à moufle permet de réaliser une étude expérimentale de l'analyse à très forte température. Elle peut atteindre jusqu'à 850°C, il ne peut contenir que six creusets au maximum. Les échantillons ont été mis dans un four afin d'en déduire leur teneur en matières volatiles et en cendre. Un four à moufle CarbolyteR38.



**Photo 20 :** Fours à moufle

- **Des creusets et couvercles**

**Rôles :**

Les creusets serviront de contenir les échantillons à analyser. Tout comme les petits couvercles, bien qu'ils paraissent si fragiles, ils peuvent résister à des chaleurs de très hautes températures.

Ces petits couvercles serviront de couvertures pour couvrir les creusets en cas de besoin, selon le mode opératoire adopté. Ils ont des propriétés spécifiques de pouvoir résister à des températures variées, bien qu'elles soient très élevées.



**Photo 21 :** Creusets et ses couvercles correspondants

---

- **Dessiccateur**

**Rôles :**

Le dessiccateur est un outil nécessaire au refroidissement des creusets contenant les échantillons lors de leurs sortie dans le four à moufle après avoir été chauffés à une température très élevée. Sa capacité est limitée à six creusets.

Le dessiccateur utilisé contient une matière absorbante (gel de silice, alumine, chlorure de calcium, anhydride phosphorique) assurant la dessiccation de l'air.



**Photo 22 :** Dessiccateur

- **Balance de précision**

**Rôles :**

Cette balance nous a permis de donner plus de précision possible lors des pesées des échantillons durant la détermination des caractères physico-chimiques. L'exactitude est nécessaire et exigée pour assurer de ne pas fausser les résultats.



**Photo 23 :** Balance de précision

- 
- Une pince à creuset et un plateau isolant

**Rôles :**

Le pince à creuset sert à introduire et ou à faire sortir les creusets soit dans l'étuve, soit dans le four à moufle. Elle évite surtout de se faire brûler au contact direct de ces appareils.



**Photo 24 :** Pince à creuset et un plateau isolant

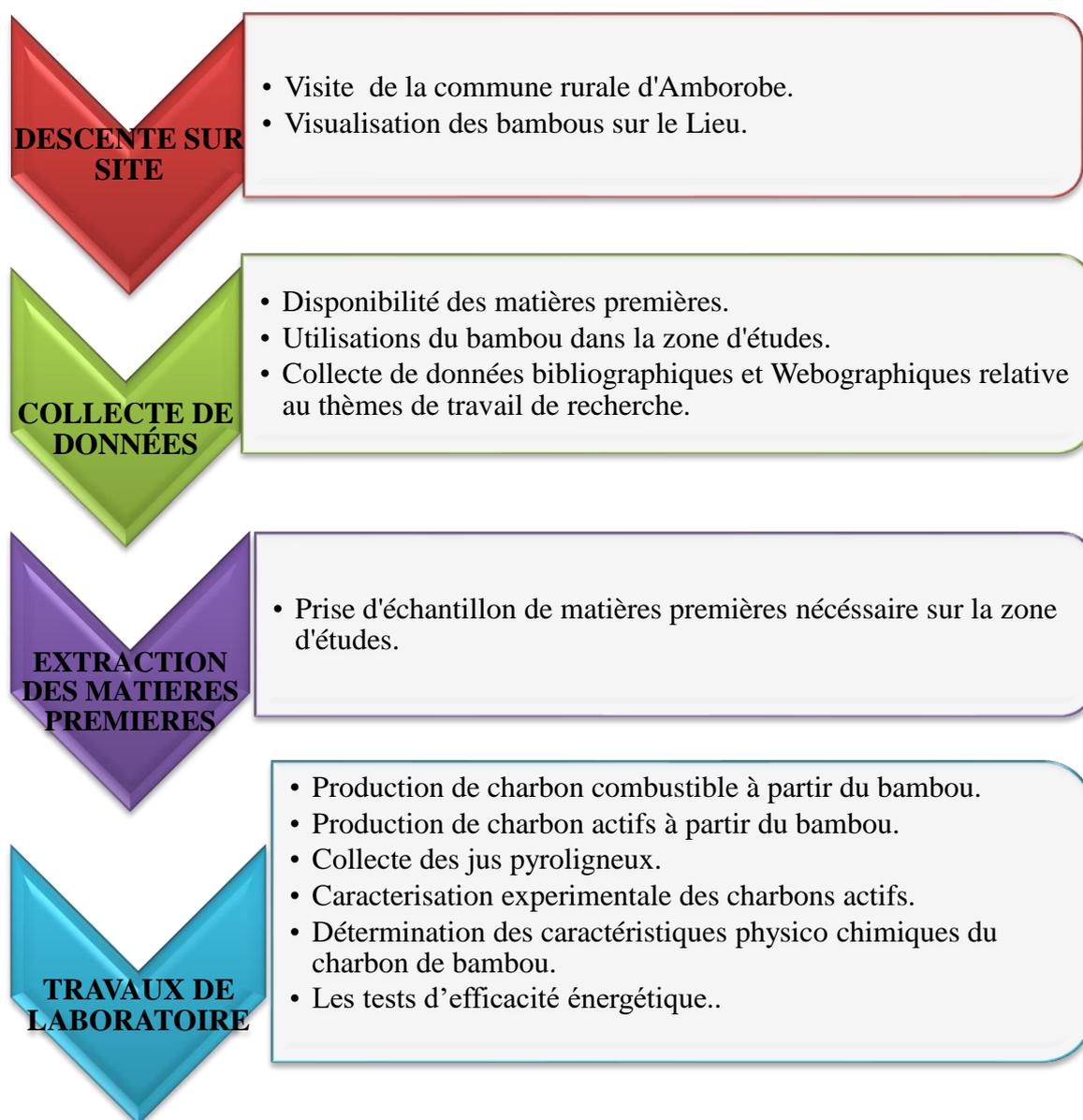
---

## Chapitre V : METHODES

L'objectif principal de cette étude étant «la production de charbon combustible et charbon actifs à partir du bambou ». Ce chapitre décrit les méthodes de transformation du bambou en charbon combustible et charbon actifs.

### V.1. La méthodologie de recherche

Avant de passer aux travaux de laboratoire quelques étapes de recherches indispensables à la concrétisation de ce travail ont été menés, D'abord, la descente sur site pour la collecte de données et prise d'échantillon de matières premières sans oublier les collectes de données bibliographiques et webographiques. La méthode est représentée par la figure ci-dessous :



**Figure 10** : Représentation simplifiée de la méthodologie de recherche adoptée

---

## V.2. Présentation de la zone d'études : commune rurale d'Amborobe

Cette partie va nous permettre de procéder à la localisation de notre lieu d'étude et de prendre connaissance avec les ressources naturelles.



**Photo 26 :** Commune Rurale d'Amborobe

(Source : Auteur)



**Photo 25 :** plaque de la commune d'Amborobe

situé sur la RN12, (source : Auteur)

### V.2.1. La présentation de la zone

#### V.2.1.1. Localisation

La commune rurale d'Amborobe est située dans la partie Sud Est de Madagascar, elle appartient au district de Vohipeno province autonome de Fianarantsoa, qui fait partie de la région de Fitovinany, sur le fleuve de Matitanana. Cette commune est située le long de la RN12 à 9km au Nord de Vohipeno et se place à 33 km de Manakara sur la route nationale vers Farafangana.



**Figure 11 :** Localisation géographique d'Amborobe (source : mapcarta.com)

---

### **V.2.1.2. La délimitation géographique**

Elle est délimitée au Sud par le district de Farafangana distant de 73 km, à l'ouest par celui de Vondrozo et à l'Est par l'Océan Indien. Il est traversé par la route nationale RN12 dont son origine est Alakamisy Ambohimia et son terminus est à Vangaindrano [15].

Elle est située sur la latitude  $-22,27335^{\circ}$  ou  $22^{\circ} 16' 24''$  Sud, la longitude  $47,86487^{\circ}$  ou  $47^{\circ} 51' 54''$  Est et l'altitude 31 mètres (102 pieds) [W10].

### **V.2.1.3. La délimitation administrative**

La commune rurale d'Amborobe est rattachée administrativement à la région Fitovinany. . Elle est subdivisée en 3 Fokontany et 1 Hammeau dont :

- Amborobe centre
- Salohy
- Fanoa
- Beronono (Hammeau)

## **V.2.2. La description du milieu d'étude**

### **V.2.2.1. Climat**

Le climat de la région est chaud et humide : les vents alizés viennent se heurter à la falaise provoquant des précipitations abondantes. La pluviométrie annuelle varie entre 2 426 mm et 2 745 mm [16]. La température moyenne est de  $26,8^{\circ}\text{C}$ . Le mois le plus chaud est celui de Janvier et le plus frais est le mois d'Août [14].

Le climat est marqué par l'alternance d'une saison chaude (octobre à mai) et d'une saison fraîche (juin à septembre). La saison pluvieuse est plus marquée entre les mois de décembre et mars ou avril. Cette saison pluvieuse correspond à la période cyclone qui frappe Madagascar chaque année [15].

Par observation des différentes pluviométries journalières pendant vingt ans, ainsi que les observations et les mesures faites de décembre 2007 à Juillet 2008, il a été constaté qu'il n'y a pas de période sèche dans la zone d'étude [14]. On peut quand même distinguer deux périodes pluvieuses très remarquables, la période cyclonique de janvier à mars et la période pluvieuse de juin-juillet [14]. Notons que la pluviométrie journalière de juin- juillet peut être alignée aux hauteurs de pluie observée pendant la saison des pluies de janvier-février [14].

### **V.2.2.2. Végétations :**

La végétation est plus ou moins abondante et verdoyante. La végétation de la région est surtout composée de ravalala, de sous-bois, de savanes herbeuses et de bambous dans les bassins versants.

---

## **V.2.3. Les études socio-culturelle et économique de la commune**

### **V.2.3.1. La ressource humaine**

La population dans le district de Vohipeno s'appelle Antaimoro. Les habitants d'Amborobe sont des immigrants venant de Vohibolo d'origine Antaimoro, ils se sont installés à Amborobe par conquête de rizière vers les années 1947. La population de la commune d'Amborobe était de 4586 habitants en 2018 [W11].

### **V.2.3.2. La ressource économique**

#### **V.2.3.2.1. L'élevage :**

L'élevage n'est qu'une activité secondaire des paysans. Il n'y a que quelques centaines de têtes de poules sur le bassin versant, une vingtaine de têtes de bœufs, quelques têtes de volailles (canards, oies, oiseaux de barbaries). Personne ne fait l'élevage porcin à cause des tabous. Cette activité reste traditionnelle.

Les principaux problèmes liés à l'élevage sont également les vols des poussins par les oiseaux rapaces et aussi les maladies.

#### **V.2.3.2.2. L'agriculture :**

La spéculation et la principale activité agricole de cette population reste la culture du riz. Les paysans cultivent également du riz, ils affirment que la récolte est très petite. Ils ne peuvent pas donner une estimation du rendement car à chaque fois ils ne cueillent que ce qu'ils ont besoin, et c'est toujours ainsi.

Sur les tanety, les paysans font la culture de manioc, patate douce, ananas, de café, girofle, poivre, litchis, banane, vanille...; les paysans n'utilisent ni d'engrais, ni d'herbicide jusqu'à maintenant [14].

#### **V.2.3.2.3. La pêche :**

Etant donné que le village est un peu éloigné de la mer, des fleuves et rivières, la pêche ne s'effectue qu'au niveau des drains.

#### **V.2.3.2.4. L'artisanat :**

L'artisanat reste une activité destinée aux femmes, les produits se vendent mal. On fabrique des chapeaux, des tapis, des paniers, ...

#### **V.2.3.2.5. Autres activités :**

Jusqu'à ce moment, les paysans n'ont pas de source de revenu stable, leur revenu vient de la vente des cafés, girofle, vanille, poivre mais la récolte pour chaque famille reste assez petite.

---

### V.3. Utilisations du bambou dans la zone d'étude :

Les habitants de la commune rurale d'Amborobe utilisent le bambou comme :

- Poteau



**Photo 27** : Poteau en bambou de la Mairie d'Amborobe,

- Poutre



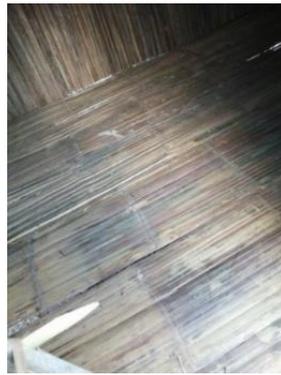
**Photo 28** : Poutre en bambou d'un bâtiment

- Revêtement mural pour la construction de maison



**Photo 29** : Revêtement mural d'une maison

- 
- Revêtement sol



**Photo 30 :** Revêtement sol en bambou

- Support pour transporter des charbons, bagages, marchandises...



**Photo 31 :** Bambou servant de support pour porter des bananes

- Clôture



**Photo 32 :** Clôture en bambou

- Support pour les cultures



**Photo 33 :** Support de culture

- 
- Panier pour le transport des produits agricoles



**Photo 34 :** Panier en bambou

- Cage pour les petits animaux
- Pont pour la traversée des hommes et animaux
- Combustibles pour la cuisson des aliments

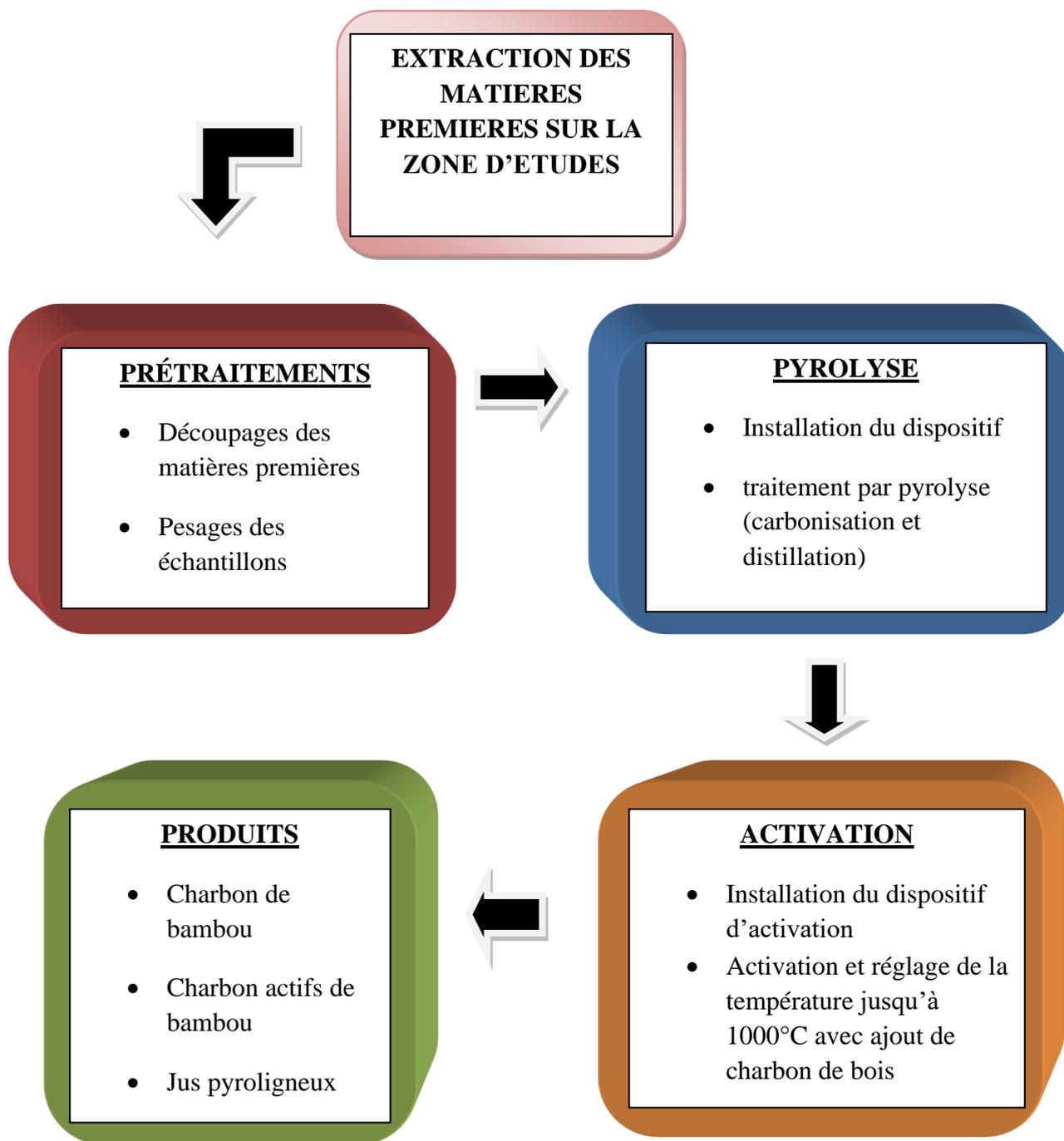
---

## Chapitre VI : ETUDES EXPERIMENTALES

### VI.1. La production du charbon combustible et charbon actif à partir du bambou.

#### VI.1.1. Les méthodes de transformation du charbon combustible et charbon actif

La procédure se fait de cette manière :



**Figure 12** : Méthode de transformation

---

### VI.1.1.1. Extraction des matières première

La descente sur la zone d'études pour extraire les bambous est nécessaire à la réalisation de ce travail.



**Photo 35 :** Extraction des matières premières

### VI.1.1.2. Le prétraitement

Avant de passer à l'étape de transformation, le bambou passe d'abord avec quelques étapes préparatoires. Il s'agit du découpage en morceau et pesages des échantillons. Une hache a été utilisée pour découper les bambous en morceaux, permettant ainsi de faciliter leur chargement dans le pyrolyseur.



**Photo 37 :** Pesages des matières Premières



**Photo 36 :** Découpage des matières Premières

---

### **VI.1.1.3. Pyrolyse**

Elle consiste en une pyrolyse lente sans air ou approvisionnement limité d'air (oxygène) à l'aide du pyrolyseur avec une température de consigne comprise entre 100 à 250°C selon les différents essais. Dans le cas de notre étude, on a effectué 5 différents essais.

#### **VI.1.1.3.1. Mode opératoire**

Après avoir découpé en morceau et peser les échantillons de bambou, les prochaines étapes sont les suivantes :

- Installer l'appareillage (pyrolyseur), puis ouvrir le couvercle de l'appareil à l'aide d'une clef.
- Mettre les échantillons déjà pesés dans le pyrolyseur.
- Fermer le couvercle du pyrolyseur à l'aide d'une clef.
- Déposer le flacon en verre pour récolter les jus pyroligneux.
- Allumer le pyrolyseur électrique puis une fois que le pyrolyseur est allumé, la pyrolyse commence.
- Vérifier la température de consigne et prendre en note tous les 5 minutes l'évolution de la température.
- Régler la température de consigne selon le temps des différents essais
- Changer de flacon en verre lorsqu'on change de température de consigne.
- La carbonisation est terminée lorsqu'il n'y a plus de vapeur qui sort du conducteur à vapeur.

#### **VI.1.1.3.2. But de la pyrolyse**

Dans le cas de cette étude, l'objectif de la pyrolyse est la production de charbon, on parle donc de la carbonisation, technique de pré-conditionnement qui permet ainsi la concentration sous forme de carbone fixe de l'énergie contenue dans la matière organique. Cette technique est réalisée dans les conditions de pyrolyse lente. Le produit de la réaction est essentiellement un résidu solide et un produit liquide pyrolytique.

#### **VI.1.1.4. Activation**

Après l'étape de la carbonisation, le matériau n'est que faiblement poreux. De ce fait, il n'accède pas encore une surface plus réactive. Il doit subir un autre traitement thermique appelé « activation » afin de développer sa structure poreuse et rendre son pouvoir d'adsorption plus élevé. La technique utilisée dans ce travail est la technique d'activation physique.

---

#### VI.1.1.4.1. Déroulement du traitement

A ce stade de température le rajout de combustible sera nécessaire et un nouvel apport d'énergie doit être prise en compte. Pour ce faire, la réactivation du ventilateur électrique permet d'augmenter la vitesse de chauffe de la combustion ainsi la température s'évolue à une valeur optimale de 1000°C.

#### VI.1.1.4.2. Mode opératoire

L'étape d'activation est effectuée avec le distillateur à voie sèche (réacteur d'activation) à une température au-delà d'une température finale de la carbonisation. Les modes opératoires utilisées sont les suivantes :

- Préparer tous les éléments de l'appareillage.
- Mettre les matières premières dans le creuset.
- Allumer le feu avec du charbon de bois.
- Poser le creuset dans le fourneau.
- Installer l'appareillage comme la "photo 08" nous a montré, avec l'ajout du flacon en verre pour récolter le jus pyroligneux.
- Prendre tous les 5min l'évolution de la température grâce au thermomètre infrarouge
- Ajouter du combustible.
- Allumer le souffleur électrique.
- Ajouter toujours du combustible pour obtenir notre température d'activation et régler aussi l'ajout du combustible selon la température décrit sur le thermomètre infrarouge.
- Débrancher et/ou rebrancher le souffleur électrique, tout en respectant le palier de température.



**Photo 38 : Activation**

#### VI.1.1.4.3. La récupération du produit fini

Après refroidissement, l'étape suivante est la récupération du charbon activé dans le creuset après peser le produit fini et le placer dans une atmosphère inerte.

---

#### VI.1.1.4.4. But de l'activation

L'objectif de l'activation est d'accéder à la matière déjà carbonisée, une surface plus réactive afin de développer sa structure poreuse et rendre son pouvoir d'adsorption plus élevé. Pour ce faire, une élévation de température de 800 à 1000°C et 2 à 3H de temps de résidence sont nécessaires. Le produit de la réaction est essentiellement un gaz de pyrolyse dont les fractions condensables (huiles de pyrolyse ou bio-oil) peuvent permettre la synthèse de biocarburants de type biodiesel et des charbons activés.

#### VI.1.2. Classification des CA (Charbon Actif)

Comme on a vu dans le chapitre précédent, il existe deux principales formes de CA (le CAP et le CAG) dont leur caractéristique se distingue de leur propriété de surface. Afin de classer les CA de bambou, on va procéder aux étapes suivantes :

- Prendre un échantillon de CA brut de bambou
- Broyer le CA brute pour le réduire en poudre
- Tamiser le résultat afin de séparer les poudres et les grains

Classer les deux formes de CA



Photo 40 : Broyage du CA



Photo 39 : Tamisage du CA

#### VI.1.3. Caractérisation expérimentale des charbons actifs

##### VI.1.3.1. Test d'adsorption

Dans cette expérience, l'eau utilisée est une eau usée provenant du résidu d'un distillateur d'alcool comme solution à traiter afin de caractériser les propriétés d'adsorption des différents charbons actifs utilisés. Des séries d'essais ont été réalisées au sein de laboratoire afin d'évaluer la capacité d'adsorption des charbons actifs.

---

#### VI.1.3.1.1. But de ce test

Une étude en profondeur de la littérature nous amène à conclure que le CAP présente un pouvoir adsorbant élevé que le CAG. Cependant, les essais effectués pour le test d'adsorption des charbons actifs obtenus servent à prouver cette hypothèse. Pour ce faire, une même dose de chacun d'eux (CAP et CAG) a été prise puis introduits dans une même quantité de solution à traiter.

Un temps de séjour d'une nuit a été pris en compte pour ce test. A noter que la solution à traiter est un résidu provenant de la rectification d'alcool.

#### VI.1.3.1.2. Mode opératoire

- Prendre deux flacons contenant chacun 100ml de la solution à traiter
- Imprégner 1g de CAP et 1g de CAG dans chacun d'eux
- Verser les CA dans chaque solution
- Agiter l'ensemble pour le mélanger
- Laisser le mélange en repos pendant un jour



**Photo 41** : Mélange en repos

#### VI.1.3.2. Caractérisation des CA

Le charbon actif est caractérisé par sa surface spécifique. Ce paramètre définit la faculté d'adsorption d'un matériau poreux. La méthode BET permet la détermination de cette capacité d'adsorption, mais par manque de matériel, on n'a pas pu démontrer l'application de cette méthode pour la détermination de la surface spécifique. Mais afin de caractériser les charbons actifs, une méthode expérimentale visuelle basée sur la comparaison des résultats obtenus a été utilisée. Pour ce faire, il suffit de choisir un matériau carboné comme référence dont laquelle la surface spécifique est connue. C'est donc le noir de carbone qui a une surface spécifique de 120m<sup>2</sup>/g qui a été choisi. Notre choix s'est basé par la facilité de l'obtenir.

---

### VI.1.3.2.1. Mode opératoire

L'essai consiste à un test de comparaison visuel entre deux échantillons A et B

Echantillon A : correspond à l'échantillon de charbon actif

Echantillon B : correspond à l'échantillon de noir de carbone

- Peser 1g de charbon actif et 1g de noir de carbone
- Imprégner les chacun dans la solution à traiter dont la quantité est égale à 100ml de chaque
- Agiter le mélange
- Laisser le mélange au repos avec un temps de séjour de 24h
- Observer l'évolution de ces deux échantillons après une journée de repos
- Rajouter 1g de noir de carbone dans l'échantillon B dans le cas où l'on observe que la couleur de celui-ci se diffère de celle de l'échantillon A.
- Procéder à la même étape jusqu'à ce que l'échantillon B prenne la même couleur que celle d'échantillon A.



**Photo 42 :** Mélange CA et noir de carbone en repos

### VI.1.4. Détermination des caractères physico-chimiques

L'analyse cherche à déterminer :

- L'humidité
- L'indice de matière volatile
- La teneur en cendre
- La teneur en carbone fixe
- Le pouvoir calorifique

---

#### VI.1.4.1. L'humidité

Pour connaître l'humidité, on doit la soutirer à partir de la perte en poids d'une prise d'essai de l'échantillon après chauffage dans l'étuve à 105°C pendant 24h. Il existe deux fractions d'humidité, la première fraction est l'humidité totale comprenant l'humidité d'imbibition et la deuxième fraction est l'humidité de détention qui est celle que conserve l'échantillon dans l'atmosphère où il se trouve et qui ne peut être éliminée que par un étuvage supérieur à 100°C. Sa détermination suit la loi Européenne N14774.

$$Th = \frac{(P2 - P3)}{(P2 - P1)} \times 100$$

Avec :

$T_h$  : taux d'humidité (%)

P1 : masse du creuset vide (en g)

P2 : masse du creuset + masse de l'échantillon avant étuvage (en g)

P3 : masse obtenue après chauffage à 105°C (en g)

#### VI.1.4.2. L'indice de matière volatile

Les matières volatiles (MV) renferment des gaz combustibles, des vapeurs condensables, des vapeurs et quelques produits calcinés et déshydratés. Ces constituants sont à leurs tours composés de leurs éléments constitutifs spécifiques. Dans les gaz combustibles, on trouve l'hydrogène, le monoxyde de carbone et le méthane. L'ensemble de goudrons et de petites quantités de gaz combustibles représentent les vapeurs condensables. Les vapeurs sont constituées de gaz carbonique et d'eau (formée par la dégradation thermique des substances charbonneuses). Le même échantillon utilisé pour trouver le taux d'humidité est chauffé dans un four à moufle à une température allant jusqu'à 850°C. Sa détermination suit la norme française NF, 1985. Cette formule est appliquée pour calculer le taux de matière volatile :

$$MV = \frac{(P3 - P4)}{(P3 - P1)} \times 100$$

Avec :

**MV** : taux de matière volatile (%)

**P3** : masse obtenue après chauffage à 105°C (en g)

**P4** : masse obtenue après chauffage à 850°C (en g)

**P1** : masse du creuset vide (en g)

---

### VI.1.4.3. La teneur en cendres

Les cendres sont constituées de diverses matières. La teneur en cendres est obtenue à partir de la perte en poids subie par l'échantillon lorsqu'il est chauffé progressivement de la température ambiante à 850°C suivant un programme de température bien déterminée. Il représente la qualité de matière minérale contenue dans le combustible. Il est important pour l'appréciabilité du combustible du fait que quand il est très élevé, ces cendres deviennent des obstacles à la combustion. Sa détermination suit la norme EN 14775

$$C = \frac{(P5 - P1)}{(P2 - P1)} \times 100$$

Avec :

**Tc** : taux de cendre (%)

**P5** : masse obtenue après chauffage à 850°C (en g)

**P2** : masse du creuset + masse de l'échantillon avant l'étuvage (en g)

**P1** : masse du creuset vide (en g)

### VI.1.4.4. La teneur en carbone fixe

Le carbone fixe présente un grand potentiel énergétique. C'est la quantité du carbone restante après élimination des matières volatiles, des cendres et d'humidité. Il diffère du carbone total qui est la somme du carbone fixe et le carbone contenu dans la partie volatilisée. Généralement si la carbonisation a été bien conduite, le charbon contient environ 80% de carbone fixe, élément indispensable dans la composition des briquettes.

Le taux de carbone fixe est calculé avec la formule suivante :

$$CF = 100 - (Th + Tc + TMV)$$

Avec :

**Th** : taux d'humidité (%)

**Tc** : taux de cendre (%)

**TMV** : taux de matière volatile (%)

### VI.1.4.5. Le pouvoir calorifique

Le P.C.I indique la quantité de la chaleur effectivement utile dans la pratique. Autrement dit, c'est la quantité de chaleur dégagée par Kg d'un combustible solide lorsque les produits de la combustion sont refroidis à la température et que la vapeur d'eau n'est pas condensée. Le P.C.I d'un combustible est la quantité de chaleur que tout le carbone est transformé en CO<sub>2</sub>, l'hydrogène en H<sub>2</sub>O, tous les soufres en SO<sub>2</sub>.

---

Le pouvoir calorifique d'un combustible représente la quantité d'énergie contenue dans une unité de masse de combustible. Elle s'exprime en termes d'énergie par unité de masse (pour les solides : MJ/Kg) et par unité de volume (pour les gaz : MJ/ m<sup>3</sup>). On parle de P.C.I lorsque la combustion s'effectue à une pression constante (à l'air libre), c'est-à-dire la chaleur latente (qui est difficilement récupérable) de la vapeur d'eau n'est pas récupérée. Il existe deux méthodes pour déterminer le pouvoir calorifique Inférieur d'un combustible :

- Mesure expérimentale à la bombe calorimétrique en présence d'oxygène et suivi de température toutes les 30 secondes.
- A partir des formules traditionnelles telle que la formule de CASSAN qui s correspond à celle-ci :

$$PCI = 80 \times (100 - Tc)$$

Avec :

**PCI** : pouvoir calorifique inférieur (kcal/kg)

**Tc** : taux de cendre (%)

### VI.1.5. Les tests d'efficacité énergétique

#### VI.1.5.1. Le « drop test »

Le drop test permet d'interpréter sur la solidité des combustibles à tester. Ce test constitue une simulation des sollicitations subies par le combustible lors du transport et la manutention. C'est un test universellement reconnu pour apprécier la friabilité des combustibles.

- **Déroulement du test**

Le test a été réalisé selon l'ordre chronologique suivant :

- Choix de la hauteur de chute de combustible : Quatre hauteurs de chute ont été choisies : 0,5 m, 1 m, 1,5 m et 1,94 m
- On laisse tomber le combustibles à tester à partir de chaque hauteur de chute
- Après la chute, on regarde le comportement du combustible



**Photo 43** : Séance de drop test du charbon de bambou

---

### VI.1.5.3. Le test d'ébullition d'eau

Ce TEE permet d'évaluer la consommation en charbon de bambou. A partir du test d'ébullition d'eau, on essaie d'évaluer la performance et l'efficacité énergétique des charbons de bambou. Mis à part, il est aussi important de connaître la température à laquelle l'eau commence à bouillir.

#### VI.1.5.3.1. Matériels d'expérimentation Pour le test d'ébullition d'eau(TEE)

Les matériels d'étude comprennent des équipements de laboratoire tels que :

- Une balance électronique pour les différentes pesées



**Photo 44 :** Balance électronique

- Un récipient gradué pour la volumétrie



**Photo 45 :** Récipient gradué

- Un multimètre pour la mesure de la température d'ébullition d'eau.



**Photo 46 :** Multimètre

- Une marmite Cocotte N° 34 de modèle Ambatolampy utilisée comme bouilloire à chaque test d'ébullition d'eau.



Photo 47 : Cocotte marmite N° 34

- Un foyer amélioré « Mitsitsy à carapace métallique » (modèle CNRIT)



Photo 48 : Foyer Amélioré (CNRIT)

Le foyer amélioré CNRIT dispose de trois modèles différents : Petit Modèle (PM), Moyen Modèle (MM) et Grand Modèle (GM). Les caractéristiques techniques de ces trois modèles de foyer amélioré du CNRIT sont récapitulées dans le tableau suivant :

**Tableau 2** : Caractéristiques Foyer amélioré (CNRIT)

Modèles	Petit (PM)	Moyen (MM)	Grand(GM)
Circonférence théorique (cm)	100,48	106,76	116,18
Circonférence réelle (cm)	104	110	120
Diamètre (cm)	32	34	37
Hauteur (cm)	20	24	25
Epaisseur (cm)	4	4	4

**Source** : CNRIT

Parmi les trois modèles de foyer amélioré du CNRIT, c'est le foyer amélioré moyen modèle qui a été employé durant tout le test d'efficacité et d'efficience énergétique des charbons.



Photo 49 : Test d'ébullition d'eau

De plus, c'est à partir de ce Test d'Ébullition d'Eau (TEE) qu'on peut procéder à l'évaluation des paramètres relatifs du combustible :

- Test d'Inflammabilité ou temps de mise à feu ;
- Le comportement au feu ;
- La durée de l'ébullition d'eau ;
- La possibilité d'utilisation des imbrulés (combustible restant lors d'un TEE) pour une nouvelle cuisson.

#### **VI.1.5.3.2. Protocole du test**

Le test comprend trois phases : la phase de préparation ou avant cuisson, la phase de cuisson et l'après cuisson.

- **Avant cuisson**

Cette première phase consiste à effectuer diverses préparations des matières premières et diverses mesures relatives :

- La mesure de la température de l'eau, de la température ambiante et de la vitesse du vent au laboratoire pour maintenir des conditions d'expérimentation comparables du foyer utilisé.
- La préparation du combustible pour le test
- Le pesage de l'appareil de cuisson à tester et ses contenus (eau de robinet 2,5 kg)
- Le différent pesage du combustible à introduire dans le fatana Mitsitsy.

- **Pendant cuisson**

Cette phase de cuisson consiste à faire des mesures :

- D'élévation de température de l'eau dans l'équipement de cuisson,
- D'élévation de température du foyer sous la marmite à l'aide d'un thermomètre infrarouge par lecture directe,

---

C'est dans cette partie aussi qu'on peut apprécier respectivement :

- ❖ Le comportement du combustible (charbon de bambou)
- ❖ L'inflammabilité du combustible
- ❖ L'état de la flamme (% en flamme bleue, % en flamme rouge)
- ❖ La température du corps extérieur du foyer
- ❖ L'émission de la fumée

- **Après test**

Cette partie consiste à entreprendre différentes pesées et mesures telles que :

- Le pesage de l'appareil de cuisson testé et ses contenus (eau)
- Le pesage du combustible restant dans le foyer pour déterminer par différence la quantité de combustible réellement consommée pour l'ébullition plus 15 mn.

#### **VI.1.5.3.3. Méthode de calcul pour la détermination de la consommation en combustible (en kg/h)**

La consommation en combustible (kg/h) sera déterminée à partir des valeurs issues des tests d'ébullition d'eau.

La formule utilisée pour calculer la consommation moyenne en combustible (kg/h) sera la suivante :

$$\text{Consommation moyenne en combustible} = \frac{\text{combustible consommé}}{\text{durée de la combustion}} = \frac{(kg)}{h}$$

Où :

$$\text{Combustible consommé} = \text{combustible initiale} - [\text{combustible (non utilisé + imbrulé)}]$$

$$\text{Durée de combustion} = \text{durée d'ébullition de l'eau} + \frac{1}{4} \text{ d'heure}$$

La consommation moyenne en combustible (kg/h) est donc égale à la valeur du rapport entre la moyenne de la quantité du combustible consommé avec celle de la durée d'ébullition d'eau plus 15 minutes.

#### **VI.1.5.4. Approche adoptée pour l'évaluation de l'efficacité et de l'efficacités de charbon de bambou par rapport au foyer amélioré.**

La méthodologie pour l'évaluation de l'efficacité et de l'efficacités de charbon de bambou par rapport au foyer amélioré consiste à réaliser des Tests d'Ebullition d'Eau avec le fatana mitsitsy.

---

#### VI.1.5.4.1. Procédure du test

Durant le test, on essaiera de déterminer :

- La puissance du foyer par l'utilisation du charbon de bambou ;
- L'efficacité du foyer par l'utilisation de charbon de bambou
- la consommation de combustible (en kg/h) de charbon de bambou (CB), charbon de bois ou bois de chauffe.

La puissance est définie comme étant la dérivée de l'énergie par rapport au temps

$$P(t) = \frac{dE(t)}{dt}$$

Pour notre cas, il s'agit de déterminer une valeur de puissance calorifique constante. On peut donc écrire ;

$$P = \frac{Q}{t}$$

Où : Q : représente l'énergie utile, c'est-à-dire l'énergie transmise par le foyer à la marmite,

Et « t » : le temps ou la durée totale du test.

L'énergie utile est fonction de la quantité de chaleur accumulée par l'eau entre sa température initiale et sa température d'ébullition et de la chaleur latente de l'eau évaporée :

$$Q = C_{\text{eau}} \times M_{\text{eau initiale}} \times (T_{\text{ébullition}} - T_{\text{initiale}}) + L_{\text{eau}} \times (M_{\text{eau initiale}} - M_{\text{restante}})$$

Et par suite :

$$P = \frac{C_{\text{eau}} \times M_{\text{eau initiale}} \times (T_{\text{ébullition}} - T_{\text{initiale}}) + L_{\text{eau}} \times (M_{\text{eau initiale}} - M_{\text{restante}})}{t}$$

#### L'efficacité de chaque foyer par l'utilisation de chaque combustible

L'évaluation de l'efficacité du foyer s'effectue à partir du calcul du rendement.

Par définition, le rendement c'est le rapport entre l'énergie transmise par le foyer à la marmite et l'énergie contenue dans le combustible brûlé.

Soit :

$$\eta = \frac{Q}{PC_{\text{Combustible}} \times P_{\text{Combustible}}}$$

Ou bien

$$\eta = \frac{C_{\text{eau}} \times M_{\text{eau initiale}} \times (T_{\text{ébullition}} - T_{\text{initiale}}) + L_{\text{eau}} \times (M_{\text{eau initiale}} - M_{\text{restante}})}{PC_{\text{Combustible}} \times P_{\text{Combustible}}}$$

**Tableau 3:** Détermination de la puissance et de l'efficacité énergétique du foyer amélioré par l'utilisation de charbon de bambou comme combustible

$C_{\text{eau}}$	Chaleur massique de l'eau	(°C)
$L_{\text{eau}}$	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	(kg)
$M_{\text{eau initiale}}$	Masse initiale de l'eau	(kg)
$M_{\text{eau restante}}$	Masse d'eau restante après le test	(kg)
$M_{\text{eau volatilisé}}$	Masse d'eau volatilisée	(kg)
$T_{\text{ébullition}} - T_{\text{finale}}$	Température d'ébullition de l'eau – température initiale	(°C)
$T_{\text{finale}}$	Temps total du test	Seconde
$P_{\text{CB consommé}}$	Masse de charbon de bambou consommé	(kg)
$PC_{\text{CB}}$	Pouvoir calorifique du charbon de bambou	(J/kg)
$PC_{\text{CB}} \times P_{\text{CB consommé}}$	Pouvoir calorifique du charbon de bambou × Masse de charbon de bambou consommé	(J)
$Q$	Energie transmise par le foyer à la marmite	(J)
$P$	Puissance du foyer	(W)
$\eta$	Rendement du foyer	(%)

## **PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS**

---

## Chapitre VII : RESULTATS

### VII.1. Résultats de la carbonisation

D'un réglage de température allant de 100 à 250°C avec un intervalle de 50°C ; le bambou se carbonise en donnant du jus pyroligneux (vinaigre de bambou) et des charbons de bambous.

#### VII.1.1. Présentation des produits :

Les produits obtenus se présentent sous deux formes

- liquide : le jus pyroligneux ou vinaigre de bambou,
- et solide: charbon de bambou.



**Photo 51:** Jus pyroligneux



**Photo 50:** Charbon de bambou

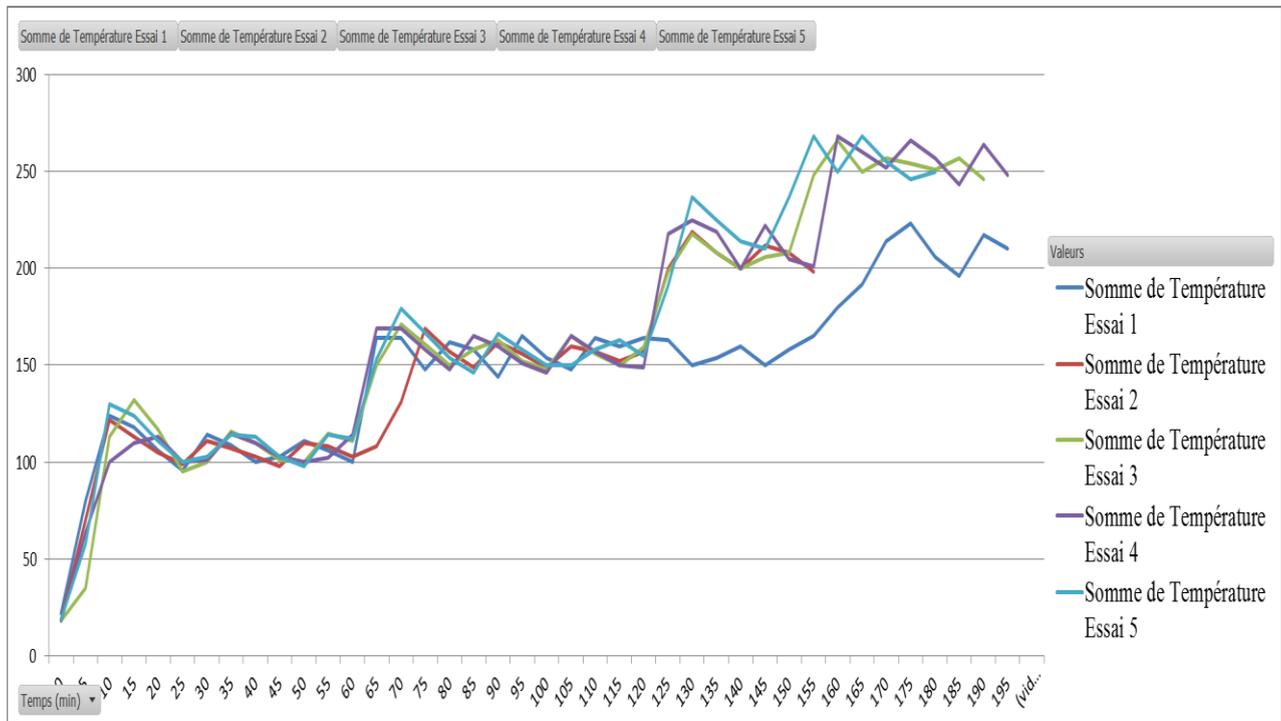
#### VII.1.2. L'influence de la température durant l'expérimentation

L'évolution de la température en fonction du temps est représentée par le tableau n°3 et la courbe 1 suivants :

**Tableau 3** : Evolution de la température des carbonisations des différents essais

Temps (min)	Température (°C) Essai 1	Température (°C) Essai 2	Température (°C) Essai 3	Température (°C) Essai 4	Température (°C) Essai 5
0	22	19	18	18	19
5	80	70	35	64	58
10	124	122	113	100	130
15	118	113	132	110	124
20	106	105	117	113	111
25	96	99	95	100	100
30	114	111	100	101	103
35	109	107	116	115	114
40	100	103	110	110	113
45	103	98	101	103	103
50	111	110	100	100	98
55	106	108	115	102	114
60	100	103	111	114	112
65	164	108	150	169	153
70	164	131	171	169	179
75	148	169	161	158	167
80	162	157	150	148	154
85	158	149	158	165	146
90	144	162	163	160	166
95	165	156	152	151	158
100	154	149	148	146	150
105	148	160	165	165	150
110	164	157	156	157	158
115	160	152	150	150	163
120	164	157	159	149	155

125	163	200	198	218	191
130	150	219	218	225	237
135	154	208	208	219	225
140	160	200	200	200	214
145	150	212	206	222	210
150	158	208	208	205	237
155	165	198	248	201	268
160	180		266	268	250
165	192		250	260	268
170	214		257	252	255
175	223		254	266	246
180	206		251	257	250
185	196		257	243	
190	217		246	264	
195	210			248	



**Figure 13 :** Evolution de la température de carbonisation en fonction tu temps

La durée maximale de la carbonisation enregistrée est de 3 heures et 15 minutes . Le rythme d'apparition du jus pyroligneux suit l'évolution de la montée de la température qui oscille autour de 268°C .Une fois la température maximale est atteinte, la vitesse du jet commence à diminuer légèrement. Ce qui indique la fin de l'opération.

### VII.1.3. Résultats des différents essais de carbonisations

Les résultats issus des différents essais de carbonisation sont regroupés dans Le tableau n° 4 suivants :

**Tableau 4** : Résultats des différents essais de carbonisations du bambou

Rubriques	Masse initiale des bambous	Masse des bambous carbonisés	Jus pyroligneux (g)	T <sub>opt</sub> (°C)	Durée (h)	Rendement Carbonisation (%)	Rendement jus pyroligneux
Essai 1	750	241	121	223	3h 15	32,13	16,13
<b>Essai 2</b>	<b>750</b>	<b>264</b>	<b>114</b>	<b>219</b>	<b>2h 35</b>	<b>35,2</b>	<b>15,2</b>
Essai 3	750	221	101	266	3h10	29,46	13,46
Essai 4	750	230	98.5	268	3h15	30,6	13,13
Essai 5	750	223	89	268	3h	29,73	11,86

Il est à remarquer que la même masse de 750g de bambou a été utilisée pour tous les essais de carbonisation

Le rendement de la carbonisation varie de 29,46 à 35,2 correspondants respectivement à l'essai 3 et l'essai 2. Ce dernier représente le meilleur rendement de carbonisation avec une durée moindre.

Concernant le jus pyroligneux, le rendement est inversement proportionnel à celui de la carbonisation pour les différents essais.

---

## VII.2. Résultats de l'activation

### VII.2.1. Présentation des produits

Les charbons obtenus des trois premiers essais ont été utilisés pour subir l'opération d'activation, tandis que le reste est destiné pour les tests d'efficacité et d'efficacités.



**Photo 52 :** Charbon actif brut

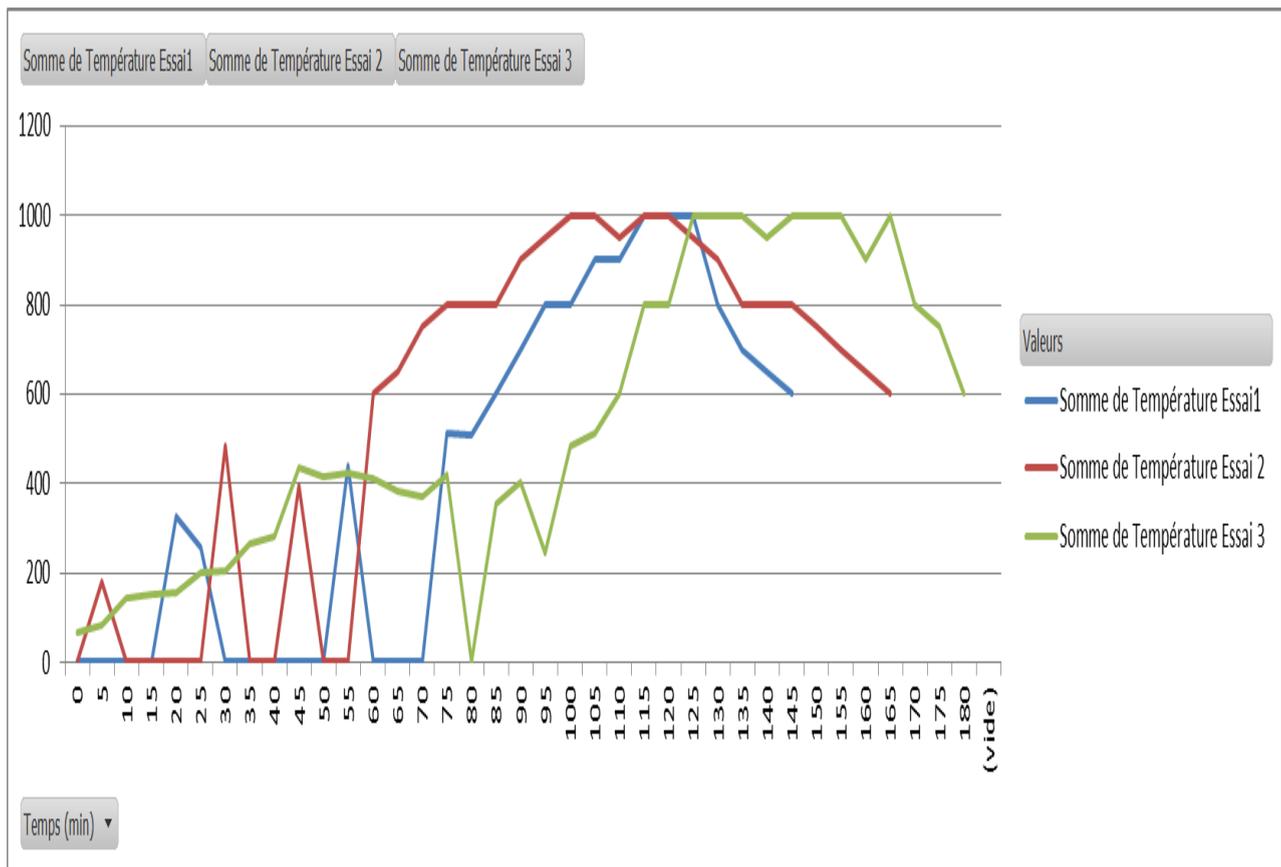
L'évolution de la température est représentée par le tableau 5 et la courbe 2 ci-dessous pour les 3 essais d'activation

Tableau 5 : évolution de la température d'activations des différents essais

Temps (min)	Température (°C) Essai 1	Température (°C) Essai 2	Température (°C) Essai 3
0	95.5	142.7	67
5	128.8	180	83
10	205.2	204.7	142
15	223.8	267.5	152
20	327	303.1	157
25	257	362.6	202
30	347.5	484	206
35	318.4	434.2	267
40	394.3	511.2	282
45	408.6	396	437
50	357.7	511.6	417
55	440	511.4	425
60	419.6	600	413
65	421.5	650	381
70	433.2	750	372
75	512	800	420
80	510	800	393.2
85	600	800	356
90	700	900	405
95	800	950	246
100	800	1000	484
105	900	1000	511
110	9000	950	600

---

115	1000	1000	800
120	1000	1000	800
125	1000	950	1000
130	800	900	1000
135	700	800	1000
140	650	800	950
145	600	800	1000
150		750	1000
155		700	1000
160		650	900
165		600	1000
170			800
175			750
180			600



**Figure 14 :** Evolution de la température d’activations en fonction du temps

Pour les trois essais, le palier de température de 1000°C a été atteint .Ce qui conduira certainement à l’obtention de charbon actif de qualité acceptable.

### VII.2.2. Résultats des différents essais d’activations du bambou

Le tableau 6 illustre Les résultats des différents essais d’activations du bambou

Tableau 6 : Résultats des différents essais d’activations du bambou

Rubriques	Masse de bambou carbonisé (g)	Masse De bambou activé (g)	T <sub>max</sub> (°C)	Durée (h)	Rendement (%)
Essai 1	241	60	1000	2h 25	24,89
<b>Essai 2</b>	<b>264</b>	<b>90</b>	<b>1000</b>	<b>2h 45</b>	<b>34,09</b>
Essai 3	221	40	1000	3h	18,09

On remarque aisément que le meilleur rendement correspond à l’activation du charbon de bambou est l’essai 2.

### VII.2.3. Les domaines d'utilisation de ces produits :

Le charbon de bambou est principalement employé comme combustible domestique et le charbon actif et le vinaigre de bambou possèdent un large domaine d'application.

---

### VII.2.3.1. Le charbon actif :

En termes de cavité microscopique, cette propriété hyper adsorbante et active est la résultante d'une réaction physico-chimique rapide entre le produit adsorbant et le produit adsorbé, qui n'altère ni l'un ni l'autre. Une des premières applications possibles pour ce morceau de charbon concerne alors la neutralisation des odeurs d'aliments, notamment ceux du réfrigérateur. Il peut capturer et retenir l'eau ou les particules en suspension dans l'air.

Il est également un parfait régulateur hydrostatique : les parois de ses cavités microscopiques peuvent encore adsorber l'humidité de l'air ambiant pour libérer lorsque celui-ci redevient sec.

A propos de ces applications les plus connues et répandues, on les regroupe dans le domaine de la :

- Filtration :
  - Décontamination de l'eau potable
  - Filtration des polluants organiques dans les aquariums.
- Chimie :
  - Dechloration des eaux et autres liquides alimentaire (bière, boisson gazeuse, huiles, etc...)
  - Traitement des effluents liquides
  - Décoloration et détachage des vins blancs (raisin noir à jus blanc) : les pigments de la peau du raisin, qui peuvent colorer le jus, sont adsorbés par un charbon activé chimiquement
  - Décoloration et raffinage du sucre et de l'huile
  - Décaféination du café : avec de l'eau
  - Elimination des hydrocarbures dans l'eau
- Industrie :
  - Extraction de l'or des minerais (fixation sur le charbon actif)
- Médecine :
  - Empoisonnement par adsorption de substances toxiques
  - Antidote en cas d'intoxication alimentaire ou par médicaments

Concernant son avenir au niveau international, l'industrie des cosmétiques et des textiles commence à utiliser ses vertus. On voit surgir par exemple des vêtements de sport dont les tissus contiennent ce charbon, et s'auto-entretiennent en permanent simultanément l'adsorption de l'humidité et la disparition de la prolifération des bactéries.

---

### VII.2.3.2. Le vinaigre de bambou :

Le vinaigre en bambou a été longtemps employé dans la médecine orientale pendant des siècles. Ce liquide peut être appliqué dans les produits de beauté, insecticides, désodorisants, transformation des produits alimentaires et agriculture. Ces fonctions consistent à expulser l'odeur, à nourrir le massage facial et la peau du corps.

Le vinaigre en bambou, nommé par les Japonais "L'Or Liquide", contient du charbon de bambou. Cela a son importance pour la conservation de sa pureté. C'est un liquide naturellement dérivé pris de la condensation qui se produit pendant la production du charbon de bois en bambou. Il est composé principalement (80-90%) de l'eau et de 10-20% composés organiques, ayant pour résultat approximativement 200 ingrédients séparés. Plusieurs de ses composés sont de différents types d'acide qui donnent au liquide un maquillage de pH semblable à celui du vinaigre de ménage. D'où le terme « vinaigre en bambou ». En effet c'est le jus pyroligneux, qui après une macération de 10 à 15 ans, le vinaigre de bambou sera embouteillé et commercialisé [7].

### VII.3. Résultat de la classification du charbon actif

Après avoir broyé le charbon actif, le produit obtenu est un charbon actif en poudre et charbon actif en grain.



**Photo 54 :** Charbon actif en poudre (CAP)



**Photo 53 :** Charbon actif en grain (CAG)

---

## VII.4. Résultats de la caractérisation expérimentale des charbons actifs

### VII.4.1. Comparaison du CAP avec le CAG

L'interprétation de la différence de la capacité d'adsorption du CAP et du CAG s'est basée par un test comparatif du pouvoir adsorbant de ces deux formes de CA. On a ainsi utilisé de l'eau usée provenant du résidu d'un distillateur d'alcool.

La photo suivante traduit le résultat obtenu.



**Photo 55:** Comparaison du CAP avec le CAG

La figure montre que la solution traitée par du CAP est plus claire que celle par le CAG. Le CAG est donc plus adsorbant que le CAP. Ce qui est évident car plus la taille de charbon actif est fine plus sa surface spécifique est grande donc son pouvoir adsorbant est élevé.

---

#### VII.4.2. Estimation de la surface spécifique du CA

La connaissance du pouvoir adsorbant du noir de carbone de surface spécifique 120 m<sup>2</sup>/g à 150 m<sup>2</sup>/g nous a permis d'attribuer une valeur estimative de l'ordre de 720 m<sup>2</sup>/g à 900 m<sup>2</sup>/g pour le CA de bambou. Les résultats issus des expérimentations successives sont illustrés dans les figures suivantes :



**Figure 15:** Test d'adsorption noir de carbone et Charbon Actif

L'expérimentation s'est basée sur le traitement d'un même volume d'eau usée par le CA et le noir de carbone. Ainsi, le processus a révélé que le pouvoir adsorbant de 1g de CA correspond à celui de 6 g de noir de carbone.

En effet la série de figure ci-dessus met en évidence que l'obtention de la même limpidité des deux solutions d'eau usée traitée respectivement par du CA et du noir de carbone, correspond à la proportion : 6g de noir de carbone pour 1 g de CA.

#### VII.5. Résultat de la détermination des caractères physico-chimiques du charbon de bambou

Le tableau suivant récapitule le résultat des expérimentations effectuées au laboratoire du CNRIT relatif à la détermination des caractères physico chimiques du charbon de bambou obtenu après passage par pyrolyse au labo. Les caractères physico chimiques calculées sont : l'humidité, la teneur en cendre, la teneur en Masse volatile ; le carbone fixe ainsi que le PCI.

**Tableau 7 : Résultats des caractères physico chimiques du charbon de bambou**

<b>Echantillon</b>	<b>H(%)</b>	<b>Teneur en cendre (%C)</b>	<b>Teneur en Matières Volatiles (%MV)</b>	<b>Carbone Fixe (%CF)</b>	<b>PCI (kcal/kg)</b>
N°1	8,70	20,37	20,6	50,33	6370,4
N°2	11,65	21,2	16,1	51,05	6304
N°3	10,2	22,3	17,2	50,3	6216
N°4	12,2	23,5	14,2	50,1	6120
N°5	11,5	22,8	15,3	50,4	6176
<b>Moyenne</b>		22,034	16,68		<b>6237,28</b>

Ce tableau informe les caractères physico chimiques du charbon de bambou. Il présente aussi la valeur moyenne du taux de cendre et de la Matière volatile de l'ordre respectif de 22,03% et de 16,68%.

## VII.6. Résultats des tests d'efficacité énergétique du charbon de bambou à partir des tests d'ébullition d'eau.

### VII.6.1. Détermination de la consommation en charbon de bambou en utilisant le foyer amélioré

Le résultat des tests d'ébullition d'eau et la consommation moyenne en charbon de bambou avec le foyer amélioré sont récapitulés dans le tableau n°7 suivant :

**Tableau 8:** Détermination de la consommation en charbon de bambou en utilisant le foyer amélioré

Désignation			Résultats
$T_{\text{ambiante}}$	Température ambiante	(°C)	23.5
$T_{\text{initiale eau}}$	Température initiale de l'eau	(°C)	24
$M_{\text{initiale eau}}$	Masse initiale de l'eau		2.5
$M_{\text{initiale (eau+M)}}$	Masse initiale de l'eau + Marmite	(kg)	3.739
$M_{\text{APEB (eau+M)}}$	Masse après ébullition de l'eau + Marmite	(kg)	3.312
$M_{\text{eau volatilisée}}$	Masse d'eau volatilisée	(kg)	0.427
$P_{\text{initiale CHB}}$	Masse initiale charbon de bambou	(kg)	0.5
$P_{\text{CB imbrulé}}$	Masse de charbon de bambou imbrulé	(kg)	0.280
$P_{\text{CB consommé}}$	Masse de charbon de bambou consommé	(kg)	0.22
$T_{\text{EB}}$	Temps d'ébullition	(min)	24
$T_{\text{F}}$	Durée de la combustion	(min)	39
$T_{\text{F}}$	Durée de la combustion	(h)	0.65
	Consommation moyenne en combustible	(kg/h)	0.338

Pour les tests d'ébullition d'eau réalisés au labo, la consommation moyenne en charbon de bambou est de 0,338 kg/h. Le poids d'eau volatilisée est 0,427 kg pour 2,5 kg d'eau à bouillir.

## VII.6.2. Détermination de la puissance et de l'efficacité énergétique du foyer amélioré par l'utilisation du charbon de bambou de comme combustible

Le résultat de la détermination respective de l'efficacité énergétique, de la puissance et de l'efficacité écologique du foyer amélioré par l'utilisation du charbon de bambou comme combustible est récapitulé dans le tableau suivant :

**Tableau 9** : Détermination de la puissance et de l'efficacité énergétique du foyer amélioré par l'utilisation du charbon de bambou.

$C_{\text{eau}}$	Chaleur massique de l'eau	(°C)	4180
$L_{\text{eau}}$	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	(kg)	2 260 000
$M_{\text{eau initiale}}$	Masse initiale de l'eau	(kg)	2,5
$M_{\text{eau restante}}$	Masse d'eau restante après le test	(kg)	2.073
$M_{\text{eau volatilisé}}$	Masse d'eau volatilisée	(kg)	0,427
$T_{\text{EB}}$	Température ébullition	(°C)	95
$T_{\text{ébullition}} - T_{\text{initiale}}$	Température d'ébullition de l'eau – température initiale	(°C)	71
$T_{\text{finale}}$	Temps total du test	Seconde	2340
$P_{\text{CB consommé}}$	Masse de charbon de bambou consommé	(kg)	0.22
$PC_{\text{CB}}$	Pouvoir calorifique du charbon de bambou	(J/kg)	27 994 178
$PC_{\text{CB}} \times P_{\text{CB consommé}}$	Pouvoir calorifique du charbon de bambou $\times$ Masse de charbon de bambou consommé	(J)	6158719.16
$Q$	Energie transmise par le foyer à la marmite	(J)	1706970
$P$	Puissance du foyer	(W)	539.231
$\eta$	Rendement du foyer	(%)	27.72

Ce tableau informe le résultat de l'efficacité énergétique, la puissance et de l'efficacité écologique du foyer amélioré par l'utilisation du charbon de bambou comme combustible. Il informe aussi l'énergie transmise par le foyer à la marmite de **1706970** joules, la puissance du foyer de **539.231** Watt et le rendement du foyer de **27.72 %**.

## VII.7. Comparaison du charbon de bambou avec d'autres combustibles

Le bois énergie est en général l'énergie utilisé comme combustible à Madagascar, il s'agit en effet du bois de chauffe et ou du charbon du bois. Il s'avère alors intéressant de comparer le charbon de bambou avec les combustibles habituels.

---

A partir du test d'ébullition d'eau, on essaie d'évaluer la performance et l'efficacité énergétique du charbon de bambou. Notamment, on prendra en considération la durée du test pour la comparer aux autres combustibles couramment utilisés comme le charbon de bois ou le bois de chauffe. Mis à part, il est aussi important de connaître la température à laquelle l'eau commence à bouillir.

**Tableau 10** : Comparatif du charbon de bambou avec d'autres combustibles

Combustible	PCI (Kcal/kg)
Bois de chauffe	4350
Charbon de bois	6700
<b>Charbon de bambou</b>	<b>6237,28</b>
Brique de sciure de bois	6393,5

Avec un PCI de **6237,28** Kcal/kg le charbon de bambou peut substituer et/ou concurrencer au bois de chauffe et au charbon de bois.

---

## **Chapitre VIII : DISCUSSIONS**

Rappelons que Madagascar est particulièrement riche en espèces de bambou comparé aux autres pays africains. A Madagascar, la plantation de bambou se trouve essentiellement le long des massifs centraux de l'île et dans la forêt humide de l'Est.

Cette plante est considérée comme les meilleures ressources végétales et une plante d'une grande importance économique. C'est un emblème du développement durable dans le pays qui est l'une des sources d'énergie renouvelable, avec le charbon de bambou.

En se référant au problème énergétique et environnemental dans le pays, l'utilisation des biocombustibles charbon de bambou, est considérée comme une des solutions appropriées.

Ainsi, le charbon de bambou est parmi les sources d'énergie alternative entrant dans le cadre de la diversification des sources d'énergie dans le pays. Les tests d'efficacité énergétique du charbon de bambou ont permis de disposer les caractéristiques physico chimiques de chaque biocombustible telles que : le PCI, la puissance, la consommation en combustible, le rendement et la quantité d'énergie émise lors de la combustion des biocombustibles.

Les résultats obtenus sont satisfaisants que ce soit pour la carbonisation que pour l'activation qui constitue notre objectif. La concrétisation de cette étude en milieu réel sera donc très bénéfique pour notre pays. Elle pourrait réduire non seulement, les effets néfastes véhiculés par l'utilisation des énergies fossiles mais devenir également, une nouvelle source génératrice de revenu.

---

## **Chapitre IX : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU PROJET**

L'environnement représente l'ensemble des milieux naturels et artificiels entourant l'homme auquel il est en relation directe comme l'eau, l'air, les conditions sociales, économiques et les infrastructures.

L'Étude d'Impact Environnemental est une étude qui décrit le projet et son environnement et analyse les impacts ou effets négatifs et positifs du projet sur l'environnement. L'identification de tous les impacts négatifs permet de définir les mesures de prévention et d'atténuation de ces impacts négatifs.

### **IX.1. But :**

Selon la loi n°90-033 du 21 décembre 1990 relative à la charte de l'environnement Malagasy et ses modifications, vu la loi 99.021 du 19 Aout 1999 portant sur la politique de gestion et de contrôle des pollutions d'origine industrielle, une étude d'impact environnemental (EIE) s'impose. L'action environnementale ne doit pas se réduire à la seule protection et à la sauvegarde des ressources naturelles, des espèces rares ou des sites mais elle est inséparable à des actions pour un développement économique et social durable. L'objectif est donc de rétablir un équilibre durable et harmonieux entre les besoins de développement de l'homme et les soucis écologiques. Il s'efforcera de situer le développement par rapport à la conservation, d'en limiter et d'en définir les interactions.

### **IX.2. Identifications des impacts négative du processus sur l'environnement**

Elle consiste à identifier les impacts générés par les activités de l'usine de fabrication de charbon combustible et charbon actifs de bambou, y compris le fonctionnement de l'usine. Les impacts de ces opérations peuvent être temporaire, se prolonger pendant toute la durée de vie de l'usine, ou permanent (irréversibles ou à longue rémanence après les travaux).

#### **IX.2.1. Impacts négatifs**

Les nuisances générées par le processus de valorisation du bambou sont :

- La pollution de l'air à cause des émissions atmosphériques de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub>, H<sub>2</sub>S..., due à la pyrolyse et pendant la combustion du charbon de bois lors de l'activation.
- Pollution du sol à cause des poussières de cendres d'incinération du bois énergies pendant l'activation.
- La déforestation qui est provoquée par l'utilisation de bois-énergie (charbon de bois) lors de la pyrolyse. Et de même du côté du besoin en matière première qui n'est autre que le bambou.

---

### **IX.2.2. Impacts positifs**

La valorisation du bambou apporte divers avantages sur l'environnement :

- La plantation de bambou permet d'améliorer la qualité de l'air
- Le bambou est une graminée ligneuse capable de fixer 30% de plus de CO<sub>2</sub> que les arbres feuillus, jusqu'à 12 tonnes de CO<sub>2</sub>/ha/an (3 tonnes pour une forêt de feuillus). Il libère donc 30% d'oxygène de plus que des arbres. L'épaisseur de ses feuilles améliore l'infiltration de l'eau dans le sol (deux fois plus qu'une forêt de feuillus).
- Par sa croissance rapide, le bambou développe activement un important réseau racinaire. Ce dernier maintient le sol tout en augmentant sa perméabilité et le préserve d'un lessivage lors de fortes pluies, ce qui modère l'érosion. Les rhizomes influencent également l'activité bactérienne du sol, ce qui a permis de développer certaines utilisations spécifiques du bambou que nous mentionnerons par la suite.

### **IX.3. Enjeux environnementaux et sociaux**

Après analyse de la situation et consultation des futurs utilisateurs des produits dérivés du bambou, les principaux enjeux environnementaux identifiés sont les suivants :

- L'utilisation du charbon de bambou comme combustible domestique et de la centrale thermique
- L'utilisation des charbons actifs de bambou comme élément de purification dans divers procédés de traitements des autres usines locales
- Le bénéfice écologique généré par le projet (réduction de la déforestation évitée par la substitution du charbon de bois et du bois de chauffe)
- Biodiversité et processus écologique ;
- La réduction des gaz à effet de serre par la séquestration de ceux-ci par les forêts économisées

### **IX.4. Économie de forêt**

Actuellement, le bois et le charbon de bois constituent les principales sources d'énergie des ménages et des services à Madagascar, il en est de même à propos des ressources en matériaux de construction. Les pressions sur nos ressources forestières sont de plus en plus fortes pour satisfaire les besoins de chaque ménage en énergie et chaque personne créant un logement. La substitution de ces derniers par les produits dérivés de bambou peut atténuer ces pressions.

---

## **IX.5. Impact social et économique :**

Pour la société, ce projet permet d'offrir :

- Des emplois, mais plus de cela en comptant les paysans fournisseurs en matières premières.
- Une évolution sociale et économique pour la région.
- Une amélioration de l'économie du pays (diminution de l'importation de charbon actif par les usines importatrices du pays).

## **IX.6. Mesures d'atténuation des impacts négatifs et de réduction des nuisances générées par le projet**

### **IX.6.1. Gestion des rejets atmosphérique**

Afin d'atténuer les impacts négatifs des rejets atmosphériques du projet, les dispositions à entreprendre seront : l'élimination des gaz toxiques et l'atténuation des émissions atmosphérique dues à la combustion du charbon de bois issus des bois énergies.

### **IX.6.2. Gestion des déchets solides**

Il faudra éviter que cela n'évolue pas vers un conflit social pour atteindre cet objectif, des activités doivent être entreprises :

- Un recyclage des fines de charbon
- Une mise en place d'un système de collecte des déchets solides (moyen de collecte et de transport,...)

### **IX.6.3. Gestion des forêts :**

Afin d'atténuer les impacts de la déforestation, il faudra mettre en place un système d'approvisionnement en bois énergie. Le système consiste à mettre en place une plantation d'arbres à croissance rapide. Les critères de choix des espèces sont l'adaptation aux conditions climatiques de la zone, la croissance rapide, la résistance au passage du feu.

Cependant, durant les sept premières années de production (la plantation d'arbre à croissance rapide ne sera pas encore exploitable), on utilisera l'élagage des arbres des forêts environnantes. La plantation des arbres à croissance rapide devra débuter avec l'installation des infrastructures du projet.

Toutefois, les aires de forêts affectées par la mise en place et le fonctionnement du projet seront compensées par le reboisement de celle-ci ou son équivalent dans les zones déboisées de la région.

---

## CONCLUSION

Les essais, études et analyses effectuées dans le cadre de ce travail, ont illustré que le bambou est valorisable en forme de charbon combustible et charbon actifs. La pyrolyse et le procédé d'activation sont les technologies appropriées pour l'obtention de ces produits. La méthodologie adoptée est à la fois quantitative et qualitative. Sa concrétisation à terme nécessite à priori par le passage à travers l'ordre chronologique des différentes activités suivantes :

- La recherche bibliographique relative à ce thème de recherche qui a montré que :

Le bambou a le pouvoir de diminuer le taux de déforestation grâce à la croissance rapide du bambou, sa forte production d'oxygène, sa capacité de contrôler l'érosion grâce à ses rhizomes, sa conservation des sols et de l'eau, sa prévention des glissements de terrain, ainsi que son absorption très importante de dioxyde de carbone.

- La descente sur le site d'étude qui n'est autre que la commune rurale d'Amborobe permettant de voir de près la réalité sur place, et collecter les échantillons de bambou pour des travaux d'expérimentation.
- "Production de charbon combustible et charbon actifs à partir du bambou" au CNRIT avec l'obtention des jus pyroligneux ou vinaigre de bambou après carbonisation et activation du charbon de bambou ;
- La détermination des caractères physico-chimiques des charbons de bambou qui a permis de déterminer le PCI avec une valeur de 6237,28 Kcal / kg qui peut être utilisé dans l'usage industriel, la caractérisation et classification des charbons actifs, détermination des tests d'efficacité énergétique du charbon de bambou ;
- Détermination de l'études comparatives du charbon de bambou avec d'autres combustibles.
- Et pour terminer l'impact environnemental

Au terme de ce travail de recherches, force est d'admettre que l'objectif initialement fixé est atteint. Le charbon actif a une surface spécifique de 720 m<sup>2</sup>/g à 900 m<sup>2</sup>/g qui est six fois plus que le noir de carbone. Aussi, Le charbon de bambou est un combustible solide apte à concurrencer le bois énergie. L'étude comparative de l'efficacité énergétique des combustibles a montré que le PCI et la consommation en combustible du charbon de bois et celui du charbon de bambou diffère de peu, ce qui montre que le charbon de bambou est considéré comme le combustible alternatif au bois énergie et capable de substituer le bois énergie au niveau des ménages.

---

## REFERENCES

### REFERENCES WEBOGRAPHIQUE

- [W1] : <https://oalo.co/>, consulté le 02 Décembre 2022
- [W2]:<https://www.cotemaison.fr/plantes-fleurs/tout-savoir-sur-le-bambou-plante-d-avenir>, consulté le 15 Novembre 2022
- [W3] : <https://valiha.eu/le-bambou-ses-multiples-qualites/>, consulté le 15 Novembre 2022
- [W4] : <https://www.novomeuble.com/blog/le-bambou-n33&ved>, consulté le 15 Novembre 2022
- [W5] : <https://www.le-chatel-des-vivaces.com/content/24-la-physiologie-du-bambou>, consulté le 26 Novembre 2022
- [W6] : <https://www.jardiniers-professionnels.fr/le-bambou>, consulté le 15 Novembre 2022
- [W7]: <https://www.prota4u.org/database/>, consulté le 25 Novembre 2022
- [W8]: <https://www.aujardin.info/?amp>, consulté le 18 Novembre 2022
- [W9]: <https://bambouenfrance.fr/>, consulté le 20 Novembre 2022

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] : Mémoire Pour obtenir le diplôme de MASTER en Chimie, Option : Chimie Physique et Analytique de Madame Badra FEDDAL-BENABED, Etude des propriétés thermophysiques des mélanges contenant des composés dérivés de la biomasse.
- [2] : Claude ROY / CGAAER / CLUB des Bio-économistes, Paul LUCCHESI / CEA , 28/29 mars 2013, La biomasse – Energies nouvelles et renouvelables, Introduction aux usages énergétiques de la biomasse,
- [3] : C'est quoi la biomasse ?, [www.edora.be](http://www.edora.be)
- [4] : LA BIOMASSE ÉNERGIE 2e édition, Alain Damien
- [5] : Valorisation de la filière bambou dans les zones orientales de Madagascar : contraintes et opportunités, BOIS ET FORÊTS DES TROPIQUES, 2013, N° 316 (2) 79 CULTURE DU BAMBOU / LE POINT SUR...
- [6] : Mémoire de Fin d'Étude en vue de l'obtention du diplôme d'INGÉNIEUR EN GENIE CHIMIQUE, présenté par Mademoiselle Sonnette Ruffine RAFALIMANJAKA, Soutenu le 07 Avril 2011, Valorisation du BAMBOU GEANT de Madagascar,
- [7] : PRÉPARATION ET MODIFICATION DE CARBONES ACTIVÉS POUR L'ADSORPTION DE POLLUANTS ORGANIQUES ÉMERGENTS : molécules pharmaceutiques et liquides ioniques,

- 
- [8] : Thèse de “HanenGuedidi Ben Slama” pour obtenir le grade de Docteur de l’université de GRENOBLE, soutenu le 16 Février 2015, SYNTHÈSE ET ETUDES DES CHARBON ACTIFS POUR LE TRAITEMENT DES EAUX USÉES D’UNE TANNERIE,
- [9] : Mémoire présenté par Monsieur HADOUN HOCINE soutenu le 10 Juin 2010 pour l’obtention du Magister en Génie des Procédés. PREPARATION ET CARACTERISATION D’UN CHARBON ACTIF à PARTIR DE TIGES DE DATTES : application au traitement d’un effluent contaminé par le cadmium
- [10] : Mémoire de fin d’étude de Master Académique présenté par Gharbi Hanane Kheira et GuentrahKhadidja soutenu le 12 JUILLET 2021, ISOTHERMES D’ADSORPTION D’UN POLLUANT DE L’INDUSTRIE TEXTILE,
- [11] : Projet de fin d’étude en vue de l’obtention du diplôme d’ingénieur de conception présenté par Patrick.D.E.MFOUAPON le Juillet 2007, ETUDE DE FAISABILITÉ D’UNE UNITÉ DE PRODUCTION DE CHARBON VERT,
- [12] : Mémoire de fin d’études en vue de l’obtention du diplôme de Master II, présenté publiquement par SOLOHELY Raoby Elysa, soutenu le 03 Mai 2017, SENSIBILISATION PAR LA GEOEDUCATION ET LA GEOETHIQUE DES JEUNES LYCEENS DU DISTRICT DE VOHIPENO,
- [13] : Mémoire en vue de l’obtention du diplôme Master en géographie, Présenté par RANDRIANATOANDRO Ravakiniaina Koloina, le 23 Février 2018, ENJEUX DE DURABILITÉ DE LA FILIÈRE BAMBOU DANS LA RÉGION ATSIANANA
- [14] : SUIVIS HYDROLOGIQUES DE DEUX BAS FONDS DRAINES ET GUIDE D’AMENAGEMENT D’UN BAS FOND DANS LE SUD EST DE MADAGASCAR, Mémoire de fin d’études en vue de l’obtention du diplôme d’Ingénieur, représenté par RASOAMAMPIANINA Andonirina Soloniaina Onjatiana, soutenu le 03 Novembre 2008.
- [15] : PROJET DE CREATION D’UNE BOULANGERIE DANS LA VILLE DE VOHIPENO (Région Vatovavy Fitovinany), Mémoire pour l’obtention du diplôme de Maitrise en Sciences de Gestion, Présenté et soutenu par Evrad Raymond RAZAFINDRATSIMBA, soutenu le 16 Juin 2009.

---

## **Annexe 1 : PRESENTATION DU LIEU DU STAGE**

### **1. Le Centre National de Recherches Industriel et Technologique (CNRIT)**

Le Centre National de Recherche Industrielle et Technologique connu sous le sigle CNRIT est un établissement public à caractère industrielle et commerciale (EPIC) doté de la personnalité morale jouissant de l'autonomie de gestion administrative et financier situé au 38, rue Rasamimanana Fiadanana , Antananarivo 101. Il a été régi par le statut juridique (EPIC).

Le CNRIT est un centre national de recherche industrielle et technologique. Il est un établissement public à caractère scientifique, technique et économique.

Statut Juridique : EPIC

Adresse : 38, rue Rasamimanana Fiadanana, Antananarivo 101

Tél : 020 22 635.20 Mobile : 032 04 452 39 (directeur)

E-mail : [cnrit@moov.mg](mailto:cnrit@moov.mg)

Année de création : 1987



Figure 16 : Logo du CNRIT

### **2. Historique du CNRIT :**

Le Centre National de Recherche Industrielle et Technologique (C.N.R.I.T), sise au 38 rue Rasamimanana, Fiadanana Tsimbazaza, 101 Antanarivo, est un établissement public à caractère scientifique, technique et économique.

Il a été créé suivant le décret n° 87-288 du 28 juillet 1987 modifié par le Décret n°92-469 du 22 avril 1992 portant la création et organisation d'un Centre Nationale de Recherches Industrielles et Technologique ( CNRIT) et réorganisé par le décret n°- 2016 – 460du 11 Mai 2016 portant nomination des membres du gouvernement placé sous la tutelle technique du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (MESupRES) et sous la tutelle financière de l'Economie, des Finances et du Budget (MEFB). C'est ce dernier qui assure le financement de ce centre.

---

### **3. Objet du CNRIT :**

Le CNRIT a pour objet de :

- participer à l'élaboration et à la conduite de la politique nationale de recherches technologique devant appuyer le développement industriel et agro-industriel ;
- promouvoir l'exploitation économique des résultats de recherches et s'assurer à cette fin la collaboration de partenaires gouvernementaux ou privés, nationaux ou étrangers ;
- contribuer à la formation de personnel scientifique et technique dans le domaine précité;
- contribuer au rassemblement, au traitement et à la diffusion des informations scientifique et technique en relation avec le centre d'information et de documentation scientifique et technique (CIDST) du ministre de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique;
- valoriser et d'appliquer les résultats des recherches pour les besoins des agents économiques ;
- exécuter généralement toutes opérations se rattachant directement ou indirectement en totalité ou en partie à l'objet ci-dessus spécifié, ou à tous objets similaires, connexes ou susceptibles d'en favoriser la réalisation.

### **4. Mission du CNRIT :**

Pour l'accomplissement de ses missions, le CNRIT pourra :

- créer et subventionner des équipes pluridisciplinaires de recherches sur des projets déterminés, financés sur fonds publics ou sur fonds de conventions;
- regrouper les laboratoires sur des thèmes de recherches ;
- organiser et financer des voyages et séjours des équipes de chercheurs travaillant pour son compte;
- construire et gérer des grands équipements de recherche dans le cadre d'accords bilatéraux, régionaux ou internationaux;
- participer à l'exploitation économique et commerciale des résultats de recherches notamment par la création des sociétés privés avec le concours d'autres services de l'état, des collectives locales ou d'autres organismes publics ou privés, nationaux ou étrangers;
- participer à l'élaboration et à la mise en œuvre d'accord de coopération scientifique pour le développement ;
- procéder à une évaluation des résultats des actions menées et de qualité des travaux accomplis par ses équipes et ses chercheurs ;
- organiser des réunions, des colloques et séminaires dans différents domaines relevant de ses compétences ;

- 
- oublier les résultats de recherches et des activités des chercheurs dont la figure (2) montre la face de ce Centre de Nationale de Recherche Industrielle et Technologique CNRIT.



Photo 56 : vue du CNRIT

---

## Annexe 2 : METHODE DE CALCUL DE LA SURFACE SPECIFIQUE D'UN ADSORBANT

Il existe différentes méthodes pour déterminer la surface spécifique (SS) d'un adsorbant tel que la méthode BET (**Brunauer, Emmett et Teller**) et les méthodes tirées à partir des formules empiriques correspondant à un adsorbant donné.

- Méthode de BET

En partant des hypothèses de base de la théorie de BET, une isotherme d'adsorption exprime, pour un couple adsorbant-adsorbant à une température donnée, la capacité d'adsorption à l'équilibre thermodynamique en fonction de la pression partielle ou de la concentration de la phase gazeuse. Plus la pression partielle du gaz dans le milieu est élevée, plus la quantité de composé adsorbé par unité de masse d'adsorbant est importante. L'isotherme d'adsorption permet d'accéder à la surface spécifique. Les surfaces spécifiques sont calculées selon la méthode BET ou l'équation de BET se présente comme suit :

$$\frac{P/P_0}{Q(1 - P/P_0)} = \frac{1}{Q_m c} + \frac{c - 1}{Q_m c} \cdot P/P_0$$

$Q$  = quantité adsorbée à la pression

$Q_m$  = quantité de gaz nécessaire pour recouvrir 1 g d'adsorbant d'une seule couche de gaz

$c$  = constante de BET définie comme suit :

$$c = \exp [(\varepsilon_l - \varepsilon_L)/RT]$$

$\varepsilon_l$  = chaleur différentielle d'adsorption des molécules à la surface du solide

$\varepsilon_L$  = chaleur latente de liquéfaction de la vapeur à température considérée

$R$  = constante des Gaz Parfait

$T$  = température absolue (K)

$\frac{P/P_0}{Q(1 - P/P_0)} = f(P/P_0) \rightarrow y = ax + b$ , cette droite affine a comme pente :  $a = \frac{c-1}{Q_m c}$  et d'ordonnée

à l'origine  $b = \frac{1}{Q_m c}$ . D'après  $a$  et  $b$  on en déduit  $Q_m$  et  $c$ .

$$\text{D'où } Q_m = \frac{1}{a+b} \text{ et } c = \frac{a}{b} + 1$$

Les droites obtenues de pente  $\alpha$  et d'ordonnée à l'origine  $\beta$  permettent de déterminer les constantes  $Q_m$  etc. Ainsi, la connaissance de  $Q_m$  permet de déterminer la surface spécifique en appliquant la relation suivante :

$$S_{BET} = Q_m N \sigma$$

Où  $\sigma$  : surface occupée par une molécule d'adsorbant

---

N : nombre d'Avogadro =  $6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

- Formule empirique

En supposant que les particules ont de formes sphériques, la surface spécifique peut être exprimée comme suit :

$$SS = \frac{6 \times (1 - \text{porosité})}{\text{diamètre des sphères}}$$

Avec

SS : surface spécifique en  $\text{m}^2/\text{g}$

R : le rayon d'une particule

N : le nombre de particules

S : la surface d'une particule

V : le volume d'une particule

$V_{\text{tot}}$  : le volume total de l'échantillon

$$\begin{cases} S = 4\pi R^2 \\ V = \frac{4}{3}\pi R^3 \end{cases}$$

D'après la définition de la SS auparavant, elle n'est pas par rapport au volume des sphères mais par rapport au volume total du support poreux d'où l'expression suivante :

$$SS = \frac{NS}{V_{\text{tot}}} \quad (2)$$

$V_{\text{tot}}$  : volume de milieu poreux.

Et avec la relation reliant le volume de la zone poreuse ( $V_{\text{tot}}$ ) et le volume de toutes les sphères (NV), on a :

$$NV = (1 - \text{porosité}) \times V_{\text{tot}} \quad (3)$$

D'où 
$$V_{\text{tot}} = \frac{NV}{1 - \text{porosité}} \quad (4)$$

D'après la relation (3) et (4), (2) devient :

$$SS = \frac{NS (1 - \text{porosité})}{NV} = \frac{3 (1 - \text{porosité})}{R} = \frac{6 \times (1 - \text{porosité})}{\text{diamètre des sphères}} \quad (1)$$

Avec (1 - porosité) est la portion de solide dans le milieu. Et la porosité, c'est justement la fraction du volume qui n'est pas occupé par les sphères (particules)

---

## TABLE DES MATIERES

TENY FISAORANA .....	i
REMERCIEMENTS .....	iii
LISTE DES FIGURES .....	v
LISTE DES PHOTOS .....	vi
LISTE DES TABLEAUX .....	viii
LISTE DES ANNEXES .....	ix
LISTE DES ABREVIATIONS .....	x
SOMMAIRE .....	xii
INTRODUCTION.....	1
PARTIE I : ETAT DE CONNAISSANCES.....	3
Chapitre I : LA BIOMASSE .....	3
I.1. Introduction [1] .....	3
I.2. Définitions et généralités.....	3
I.2.1. Biomasse liquide (BML) [5].....	4
I.2.2. Biomasse solide (BMS) [5] .....	5
I.3. Les composés organiques produits par la nature.....	6
I.3.1. La production directe de biomasse [4] .....	6
I.3.2. La production indirecte de biomasse [4] .....	7
I.3.3. Le carbone fossile [4] .....	7
I.3.4 Les produits intermédiaires [4].....	8
I.4.Les cultures dédiées à la production d'énergie [1] .....	9
I.4.3. Les plantes aquatiques et les algues [1].....	10
I.5. Diversité des ressources et diversité des usages [3].....	10
I.5.1. Transformation par combustion.....	10
I.5.2. Transformation par gazéification.....	11
I.5.3. Transformation par méthanisation [3] .....	12

I.5.4. Production des biocarburants [3] .....	12
I.6. Diversité des opportunités [3] .....	13
I.6.3. Sur le plan socio-économique.....	13
I.7. Les résidus de la biomasse .....	14
I.7.1. Agriculture [1] .....	14
I.7.2. Les forêts [1].....	14
I.7.3. La biomasse des déchets.....	14
Chapitre II : LE CHARBON ACTIF .....	16
II.1. Introduction.....	16
II.2. Généralités sur les charbons actifs .....	16
II.3. Adsorption sur les carbones activés .....	18
II.3.1. Définition de l'adsorption .....	18
II.3.2. Types d'adsorption.....	18
II.3.3. Adsorption physique .....	18
II.3.4. Adsorption chimique .....	19
II.3.5. Les adsorbants .....	19
II.4. Préparation des carbones activés .....	20
II.4.1. Pyrolyse.....	20
II.4.2. Activation .....	21
II.5. Morphologie.....	23
II.5.1. Charbon actif en poudre ou (CAP).....	23
II.5.2. Charbon actif en grain OU (CAG) .....	24
II.5.3. Tissu de carbone activé .....	24
.....	24
II.5.4. Charbon actif texture .....	25
II.6. Structure poreuse [7].....	27
II.7. Nature chimique de la surface d'un charbon activé [7] .....	28

---

II.8. Elaboration de charbon actif [8] .....	29
II.8.1. Matières premières .....	29
II.9. Les bienfaits du charbon actif [W1].....	30
Chapitre III : GÉNÉRALITÉS SUR LES BAMBOUS .....	32
III.1. Introduction .....	32
III .2. Les caractéristiques du bambou.....	34
III.2.1. Le rhizome .....	34
III.2.2. La feuille .....	35
III.2.3. Le chaume .....	35
III.2.4. Turion :.....	36
III.2.5. Les racines secondaires.....	36
III.2.6. Les gaines de chaumes.....	37
III.3. Floraison du bambou .....	37
III.4. Croissance et propriétés du bambou .....	38
III.4.1. Croissance .....	38
III.4.2. Propriétés du bambou .....	38
III.5. Répartition géographique du bambou.....	39
III.6. Bienfaits environnementaux .....	39
III.7. Le bambou source de bioénergie .....	39
III.8. Les utilisations du bambou .....	40
III.9. Importances socio-économiques et écologiques du bambou [13].....	40
III.10. Classifications [6].....	41
III.10.1. Classement botanique .....	41
III.11. Bambous <i>dendrocalamus asper</i> [W7] .....	42
III.11.1. Origine et répartition géographique .....	42
III.11.2. Description du <i>Dendrocalamus asper</i> .....	42
III.11.3. Variétés ou espèces intéressantes [W8] .....	44

III.11.4. Usages .....	44
III.11.5. Propriétés .....	44
III.11.6. Ecologie .....	45
III.11.7. Perspectives.....	45
<b>PARTIE II : MATERIELS ET METHODES .....</b>	<b>46</b>
<b>Chapitre IV : LES MATERIELS UTILISES .....</b>	<b>46</b>
IV.1. Description des matériels rôles respectifs .....	46
IV.2. Matériels pour la classification des charbons actifs .....	50
IV.3. Matériels pour la caractérisation expérimentale des charbons actifs .....	51
IV.4. Matériels pour la détermination des caractères physico-chimiques .....	51
<b>Chapitre V : METHODES .....</b>	<b>55</b>
V.1. La méthodologie de recherche.....	55
V.2. Présentation de la zone d'études : commune rurale d'Amborobe .....	56
V.2.1. La présentation de la zone.....	56
V.2.2. La description du milieu d'étude .....	57
V.2.3. Les études socio-culturelle et économique de la commune.....	58
V.3. Utilisations du bambou dans la zone d'étude : .....	59
<b>Chapitre VI : ETUDES EXPERIMENTALES .....</b>	<b>62</b>
VI.1. La production du charbon combustible et charbon actif à partir du bambou.....	62
VI.1.1. Les méthodes de transformation du charbon combustible et charbon actif.....	62
VI.1.2. Classification des CA (Charbon Actif).....	66
VI.1.3. Caractérisation expérimentale des charbons actifs .....	66
VI.1.4. Détermination des caractères physico-chimiques.....	68
VI.1.5. Les tests d'efficacité énergétique.....	71
<b>PARTIE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS .....</b>	<b>47</b>
<b>Chapitre VII : RESULTATS .....</b>	<b>77</b>
VII.1. Résultats de la carbonisation.....	77

VII.1.1. Présentation des produits :.....	77
VII.1.2. L'influence de la température durant l'expérimentation.....	77
VII.1.3. Résultats des différents essais de carbonisations .....	80
VII.2. Résultats de l'activation.....	81
VII.2.1. Présentation des produits.....	81
VII.2.2. Résultats des différents essais d'activations du bambou.....	84
VII.2.3. Les domaines d'utilisation de ces produits :.....	84
VII.3. Résultat de la classification du charbon actif.....	86
VII.4. Résultats de la caractérisation expérimentale des charbons actifs.....	87
VII.4.1. Comparaison du CAP avec le CAG .....	87
VII.4.2. Estimation de la surface spécifique du CA .....	88
VII.5. Résultat de la détermination des caractères physico-chimiques du charbon de bambou.....	88
VII.6. Résultats des tests d'efficacité énergétique du charbon de bambou à partir des tests d'ébullition d'eau. ....	90
VII.6.1. Détermination de la consommation en charbon de bambou en utilisant le foyer amélioré.....	90
VII.6.2. Détermination de la puissance et de l'efficacité énergétique du foyer amélioré par l'utilisation du charbon de bambou de comme combustible .....	91
Chapitre VIII : DISCUSSIONS .....	93
Chapitre IX : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU PROJET .....	94
IX.2. Identifications des impacts négative du processus sur l'environnement .....	94
IX.2.1. Impacts négatifs .....	94
IX.2.2. Impacts positifs .....	95
IX.3. Enjeux environnementaux et sociaux.....	95
IX.4. Économie de forêt .....	95
IX.5. Impact social et économique : .....	96
IX.6. Mesures d'atténuation des impacts négatives et de réduction des nuisances générées par le projet.....	96

---

IX.6.1. Gestion des rejets atmosphérique .....	96
IX.6.2. Gestion des déchets solides .....	96
IX.6.3. Gestion des forêts : .....	96
CONCLUSION .....	95
REFERENCES .....	96
REFERENCES WEBOGRAPHIQUE .....	96
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE.....	96
Annexe 1 : PRESENTATION DU LIEU DU STAGE .....	I
1. Le Centre National de Recherches Industriel et Technologique (CNRIT) .....	I
2. Historique du CNRIT : .....	I
3. Objet du CNRIT : .....	II
4. Mission du CNRIT : .....	II
Annexe 2 : METHODE DE CALCUL DE LA SURFACE SPECIFIQUE D'UN ADSORBANT .....	IV
RÉSUMÉ.....	XV
ABSTRACT .....	XV

---

**Auteur :** RAZAFIMANANTSOA Nomenjanahary Sarobidy Elodie

**Titre :** PRODUCTION DE CHARBON COMBUSTIBLE  
ET CHARBON ACTIF À PARTIR DU BAMBOU

**Nombre de pages :** 97

**Nombre de tableaux :** 10

**Nombre de figures :** 16

**Nombre de photos :** 56



## RÉSUMÉ

Antoine Lavoisier a dit " Dans la nature, rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme." Cela représente l'essence même de ce projet de mémoire. Ce dernier qui a permis de prouver que le bambou peut être valorisé sous forme de charbon combustible et charbon actifs dont la technologie appliquée est la pyrolyse suivie de l'activation.

Aussi, le présent contribue non seulement à la préservation des ressources forestières mais aussi à l'environnement parce que le fait d'utiliser le charbon de bambou comme combustible n'aura pas d'impact sur l'environnement car les CO<sub>2</sub> émis par sa combustion sont absorbés par ses propres feuilles.

**Mots clés :** bambou, charbon combustible, charbon actifs, pyrolyse, activation

## ABSTRACT

Antoine Lavoisier said "in nature, nothing is lost, nothing is created, everything is transformed." This represents the very essence of this memory project. The latter which made it possible to prove that bamboo can be recovered in the form of combustible carbon and active carbon whose applied technology is pyrolysis followed by activation.

Also, this contributes not only to the preservation of forest resources but also to the environment because the CO<sub>2</sub> emitted by its combustion are absorbed by its own leaves.

**Keywords :** bamboo, combustible carbon, active carbon, pyrolysis, activation

**Rapporteur :** Professeur RASOANAIVO Jean Luc

**Contact :** +261346531317 / sarobidylodie26@gmail.com