

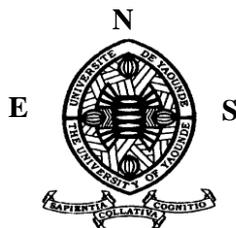
REPUBLICQUE DU CAMEROUN

Paix-Travail-Patrie

MINISTERE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

ECOLE NORMALE SUPERIEURE
DE YAOUNDE I



REPUBLIC OF CAMEROON

Peace-Work-Fatherland

MINISTRY OF HIGHER
EDUCATION

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

HIGHER TEACHER TRAINING
COLLEGE OF YAOUNDE I

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

DEPARTMENT OF PHYSICS

**CONTRIBUTION A LA DETERMINATION
DES CARACTERISTIQUES PHYSICO-
CHIMIQUES DES BOIS TROPICAUX
COMBUSTIBLES : CAS DE L'AZOBE ET
DU SAPELLI**

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Professeur
de l'Enseignement Secondaire deuxième grade (DIPES II)

Par:

BIKEK Noé Gervais

Titulaire du DIPES I - Licencié en physique

Matricule: 06Y569

Sous la direction de :

Dr NSOUANDELE Jean Luc

Chargé de cours à l'Université de Maroua

ANNEE ACADÉMIQUE: 2015-2016

DEDICACE :

Je dédie ce travail

A

Ma maman NDOLLO EYENGUE Pauline

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je voudrais dire merci au seigneur Dieu tout puissant de m'avoir accordé sa grâce et sa miséricorde.

J'adresse également mes sincères remerciements à :

- **Dr NSOUANDELE Jean Luc** chargé de cours à l'Université de Maroua pour son encadrement ainsi que sa disponibilité dans l'élaboration de ce mémoire.
- **Pr BEGUIDE BONOMA** chef de département de physique pour m'avoir donné les moyens de réaliser ce travail.
- tous les enseignants du département de physique de l'E.N.S de Yaoundé pour leurs enseignements.
- A ma maman **Mme NDOLLO EYENGUE Pauline**
- Ma tante **KILLE Odette Yvonne** pour son soutien.
- Mon fils **BIKEK EYENGUE Stève Loïc**
- mes frères et sœurs.
- tous mes camarades de promotion.
- Mes camarades de la F.S.E pour le soutien et les conseils, en particuliers **EDOU MARTIAL, NGO IPOUMB Madeleine Karelle, NGO BILONG Augustine, NGAN Stéphane, BILOA EYANA Antoinette.**
- à tous ceux ou celles qui de près ou de loin ont contribué au bon déroulement de ce travail.

SOMMAIRE

Dédicace

Remerciements

Abstract

Résumé

INTRODUCTION

CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTERATURE

I-I- GENERALITES SUR LE BOIS DE FEU

I-I-1- Définition et historique du bois de feu

I-I-1-1-Définition du bois

I-I-1-2- Historique du bois de feu

I-I-2-Le bois de feu légal et le bois de feu illégal

I-I-2-1-Le bois de feu légal

I-I-2-2-Le bois illégal

I-I-3- Composition chimique

I-I-4-Avantages et inconvénients du bois de feu

I-I-4-1-Avantages

a) Avantages techniques

b)Avantages environnementaux

c) Avantages socio-économiques

I-I -4-2- Inconvénients du bois combustible

I-II-COMBUSTION

I-II-1-Définition

I-II-2- Eléments influents sur la combustion

I-II-2-1- La température

I-II-2-2- La rapidité de la carbonisation

I-II-2-3- La matière première

I-II-2-4- La qualification du foyer

I-II-2-5-Les conditions météorologiques

I-II-3- Les techniques de combustion

I-III- LE BOIS DE FEU AU CAMEROUN

I-III-1- Production

I-III-2- Conditionnement et transport

I-III-3- Commercialisation et consommation

I-III-4- Les Foyers améliorés

CHAPITRE II: MATERIEL ET METHODES

II-1- MATERIEL

II-1-1- les bois

II-1-2-les appareils

a) une Etuve

b) une balance et pied à coulis

c) une tôle en aluminium

d) un four

II-2-METHODES

II.2-1-methode expérimentale de la détermination de la teneur en eau des échantillons

II-2-2-methode expérimentale de la détermination des paramètres thermophysiques de la masse volumique

II-2-3-Approches méthodologiques à la caractérisation du pouvoir calorifique inférieur

II.2-3-1-Définition du pouvoir calorifique

II.2-3-2 Unité de mesure du pouvoir calorifique

II.2-3-3-Types de pouvoirs calorifiques

II.2-3-4-Détermination du pouvoir calorifique

a) Détermination par mesure directe

b) Détermination par calcul approché

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

III-1-RESULTATS DU SECHAGE DES ECHANTILLONS DES BOIS AUX LABORATOIRES.

III-2-RESULTATS DU PCI DES ECHANTILLONS DES BOIS AUX LABORATOIRES

III-2-1-Approche analytique

III-2-2-Première Approche ou Semi-empirique

III-2-3-Deuxième ou Approche empirique

III-2-4-Confrontation des différentes Approches

III-3-RESULTATS THEORIQUES DU PCI DES ECHANTILLONS DES BOIS AUX LABORATOIRES

III-3-1-Interpolation linéaire : Méthode des moindres carrés

III-3-1-2- Calcul de l'erreur sur les coefficients a et b.

III-3-2-Calcul du coefficient de corrélation entre PCI et HB.

CHAPITRE IV : IMPLICATION DU SUJET SUR LE SYSTEME EDUCATIF.

IV-1-LES TYPES DE COMBUSTION

- a) Les éléments qui entrent dans la combustion
- b) La combustion complète
- c) La combustion incomplète

IV-2-INVENTAIRE DES BOIS

IV-3-UTILITE SCIENTIFIQUE

IV-4- FICHE PEDAGOGIQUE

CONCLUSION GENERALE

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

RESUME

Il est question dans ce travail, de contribuer à la détermination des caractéristiques physico-chimiques des bois combustibles au Cameroun. Cette étude pourra permettre de faire un classement des bois en fonction de la réaction à la combustion, connaissant les caractéristiques physico-chimiques. Deux types d'essences ont été choisis pour mener cette expérience : l'Azobe et le Sapelli. A partir des morceaux de ces essences que nous avons préalablement pesés à l'aide d'une balance, puis séchés à l'aide d'une Etuve, nous avons obtenus des données telles que : les masse brutes des essences, les masses anhydres. La combustion de ces essences a permis d'obtenir les masses des cendres ; ce qui a facilité le calcul du taux de cendre, des teneurs en eau et des PCI à partir des formules mathématiques qu'on retrouve dans la littérature. Des courbes montrant l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps et l'évolution du PCI en fonction de la teneur en eau, ont été tracées. Les résultats des courbes obtenus nous a permis d'affirmer d'une part que la teneur en eau d'un combustible diminue avec le temps, et d'autre part que le PCI d'un combustible augmente lorsque sa teneur en eau diminue. Un corps se consume aussi vite que son PCI est grand. L'analyse des résultats que nous avons obtenus nous amène à faire quelques suggestions susceptibles de résoudre les difficultés que rencontrent les usagers. Nous pouvons donc proposer par exemple l'utilisation des bois légers pour des besoins domestiques, l'utilisation des bois légers et mi-lourds pour les besoins industrielle ; plus un bois est légers, plus sont PCI est grand et donc favorable à la combustion.

ABSTRACT

This work is aimed at studying the contribution to the determination of the physico-chemical properties of combustible wood in Cameroon. This study will enable the classification of woods depending on combustion reaction with regards to the physico-chemical properties of each. In the case of our experimentation, we choose two types of wood :Azobe and Sapelli. With some pieces of those wood that have previously been weighed with a scales and dried with a proofer chamber, we obtained datum such as : gross mass and anhydrous mass of the essences. The combustion of those essences led to the obtention of ash masses, which facilitated the calculation of ash content, water content and net calorific value through mathematic formulae. Curves, showing the evolution of water content depending on time and net calorific value have been drawn. The results of these curves led us to the conclusion that water content of a fuel decreases over time while the net calorific value increases when its water content decreases. A substance get consumed as faster as its net calorific value is higher. The analysis of the obtained results leads to some suggestion. We can therefore suggest to wood users the use of light wood for domestic needs and the use of half-heavy wood for industrial needs. The more the wood is light, the more its net calorific value is higher and favorable for combustion.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

A.F.NOR : Association Française de la Normalisation

N.F.B : Norme Française du BOIS

E.N.S : Ecole Normale Supérieure

F.S.E : Faculté des Sciences de l'Éducation

C.T.F.C : Centre Technique de la Forêt Communale

C.I.R.A.D : Centre de coopération International en Recherche en Agronomie pour le Développement

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieure

PCS : Pouvoir Calorifique Supérieure

CO₂ : dioxyde de carbone

H₂O : molécule d'eau

O₂ : molécule de dioxygène

HB : humidité sur brut

X : humidité sur sec

M_{HB} : masse de l'échantillon en teneur d'eau HB

M_o : masse de l'échantillon anhydre

M_X : masse de l'échantillon à l'humidité X

ρ_x : masse volumique de l'échantillon x

V_X : volume de l'échantillon à l'humidité X

L : longueur de l'échantillon X

l : largeur de l'échantillon X

e : épaisseur de l'échantillon X

C : taux de carbone

A : taux de cendre

R : coefficient de corrélation

M : masse molaire moléculaire du composé C_xH_yO_z

C% : pourcentage en masse du carbone

H% : pourcentage en masse de l'hydrogène

N% : pourcentage en masse de l'azote

LISTE DES FIGURES

- Figure 1-1 : conditionnement du bois en saison sèche.
- Figure 1-2 : modes de transport du bois de chauffe au Cameroun
- Figure 1-3 : principaux utilisateurs du bois de chauffe au Cameroun
- Figure 1-4 : foyers améliorés utilisés pour la préparation de l'odontol
- Figure 1-5 : foyers améliorés modernes citadines.
- Figure 2-1 : le bois sapelli
- Figure 2-2 : le bois Azobé
- Figure2-3 : Etuve électrique de marque MEMMERT
- Figure2-4a : balance numérique OHAUS CS 200
- Figure2-4b : pied à coulisse
- Figure2-5 : Tôles en Aluminium
- Figure2-7 : Cendres recueilli après combustion
- Figure3-1 : Evolution de la teneur en eau du Sapelli et l'Azobe.
- Figure3-2 : Evolution du PCI du Sapelli et l'Azobe, Approche analytique.
- Figure3-3 : PCI du Sapelli et l'Azobe en fonction de la teneur en eau, Approche semi-empirique.
- Figure 3-4 : PCI en fonction du PCS et de la masse volumique tous fonction de la teneur en eau.
- Figure 3-5 : Différentes approches méthodologiques de détermination du PCI du Sapelli.
- Figure 3-6 : Différentes approches méthodologiques de détermination du PCI de l'Azobe.
- Figure 3-7 : Equation des droites de régression linéaire du Sapelli.
- Figure 3-8 : Equation des droites de régression linéaire de l'Azobe.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : correspondance en unité du pouvoir calorifique

Tableau 2 : valeurs des masses et taux de cendre du sapelli et l'azobe.

INTRODUCTION GENERALE

Le bois est de loin l'une des importantes sources d'énergie et matières premières disponibles pour la satisfaction des besoins humains. Le Cameroun possède une surface de forêt estimée à environ 17,5 millions d'hectares, soit environ 44% de sa superficie (Bodelaire KEMAJOU 2011). Il est clair que l'exploitation abusive des forêts tropicales camerounaise conduit à l'extinction d'espèces animales et végétales, au déboisement et à la pollution ; d'où l'interdiction d'exploitation de certaines espèces de bois par le gouvernement camerounais.

Dans le but d'accroître la production, certaines industries choisissent de consommer le bois et de l'utiliser comme source d'énergie. Pour cela donc, l'étude de la combustion du bois attire l'attention de nombreux chercheurs et fait l'objet des travaux scientifiques aussi bien théoriques qu'expérimentaux. Pour parvenir à des résultats assez spécifiques, ces chercheurs ont préalablement étudié l'influence de la teneur en eau et de la température dans le bois en pleine combustion. Dans le cadre de notre travail, nous nous limiterons à analyser la contribution à la détermination des caractéristiques physico-chimique des bois combustibles au Cameroun : cas de l'AZOBE (*lophiraalata*) et du SAPELLI (*Entandrophragmacylindricum*).

Une bonne connaissance des propriétés du bois est une condition primordiale pour effectuer un bon traitement thermique du bois et par ricochet une bonne étude de sa combustion dans la mesure où ces différentes propriétés varient suivant l'essence. Cette étude a pour but de contribuer à l'amélioration de la qualité d'utilisation du bois dans sa combustion. Nous avons réparti notre travail en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre il est question de faire une revue de la littérature qui permet de découvrir le bois et ses qualités.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons le matériel utilisé lors de la combustion et les différentes méthodes utilisées.

Le troisième chapitre sera consacré aux résultats obtenus pendant l'étude expérimentale ainsi que l'analyse de ces résultats.

En fin le quatrième chapitre donnera l'implication du sujet dans le système éducatif camerounais.

CHAPITRE1 : REVUE DE LA LITTERATURE

I-I- GENERALITES SUR LE BOIS DE FEU

La particularité structurale du bois d'être un matériau naturellement hygroscopique, anisotrope et hétérogène l'expose, lors du processus de combustion, aux modifications de ses caractéristiques physique et par voie de conséquence de sa nature. Il est donc essentiel de bien connaître les diverses caractéristiques du bois susceptibles d'influencer le déroulement du processus de combustion selon la teneur en eau et la température.

I-I-1- Définition et historique du bois de feu

I-I-1-1-Définition du bois

En botanique, le bois est l'ensemble constitué de tissus végétaux qui forment la partie principale du tronc, des branches et des racines d'un arbre. C'est un matériau susceptible de perdre ou de reprendre l'humidité selon les conditions dans lesquelles il est placé(ADEME, 2008).

I-I-1-2- Historique du bois de feu

Depuis la préhistoire jusqu'au début de l'exploitation du charbon, le bois est de loin la plus importante source d'énergie disponible pour le chauffage et pour la cuisson des aliments. Au moyen âge puis à l'époque moderne, l'usage du bois qui permet le développement de certaines industries en énérgienécessitaient des températures élevées, comme la sidérurgie et la verrerie. Par conséquent le bois est transformé par pyrolyse en charbon de bois par des charbonniers pour son utilisation. Ce métier disparaît quasiment au 19^e siècle à la suite de la propagation de l'usage de la coke (charbon provenant de la carbonisation ou de la distillation de la houille), produit par la pyrolyse de la houille (combustible minéral provenant de la décomposition et de la transformation des végétaux au cours des temps). En Europe, la pénurie de charbon due à la seconde guerre mondiale engendre une forte augmentation de la consommation de bois. Ainsi en Suisse, pendant les dernières années du conflit, la consommation est de plus de deux fois supérieure à la production naturelle(ADEME, 2008).

Aujourd'hui, le bois énergie suscite un regain d'intérêt en raison du prix élevé des énergies, de sa disponibilité et de son caractère renouvelable. Pour une grande partie de l'humanité, le bois représente une ressource essentielle.

I-I-2-Le bois de feu légal et le bois de feu illégal

Nous retrouvons sur les marchés Camerounais deux types de bois de feu : le bois légal et le bois illégal.

I-I-2-1-Le bois de feu légal

On parle de bois légal lorsqu'un producteur de bois possède un permis d'exploitation qui lui autorise légalement l'exploitation du bois. Ce permis appelé « **permis spécial** » est obtenu après une procédure légale ou chaque exploitant devrait se déclarer, s'acquitter de certaines taxes et impôts ; ceci pour éviter l'anarchie en terme d'exploitation forestière. Bien que ces permis soient délivrés à ces exploitants, le gouvernement veille rigoureusement au respect des réglementations et normes d'exploitation de cette matière première afin d'éviter l'anarchie et le désordre (ADEME, 2008).

I-I-2-2-Le bois illégal

Le bois illégal est un bois obtenu à partir d'arbres coupés en forêt, sans permis, sans aucune taxe ou impôts sur l'exploitation. Ce type de bois est généralement transporté dans la nuit afin de contourner ou d'éviter le contrôle forestier. Il est clair que ce type d'exploitant s'expose à des sanctions prévues par la réglementation en vigueur.

I-I-3- Composition chimique

Globalement, le bois peut être considéré, sous forme anhydre, comme un composé organique, contenant en moyenne 50% de carbone, 43% d'oxygène, 6% d'hydrogène et près de 1% d'azote. La formule brute moyenne qu'on lui attribue est $CH_{1,44}O_{0,66}$, formule qui nous permet d'établir l'équation de la combustion du bois :



Ainsi, lors de la combustion, 1Kg de bois consomme $1m^3$ d' O_2 , émet $1m^3$ de CO_2 et 0,5 litre d'eau.

I-I-4-Avantages et inconvénients du bois de feu

Le bois est une ressource contribuant à répondre aux défis énergétiques du 21^e siècle. Comme toute ressource naturelle, le bois possède aussi bien des avantages et des inconvénients.

I-I-4-1-Avantages du bois combustible

a) Avantages techniques

Le bois combustible peut être transformé en charbon de bois qui est un matériau inerte facile à manipuler et à subdiviser, qui ne se détériore pas même sur de longues périodes de

conservation. Le bois combustible peut également être utilisé pour accélérer le séchage, pour le réchauffement des locaux ; comme mode de chauffage principal toute l'année.

b) Avantages environnementaux

Le bois est une source d'énergie locale, naturelle et renouvelable par photosynthèse. Sa consommation permet d'économiser les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon, uranium) dont les stocks sont limités. L'utilisation du bois combustible contribue à l'entretien de la forêt et du paysage ; la valorisation énergétique des sous-produits forestiers et bocagers permet d'améliorer l'état sanitaire des espaces boisés. Elle permet également de valoriser les sous-produits de la filière « bois » en combustible. Le bois combustible permet de lutter contre la dérive de l'effet de serre : la quantité de CO₂ dégagée lors de la combustion du bois est comparable à celle reprise lors de la croissance des arbres lors de la photosynthèse (NTSAMA ATANGANA 2009).

c) Avantages socio-économiques

Le bois combustible est moins cher et plus économique que le chauffage électrique ou les modes de chauffage utilisant des énergies fossiles comme le gaz ou le fioul. C'est un créateur de ressources locales car sa collecte, son transport et sa préparation se font généralement dans un rayon de 50 à 100km des chaufferies, ce qui permet à contribuer à l'économie locale.

Le bois combustible est créateur d'emploi. Il permet de créer en moyenne trois fois plus d'emploi local que les énergies fossiles. Ceci s'explique par la nécessité de mobiliser le bois issu de l'entretien des milieux naturels (bois et forêts, bords de rivière, chemins de randonnée, haies, arbres d'alignements urbains) ou issu des activités commerciales, artisanales ou industrielles ; de collecter et transformer les matières premières en combustible ; de livrer le bois en chaufferie. Cette ressource permet de faire cuire les aliments. Elle participe à la réduction de l'insécurité qui résulte le plus souvent de l'oisiveté.

I-I -4-2- Inconvénients du bois combustible

Le bois combustible présente des inconvénients sanitaires, difficile à transporter, a besoin d'un espace de stockage dans un environnement. Il est responsable de la pollution, il est aussi à l'origine des maladies du poumon telles que le cancer dû à l'inhalation des gaz produits lors de la combustion. Sa mauvaise manipulation peut causer des blessures sur le corps.

La manipulation du bois combustible est très salissante aussi bien pour les producteurs, les commerçants, que pour les consommateurs.

I-II-COMBUSTION

I-II-1-Définition

La combustion peut être définie comme la réaction chimique qui a lieu lors de la combustion entre l'oxygène et une matière combustible. C'est une réaction exothermique d'oxydoréduction.

I-II-2- Eléments influents sur la combustion

La combustion est une réaction chimique fortement influencée par les éléments tels que la température, la rapidité de carbonisation, la matière première, la qualification du foyer, les conditions météorologiques.

I-II-2-1-La température

La combustion du bois s'effectue à différents niveaux de température et suivant plusieurs étapes :

- Vers 100°C le bois sèche (élimination de l'humidité qu'il contient) sous l'effet du rayonnement des parois chaudes des foyers et de la convection due à l'air primaire.

Remarque : Un bois vert contient plus de la moitié de sa masse en eau ; Un bois qui a séché environ deux ans en contient encore 20%.

- A partir de 250°C et jusqu'à 500°C environ, il y a pyrolyse des polymères naturels constituants du bois.
- A partir de 500°C le carbone solide s'unit à l'oxygène de l'air pour donner du monoxyde de carbone CO (composé gazeux).
- Entre 350°C et 1500°C, l'ensemble des gaz produits lors des étapes précédentes (cela représente selon l'essence du bois entre 80 et 90% de la masse initiale) s'oxydent en donnant du dioxyde de carbone et de l'eau. ainsi que de la chaleur que l'on récupère pour se chauffer et dont une partie va chauffer le bois non encore atteint par la combustion et ainsi de suite... (Ballard-GB 1997).

Lorsque le processus de pyrolyse se termine et qu'il n'y a plus de substances volatiles, il subsiste un résidu charbonneux rougeoyant qui produit encore beaucoup de chaleur, sa surface extérieure atteignant 800°C (Ballard-GB 1997).

I-II-2-2-La rapidité de la carbonisation

Au cours d'une carbonisation lente, les composés ont le temps de se former puis de réagir entre eux lors de réactions secondaires. Ce n'est plus le cas lorsqu'on a à faire à des traitements rapides (pyrolyse flash ou clair) dont la durée de contact et la montée de température est de l'ordre de la seconde. Une pyrolyse rapide à température élevée ne produit

pas de charbon mais des gaz et des liquides. Dans la pratique, lorsque la carbonisation est très rapide, le charbon de bois produit est moins bon.

I-II-2-3-La matière première

Le choix et les performances de l'équipement de combustion sont influencés par les caractéristiques de la matière première.

➤ Le type d'essence et la densité du bois

Il est important de connaître la densité des bois car elle renseigne sur certaines propriétés fondamentales, notamment la dureté et la résistance à la compression qui va influencer les propriétés du charbon. Un bois dense donnera un charbon dense et un bois léger, un charbon de faible densité. En règle générale, toutes les essences de bois peuvent brûler pour produire un charbon. La teneur en cendre des différents bois peut varier, mais cette variation est généralement peu importante. L'écorce, par ailleurs a une teneur en cendre excessive, et donne un charbon trop friable pour la plupart des usagers. C'est pourquoi l'écorce ne doit pas être trop souvent utilisée, ou bien sa proportion dans la charge de bois doit être réduite au minimum (TAKOUGANG YIMDJEU 2014).

➤ La teneur en lignine du bois

La lignine est le troisième constituant de la paroi cellulaire du bois (constituant de la paroi secondaire des cellules des végétaux) ; c'est un polymère réticulé (tridimensionnel) dont la structure complexe varie, comme pour les hémicelluloses, en fonction de l'espèce, de l'âge et des conditions climatiques. La lignine agit comme un ciment entre les fibres du bois et comme élément rigidifiant à l'intérieur des fibres. La teneur en lignine du bois a un effet positif sur la combustion du bois. Un bois élevé en lignine donne un rendement plus élevé en combustion, c'est la raison pour laquelle pour obtenir une bonne production des produits issus de la combustion du bois, on utilise le bois mur et sain (TAKOUGANG YIMDJEU 2014).

➤ L'humidité du bois

C'est un facteur très important dans la combustion. Pour des procédés de combustion partielle, une humidité très faible du bois est indispensable. On a vu plus haut qu'il est possible de procéder à la combustion du bois vert, mais cela implique un taux de réussite très faible. Il est donc conseillé de laisser le bois sécher plusieurs mois à l'air libre avant d'effectuer sa combustion.

I-II-2-4-La qualification du foyer

La qualification du foyer est déterminante dans le procédé de combustion du bois. En effet, l'admission de l'air doit être maîtrisée, les indicateurs permettent d'apprécier les effets d'un excès ou d'un défaut d'air ne peuvent s'acquérir qu'au travers d'une longue pratique.

Une bonne formation solide est donc fondamentale et tout projet de combustion doit s'appuyer sur des activités de formation.

I-II-2-5-Les conditions météorologiques

Elles peuvent fortement influencer sur la combustion. La pluie peut altérer sérieusement le processus de combustion. Par contre, lorsqu'il fait chaud ou lorsque le vent est fort, la combustion est plus rapide, il y a risque « de coup de feu ».

I-II-3- Les techniques de combustion

Selon la technique mise en œuvre, on obtient une combustion complète ou une combustion incomplète.

Lorsque les conditions de mise en œuvre du foyer sont favorables c'est-à-dire conception et réglage de la chambre de combustion, excès d'air, faible humidité du combustible, on obtient la combustion complète du bois. Les produits obtenus de cette combustion sont principalement le dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau.

Lorsque les conditions de mise en œuvre sont telles que nous réglons l'installation et /ou nous utilisons du bois humide, on obtient la combustion incomplète du bois qui se traduit par l'émission importante de polluants gazeux et particulaires. Les produits de cette combustion sont principalement le carbone et la vapeur d'eau.

I-III- LE BOIS DE FEU AU CAMEROUN

I-III-1- Production

Selon le ministère de la Forêt et de la Faune, le territoire national peut être divisé en trois grandes zones socio écologiques en termes de bois-énergie : la zone des savanes sèche (Adamaoua, Nord et Extrême-Nord) où la disponibilité du bois-énergie à partir de la végétation naturelle est limitée ; la zone des savanes humides des régions de l'Ouest et du Nord-Ouest où la disponibilité en bois-énergie est moyenne ; et la zone forestière(centre, Est, Sud, Sud-Ouest) qui présente les plus importantes ressources en bois-énergie au Cameroun.

Il est donc évident que la zone forestière est la zone ayant un fort potentiel en termes de production de bois au Cameroun. Cette production de bois de feu est assurée par les populations villageoises aussi bien autochtone, allogène que migrantes.

I-III-2- Conditionnement et transport

Au Cameroun, le bois est classé en tas ou lot, les uns superposés sur les autres formant ainsi soit une sorte de muraille de bois, soit une sorte d'escalier de bois. En saison des pluies, ce bois ainsi entassé est conditionné sous des huttes, des tentes, des bâches, ceci dans le but d'éviter l'humidité(Figure1-1). En saison sèche, ce bois est exposé à l'air libre afin qu'il puisse mieux sécher.



Figure1-1 : conditionnement du bois en saison sèche

Le transport du bois de chauffe au Cameroun est assuré par une dizaine de moyen de transport. On peut citer : la tête, le vélo, le pousse, la moto, le pick-up, le car de transport, la camionnette, le camion (planche), le grumier (bille de bois). Les modes de transport les plus réguliers chez les populations riveraines sont la tête, le vélo et la moto (Figure 1-2).



photo 6a : Transport sur la tête



photo 6b : Transport par bicyclette



photo 6c : Transport par moto



photo 6d : Transport par porte tout



photo 6e : Transport par voiture



photo 6f : Transport par pickup



photo 6g : Transport par car



photo 6h : Transport par camionnette



photo 6i: Transport par camion

Figures1-2 : modes de transport du bois de chauffe au Cameroun[2]

I-III-3- Commercialisation et consommation

Dans plusieurs zones du Cameroun, la consommation du bois est une activité florissante, procurant des revenus aux ménages modestes. Elle se fait en gros et en détail, en tas, en morceaux et en fagots. Le bois est vendu presque partout dans une zone : dans les marchés, aux bords des routes, devant les maisons dans les quartiers. Le prix de vente est en fonction de plusieurs facteurs notamment le cout d'achat, de transport, de production, les taxes et la saison.

Au Cameroun, le bois combustible reste la principale source d'énergie accessible à la population et la plus utilisée, plus particulièrement par les ménages pauvres. Cette préférence s'explique par le fait que ces ménages bien que consommant parfois le bois d'un montant mensuel égal au coût d'une bouteille de gaz, n'ont pas la possibilité de réunir cette somme pour pouvoir accéder à cette forme d'énergie domestique moderne ; il est facile à trouver et son prix est relativement bas par rapport aux autres formes d'énergie. Le diagramme ci-dessous montre les principales couches de consommateurs de bois au Cameroun et leur pourcentage de consommation(Denis FOLEFAK 2009) :

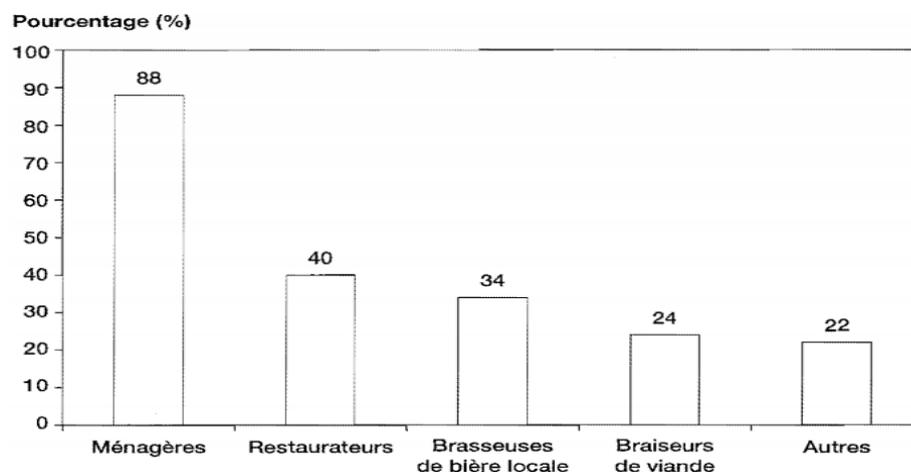


Figure1-3 : principaux utilisateurs de bois de chauffe au Cameroun[1]

I-III-4- Les Foyers améliorés

Dans le but principal de réduire la consommation de combustible et de rendre la cuisine facile et sécurisante, certaines familles africaines ont opté pour l'utilisation des foyers améliorés. Les foyers améliorés sont des foyers domestiques faites soit à base de métaux (fer, aluminium, bronze,...)(Figure 1-5), soit à base d'argile ou alors à base de terre(figure 1-4). On utilise généralement les foyers de plus en plus forte puissance pour la cuisine collective, pour la préparation des boissons traditionnelles « odontol »(figure 1-4).Les foyers peuvent être fabriqués par leur utilisateur ou achetés. Le cout d'acquisition d'un foyer domestique varie de 5000 à 10000 FCFA ; pour un foyer de plus forte grande capacité, le prix peut varier entre 20000 et 28000 FCFA car dépend du nombre de canari que possède le foyer (TAKOUGANG, 2014).



Figure1-4 : foyers amélioré utilisé pour la préparation des boissons traditionnelles [3]



Figure1-5 : foyers améliorés modernes citadines

CHAPITRE II: MATERIEL ET METHODES

Ce chapitre est consacré à la présentation du matériel utilisé à la phase expérimentale permettant la détermination des caractéristiques thermophysiques des bois Sapelli et Azobé. Suivra ensuite la méthode analytique, semi-empirique et empirique utilisée pour la détermination du Pouvoir calorifique inférieur (PCI). Par ailleurs, une analyse du pouvoir calorifique inférieur à l'échelle du laboratoire est menée, débouchant ainsi sur la prédiction les différents résultats. Notre étude est faite sur des échantillons de bois de petit volume.

II-1-MATERIEL

II-1-1-les bois

Les échantillons de dimensions 35x30x20 mm³ utilisés lors du test ont été taillés dans la même planche.

- **Le Sapelli**

Le Sapelli appartient à la famille des feuillus plus précisément des Méliacées. Très généralement, on note sur la grume et le bois des piqûres noires, mous, mulotâges ou roulures. La couleur du Sapelli est blanc jaunâtre à jaune clair et parfois au cœur plus sombre. Il a un aspect rubané sur quartier avec les fils parfois irréguliers (figure 2-1).

Le nom botanique ou latin de cet arbre est :l'Entandrophragmacylindricumet l'appellation commerciale retenue par la norme française est celle du Sapelli (publication du centre technique forestier tropical 1983a). L'appellation commerciale et vernaculaire (locale) de cet arbre diffère d'un pays à l'autre. L'Entandrophragmacylindricum est une espèce des forêts tropicales, elle se trouve dans la forêt dense équatoriale.



Figure 2-1: Le bois Sapelli

- **L'Azobé**

L'Azobé appartient également à la famille des feuillus mais des Ochnacées genre *Lophira*, espèce *Alata*. C'est un bois rouge, ayant un léger contrefil, des grains grossiers. L'Azobé est bien distinct du cœur avec un dépôt blanc dans les pores (figure 2-2).

Le nom botanique (spécifique) ou latin de cet arbre est : le *LophiraAlata* et l'appellation commerciale retenue par la norme française est celle d'Azobé (publication du centre technique forestier tropical 1983b). Malgré cela l'appellation commerciale et vernaculaire (locale) de cet arbre varie d'un pays à l'autre.

Le *LophiraAlata* est une espèce des forêts tropicales. Il se trouve dans la forêt dense équatoriale d'Afrique et d'Amérique.



Figure 2-2 : Le bois Azobé

Après la présentation des essences, nous entrons dans le matériel utilisé à la phase expérimentale. Ce matériel détermine les caractéristiques thermophysiques (teneur en eau, masse volumique, taux de carbone) des différents bois en étude et signale les résultats des évolutions expérimentales du séchage aux laboratoires et par les relations mathématiques de son PCI suivant plusieurs approches.

II-1-2-les appareils

Parmi les matériels et outils utilisés nous avons les appareils :

a) Etuve.

Une étuve de marque MEMMERT de dimensions 40x50x60 cm³, de température maximale de 220°C, de puissance 900 W est utilisée pour le séchage. Sa tension usuelle est de 220 V et sa précision de 2°C (figure 2-3).



Figure 2-3: Etuve électrique de marque MEMMERT

b) Balance et pied à coulisse

La balance numérique de marque OHAUS CS précise au millième près (figure 2-4 a) est utilisée pour les pesées. Pour la mesure des dimensions, nous avons utilisé un pied à coulisse au dixième (figure 2-4 b)



Figure2-4 :(a) Balance numérique de marque OHAUS CS 200 de précision 0,1g et (b) Pied à coulisse de précision 0,1mm

c) Tôles en aluminium

Une petite tôle rectangulaire d'environ 10cm de long et 6cm de large.



Figure2-5 : Tôle en aluminium

d) un four



Figure 2-6 : Fours

II-2-METHODES

Dans la suite les méthodes expérimentales et théoriques utilisées sont exposées.

II-2-1-Methode expérimentale de la détermination de la teneur en eau des échantillons

Nous avons adopté la méthode par pesée pour la détermination de la teneur en eau des essences étudiées. Après leur pesée initiale, les échantillons sont séchés dans une étuve de marque MEMMERT de dimensions 40x50x60 cm³. Ces échantillons sont pesés et mesurés tous les cinq heures à leurs sorties de l'étuve. Le processus est fait pour la température 60°C jusqu'à atteindre l'humidité d'équilibre voulu dans les échantillons (les niveaux bas de teneur en eau). Les masses anhydres (M_0) sont obtenues en plaçant quelques échantillons des différents bois dans l'étuve réglée à 105°C jusqu'à l'acquisition d'une masse constante.

Tout au long du mémoire, deux définitions d'humidités seront utilisées en fonction des applications.

- Pour les calculs concernant le séchage, l'humidité sur sec (aussi appelée humidité absolue) est utilisée (relation 2-1) :

$$X = \frac{M_{HB} - M_0}{M_0} \times 100 \quad (2-1)$$

- Pour la valorisation énergétique, l'humidité prise en compte est l'humidité sur brut. Elle se calcule par le rapport entre la masse d'eau et celle du produit humide à l'aide de la relation (2-2) :

$$HB = \frac{M_{HB} - M_0}{M_{HB}} \times 100 \quad (2-2)$$

M_{HB} est la masse de l'échantillon en teneur d'eau HB, M_0 est la masse de l'échantillon anhydre.

Lors du calcul d'humidité, les masses doivent également être exprimées avec la même unité (kg ou g).

II-2-2-Methode expérimentale de la détermination des paramètres thermophysiques de la masse volumique

Nous avons adopté la méthode par pesée pour la détermination de la masse volumique des essences étudiées. Après leur pesée initiale, les échantillons sont séchés dans l'étuve de marque MEMMERT de dimensions 40x50x60 cm³. Ces échantillons sont pesés et mesurés tous les six heures à leurs sorties de l'étuve. Le processus est répété pour la température 60°C jusqu'à atteindre l'humidité d'équilibre voulu dans les échantillons (les niveaux bas de teneur en eau).

La masse volumique est alors calculer à l'aide de la relation (2-3).

$$\rho_X = \frac{M_X}{V_X} \quad (2.3)$$

Où ρ_X, M_X, V_X sont respectivement la masse volumique, la masse et le volume de l'échantillon à l'humidité X calculée à la relation (2-1).

Le volume est obtenu par la relation (2-4)

$$V_X = L \times l \times e \quad (2.4)$$

Où L, l, e sont respectivement la longueur, la largeur et l'épaisseur de l'échantillon X .

II-2-3-Approches méthodologiques à la caractérisation du pouvoir calorifique inférieur

II-2-3-1-Définition du pouvoir calorifique

On appelle pouvoir calorifique d'un combustible, la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète sous pression atmosphérique normale de 1,013 bars, de l'unité de masse de ce combustible. Le combustible et l'air étant 0°C et les produits de combustion ramenés à 0°C (TAKOUGANG 2014).

II-2-3-2-Unité de mesure du pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique donne une valeur d'énergie contenue dans une unité de masse du combustible (bois dans notre cas). L'unité SI est le J/g, l'unité la plus généralement utilisée dans la littérature est le kcal/kg et pour le bois énergie le kJ/kg ou kWh/tonne.

Tableau1 : correspondances en unité du pouvoir calorifique : [3]

	J/g	Kcal/kg	KWh/tonne
J/g	1	0,24	0,278
Kcal/kg	4,18	1	1,161
KWh/tonne	3,6	0,86	1

II-2-3-3-Types de pouvoirs calorifiques

- **Le pouvoir calorifique supérieur (PCS)**

C'est l'énergie dégagée par la combustion du bois en récupérant la chaleur latente de la vapeur d'eau produite lors de la combustion autrement dit quand l'eau résultant de la combustion est ramenée à l'état liquide dans les produits de combustion.

- **Le pouvoir calorifique inférieur (PCI)**

C'est l'énergie dégagée par la combustion du bois sans récupérer la chaleur latente de la vapeur d'eau produite par la combustion autrement dit quand l'eau résultant de la combustion reste à l'état vapeur dans les produits de combustion. Il se décompose en deux : le PCI sec qui se base sur le kilogramme de bois sec et qui ne prend pas en compte l'humidité du combustible et permet ainsi la comparaison entre échantillons différents ; et le PCI humide qui prend en compte l'humidité du combustible et permet de connaître réellement l'énergie récupérée.

II-2-3-4-Détermination du pouvoir calorifique

Il existe deux façons de déterminer le pouvoir calorifique :

- la détermination par mesure directe
- la détermination par calcul approché

a) Détermination par mesure directe

Cette détermination se fait à l'aide d'une bombe calorimétrique. Elle consiste en une prise d'essai en présence d'oxygène. Le PCS est donc déterminé à volume constant à partir de l'élévation de température constaté compte tenu des réactions chimiques secondaires et éventuellement des pertes thermiques. Le PCI est calculé ensuite à partir d'une composition élémentaire du bois mesuré.

$$PCI = PCS - 60,5.HB \quad (2-5)$$

où HB représente l'humidité en %.

b) Détermination par calcul approché

La détermination du pouvoir calorifique par calcul approché se base sur la composition élémentaire du combustible, et sur des équations permettant le calcul. Parmi les approches méthodologiques utilisées dans ce travail, l'approche analytique constitue la première approche et l'empirique la deuxième approche celle qui tient en compte du pouvoir calorifique inférieur des essences à l'état anhydre et de leur teneur en eau (équation 2-1).

➤ 1^{ère} Méthode

L'approche analytique constitue la première approche qui tient en compte du pouvoir calorifique inférieur des essences à l'état anhydre et de sa teneur en eau (équation 2-2). Il est l'énergie thermique libérée par la combustion totale d'un kilogramme de combustible en considérant que l'eau formée est évacuée à l'état gazeux. En ce qui concerne le bois, la détermination du PCI en kJ.kg^{-1} en fonction de l'humidité sur brut HB s'obtient par la relation (2-6):

$$PCI_{HB} = \frac{100-HB}{100} PCI_0 - 0,251 \times HB \quad (2-6)$$

Où PCI_{HB} est le pouvoir calorifique inférieur à l'humidité HB exprimé en kJ/kg

HB le taux d'humidité en %

PCI_0 est le pouvoir calorifique inférieur exprimé en kJ/kg du bois anhydre.

Ces valeurs du sont prises dans la littérature : les feuillus moyennes tendres sont l'équivalence des feuillus mi-lourds (Sapelli) ayant un PCI_0 égal 50835 kJ/kg et les feuillus lourds (Azobé) ont un PCI_0 égal 46852 kJ/kg (ADEMA, 20082).

➤ 2^{ème} Méthode

La détermination du pouvoir calorifique par calcul approché se base sur la composition élémentaire du combustible, et sur des équations permettant de l'obtenir. Dans la multitude de formule empirique qui permet cette détermination, nous en retiendrons particulièrement deux qui donne des résultats avec une précision acceptable (plus ou moins 5 à 7%) en ce qui concerne le pouvoir calorifique supérieur. En plus ces deux formules ont l'avantage d'être économique par rapport aux autres formules car ne nécessite qu'une analyse élémentaire : le taux de carbone C. Il s'agit des relations (2-7) et (2-8) :

Formules approchées :

$$PCS = 3,6.(108.C) \text{ En J /kg} \quad (2-7)$$

$$PCS = 3,6.(105,5.C - 64) \quad (2-8)$$

Cette formule devient semi-empirique en tenant compte de la relation mathématique (2-5) de la méthode directe et qui permet la détermination du PCI en fonction des teneurs en eau. La détermination du pouvoir calorifique supérieur exige le taux de carbone fixe du combustible. Le taux de carbone fixe correspond à la teneur en carbone « pur » que contient le bois, à ne pas confondre avec le taux de carbone global qui inclut aussi le carbone entrant dans la composition des matières volatiles. Selon la norme **NFB52001(1998)**, il se calcule après la détermination des paramètres suivants : humidité et taux de cendres.

Il est exprimé et donné en pourcentage massique par rapport à l'échantillon brut par la formule :

$$C = 100 - (HB + A) \quad (2-9)$$

Avec HB : humidité en %

A : taux de cendres en %

Taux de cendres



Figure2-7 : Cendre recueilli après combustion

Les cendres résultent de l'oxydation des minéraux contenus initialement dans le bois. Théoriquement, le bois ne contient que 0,3% à 0,8% de minéraux (Rogaume, 2009). Le taux de cendre est donc le ratio entre la masse de cendre après combustion, et la masse de bois anhydre avant combustion.

Le taux de cendres est le paramètre qui est déterminé juste après la teneur en humidité car les échantillons sont calcinés après avoir été séchés. Le taux de cendre A, exprimé en pourcentage en masse est donné par la formule (2-10).

$$A = \frac{m_0}{M_0} \cdot 100 \quad (2-10)$$

Avec m_0 la masse en grammes des cendres et M_0 masse anhydre de l'échantillon en grammes avant combustion. Cette relation (2-10) sous la forme pratique est transformée en relation (2-11).

$$A = \frac{M_4 - m'_0}{M_3 - m'_0} \cdot 100 \quad (2-11)$$

Dans laquelle : m'_0 la masse en grammes de la tôle d'aluminium ;

M_3 masse en grammes de l'ensemble tôle d'aluminium échantillon avant combustion ;

M_4 la masse en grammes de l'ensemble tôle d'aluminium cendres après passage au four (ADEME, 2008).

Etapes :

- Placer les tôles en aluminium au fond du foyer avant la combustion
- Procéder à la combustion
- Récupérer les cendres posées sur les tôles puis les laisser refroidir.
- Peser en utilisant la balance d'une précision de 0,001g.
- Déterminer le taux de cendre par calcul.

Protocole :

Les échantillons utilisés pour déterminer le pouvoir calorifique inférieur des essences sont issus des planches de différentes humidités. Pour chaque essence, les échantillons ont presque tous les mêmes dimensions et masses. Un foyer amélioré a été utilisé pour la combustion des échantillons anhydres obtenus après leur séjour dans l'étuve à la température de 105°C. Une tôle en aluminium est placée au fond du foyer avant la combustion ayant une masse m'_0 . Chaque échantillon subit la combustion presque complète dans le foyer sous pression atmosphérique normale de 1,013 bars et à une température faible presque à 15°C. La masse totale tôle plus cendre est obtenue après pesé. Par une différence, on obtient la masse de la cendre de l'échantillon et on évalue le taux de cendre par la relation (2-10). De ce processus, on évalue le taux de carbone par la relation mathématique (2-9).

➤ 3^{eme} Méthode

Le pouvoir calorifique inférieur PCI_{HB} (en kJ/kg) est aussi déterminé par le pouvoir calorifique supérieur PCS_{HB} et la masse volumique tous fonction de l'humidité HB (en %) (Approche empirique) donné par la formule (2-12):

$$PCI_{HB} = \frac{PCS_{HB} \cdot \rho_{HB}}{1000} \quad (2-12)$$

PCI_{HB} est le pouvoir calorifique inférieur exprimé en kJ/kg

PCS_{HB} est le pouvoir calorifique supérieur à l'humidité HB calculée en (2-7)

HB le taux d'humidité en % ; ρ_{HB} est la masse volumique exprimée en kilogramme par m³

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre présente les différents résultats physiques obtenus notamment :

- les résultats expérimentaux du séchage des échantillons des bois (Azobé et Sapelli) de petites dimensions dans l'étuve.
- la détermination du pouvoir calorifique inférieur de l'Azobé et du Sapelli à partir des approches analytique et empirique tenant compte des résultats expérimentaux.
- Et enfin les corrélations entre des résultats analytiques, empiriques et numériques pour les échantillons de petites dimensions. Le test se fait sur deux essences de bois (Sapelli, Azobé).

III-1-RESULTATS DU SECHAGE DES ECHANTILLONS DES BOIS AUX LABORATOIRES.

Le séchage expérimental des échantillons des bois tropicaux d'Azobé et du Sapelli, est fait à l'étuve du laboratoire de physique appliquée de l'ENS de l'Université de Yaoundé I. Cette étude nous permet d'obtenir les différentes teneurs en eau des échantillons pour la détermination du pouvoir calorifique inférieur.

La figure3-1 présente l'évolution de la teneur en eau des échantillons des différents bois à la température de 60°C pour les épaisseurs de 20 mm L'analyse des courbes montre que les teneurs en eau dans les bois décroissent dans le temps lors du séchage, puisque les particules d'eau (10^3 Kg/m^3) sont remplacées par celles de l'air ($2,9 \text{ Kg/m}^3$) dans le matériau. Ce résultat est en parfait accord avec les prévisions de la littérature (Nsouandélé, 2012 ; Simo, 2010 ; Monkam, 2006 ; Nadeau 1995 ;Ngohe-Ekam P, 1992). La teneur en eau initiale du Sapelli (bois mi-lourd) est supérieure à celle de l'Azobé (bois lourd), mais son séchage est plus rapide que pour ce dernier. Cette figure 3-1 confirme que les propriétés thermophysiques et les compositions des constituants sont différentes selon les bois et l'évaporation ne se fait pas de la même manière.

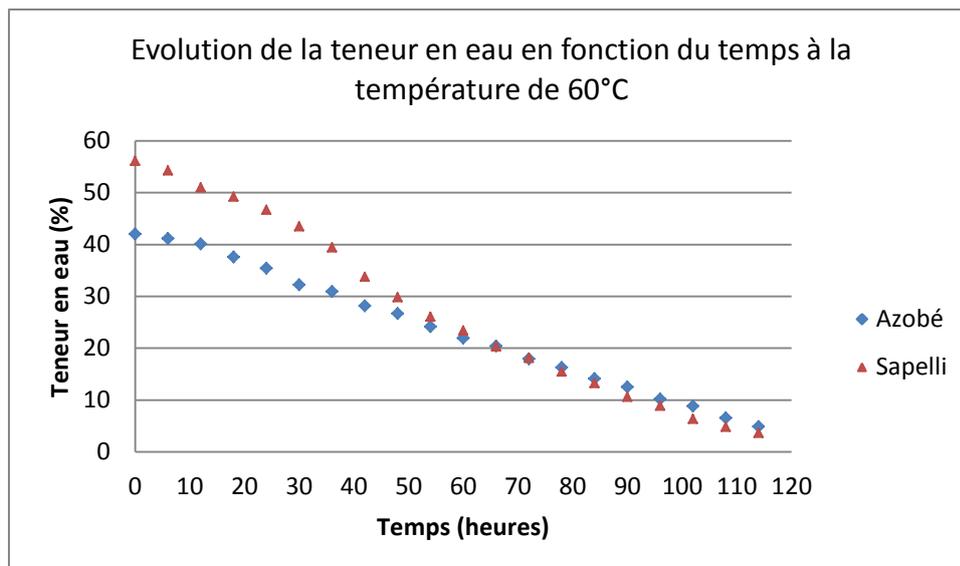


Figure 3-1: Evolution de la teneur en eau du sapelli et de l’Azobe en fonction du temps.

Les travaux expérimentaux sur la teneur en eau des bois nous permettent de déterminer le pouvoir calorifique inférieur de ces derniers par des approches analytiques et empiriques. Ces résultats sont validés par l’obtention de la teneur en carbone qui varie dans l’intervalle 40% à 95% et conforme à celui de CIRAD 2014 [référence].

III-2-RESULTATS DU POUVOIR CALORIFIQUE INFÉRIEUR(PCI) DES ECHANTILLONS DES BOIS AUX LABORATOIRES.

III-2-1-Approche analytique

Parmi les approches méthodologiques utilisées dans ce travail, l’approche analytique constitue celle qui tient compte du pouvoir calorifique inférieur des essences à l’état anhydre et de leur teneur en eau (équation 2-1). En effet, elle permet de déterminer le pouvoir calorifique inférieur du bois directement en fonction de leur teneur en eau et du pouvoir calorifique anhydre. La figure3-2 confirme l’évolution du pouvoir calorifique lors du séchage. Mais nous constatons que plus le bois est dense plus le pouvoir calorifique diminue pour une même teneur en eau. Dans cette approche les pouvoirs calorifiques des essences se rapprochent pour des teneurs en eau élevées. Alors que pour des faibles valeurs des teneurs en eau les PCI sont différents. Ils sont supérieurs pour les bois mi-lourds (Sapelli) par rapport à ceux des bois lourds (Azobé)

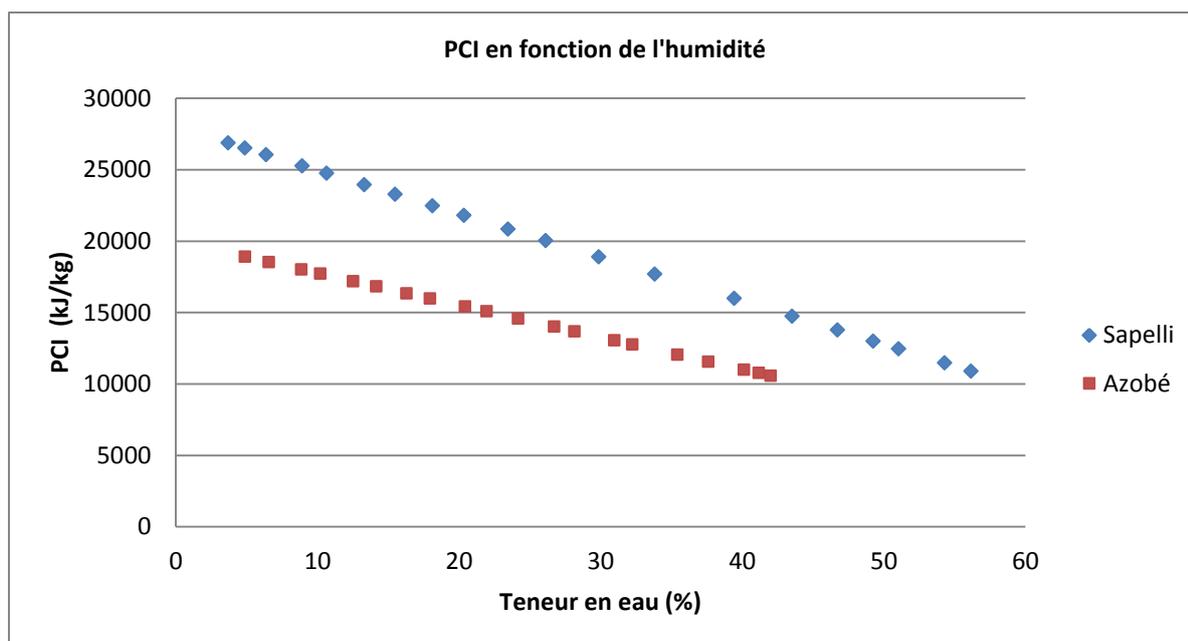


Figure 3-2: Evolution du PCI du Sapelli et l’Azobeen fonction de la teneur en eau

III-2-2-Première Approche ou Semi-empirique

La détermination du pouvoir calorifique par cette méthode, se base sur la composition élémentaire du combustible, et sur des équations permettant le calcul. Bien que la littérature ne soit pas très riche dans le domaine de la détermination du pouvoir calorifique en fonction de la composition élémentaire du combustible, il existe de nombreuses formules (équation 2-3) plus ou moins empiriques qui permettent cette détermination (ADEME, 2008).

Au vu des résultats consignés dans le tableau 2, nous pouvons dire que les bois Sapelli et Azobé ont des taux de carbone fixe proches avec une supériorité du taux de carbone dans l’Azobé par rapport au Sapelli. Ce résultat montre aussi en effet que les deux types d’essence sont des bois de feuillus assez similaires à la différence d’une masse de cendre abondante des bois mi-lourd (Sapelli) par rapport à celle lourd (Azobé). Ce résultat est conforme à ceux de la littérature qui évalue que les teneurs en cendre des bois de 0,5% à 10% (ADEME, 2008).

Tableau 2: Tableau donnant les valeurs des masses et taux de cendre

Bois	Masse brute (g)	Masse anhydre (g)	Masse de la cendre (g)	Taux de cendres (%)
Azobé	61,7	43,6	1,3	2,9
Sapelli	55,4	24,5	1,1	4,5

La figure (3-3) présente la détermination du pouvoir calorifique inférieur des bois (Azobé, Sapelli) en fonction de leur teneur en eau, et du taux de carbone obtenu par la détermination du pouvoir calorifique supérieur.

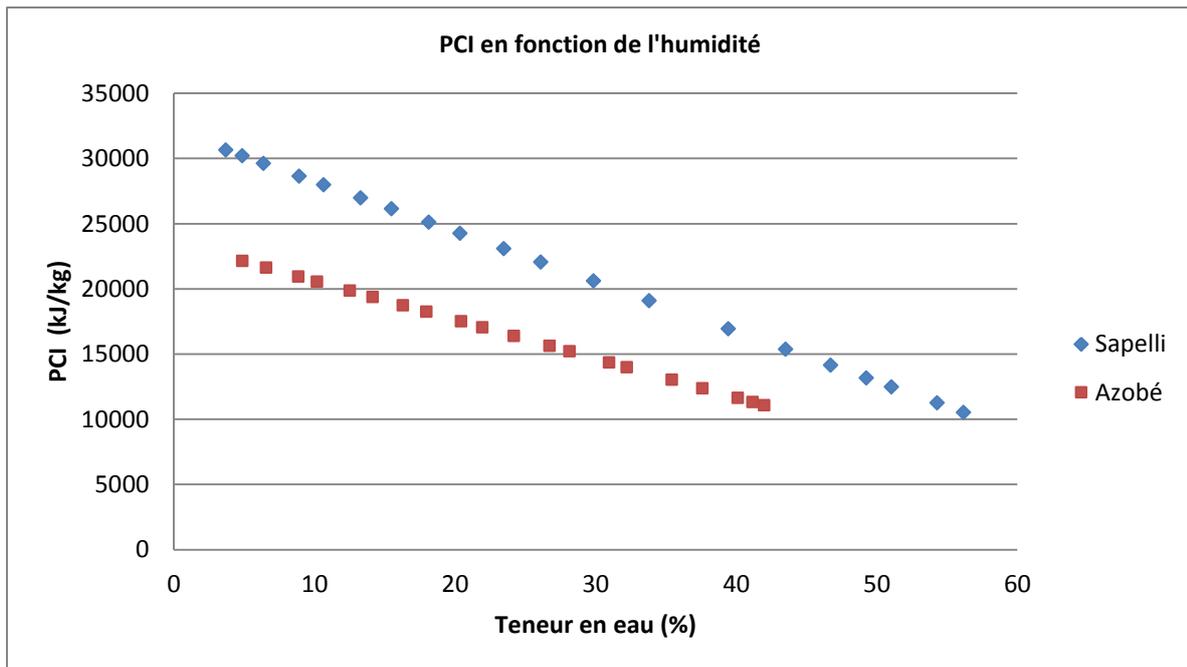


Figure 3-3: PCI du Sapelli et l'Azobé en fonction de la teneur en eau.

III-2-3-Deuxième ou Approche empirique

En effet elle permet de déterminer le pouvoir calorifique inférieur des bois en fonction du pouvoir calorifique supérieur et de la masse volumique tous fonction de la teneur en eau. La figure (3-4) représente le pouvoir calorifique inférieur obtenu par cette approche. Ce résultat révèle que les deux types d'essence sont des bois de feuillus assez similaire.

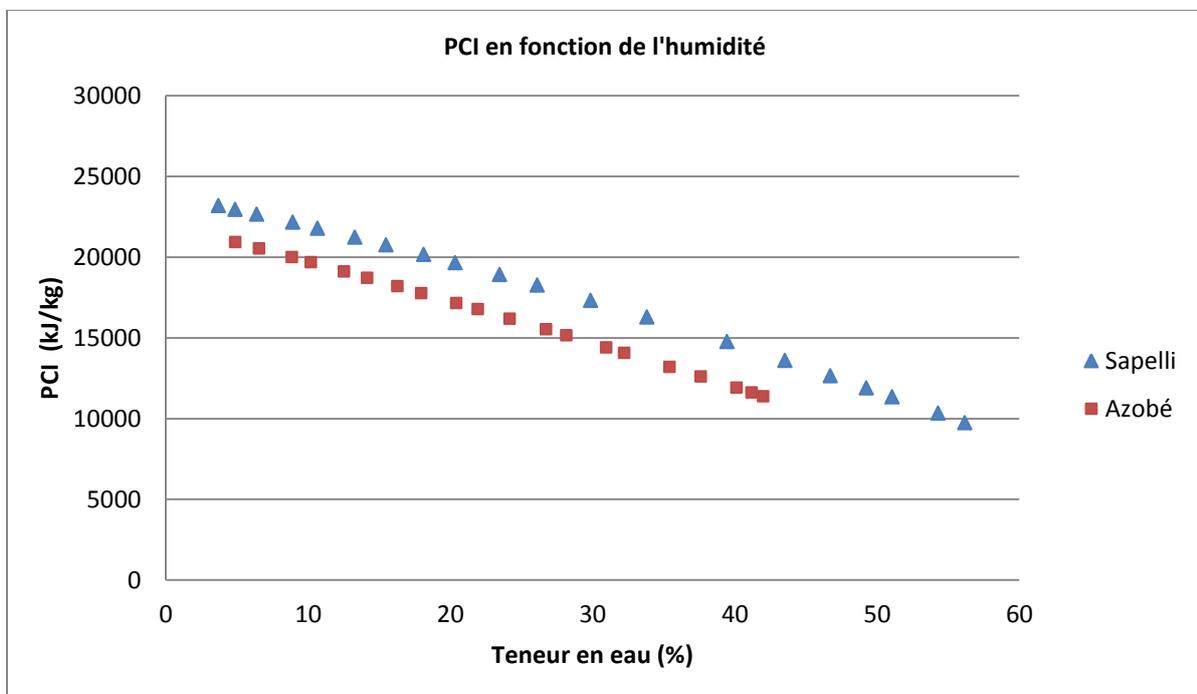


Figure 3-4: PCI en fonction du PCS et de la masse volumique tous fonction de la teneur en eau

III-2-4-Confrontation des différentes Approches

Les différentes variations qui s'opèrent dans le bois lors du séchage (figure 3-1) ont une influence sur le pouvoir calorifique inférieur (figure 3-4). Quel que soit l'approche utilisée le PCI est supérieur pour des teneurs faibles en eau. A des teneurs en eau élevées des bois, le PCI est faible par conséquent présente une mauvaise combustion. PCI est plus intéressant pour des valeurs de teneur en eau comprise à l'intervalle de 8% à 14% car la combustion est meilleure, rationnelle et économique.

En analysant les résultats de la figure (3-5) qui concerne le Sapelli, On constate que les différentes approches méthodologiques ont une même évolution. L'approche analytique est presque comme une moyenne des deux approches empiriques. Pour des teneurs en eau supérieur à 45% les approches ont des pouvoirs calorifiques très proches l'un de l'autre.

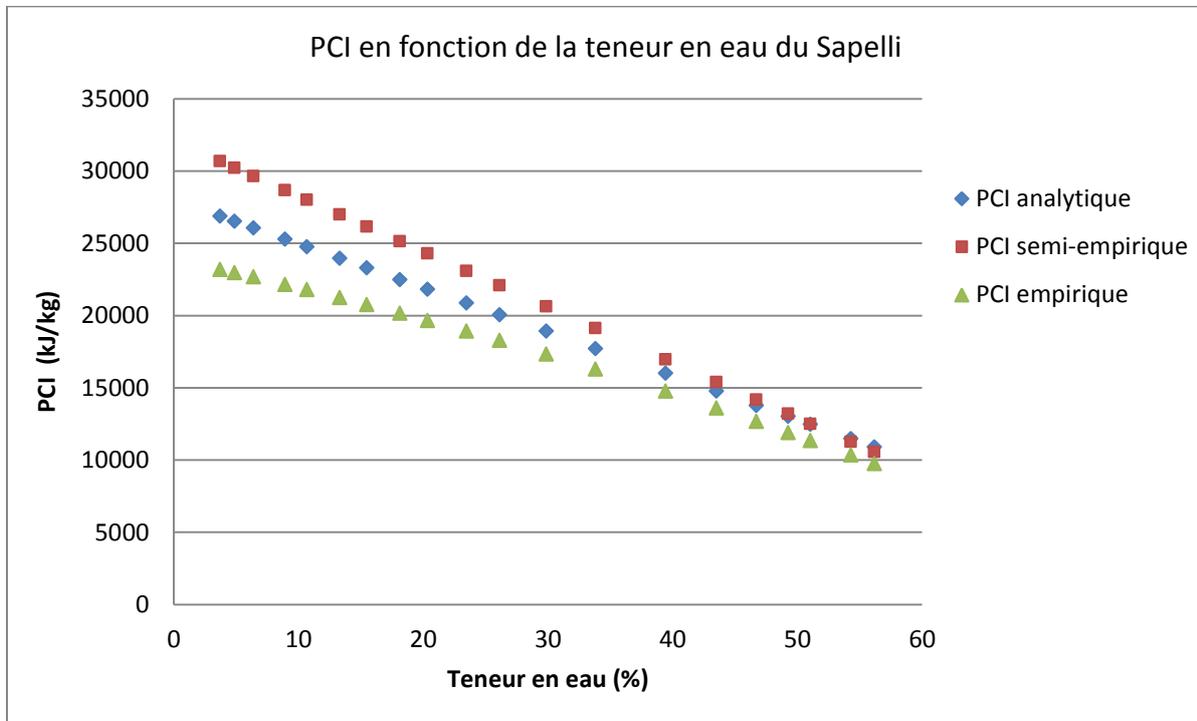


Figure 3-5: Différentes approches méthodologique de la détermination du PCI du Sapelli

Les résultats de la figure (3-6) concernent les différentes approches méthodologiques de la détermination du PCI de l'Azobé. Les évolutions des trois méthodologiques sont plus proches. Pour des teneurs en eau supérieur à 40% les approches ont des pouvoirs calorifiques inférieurs semblables.

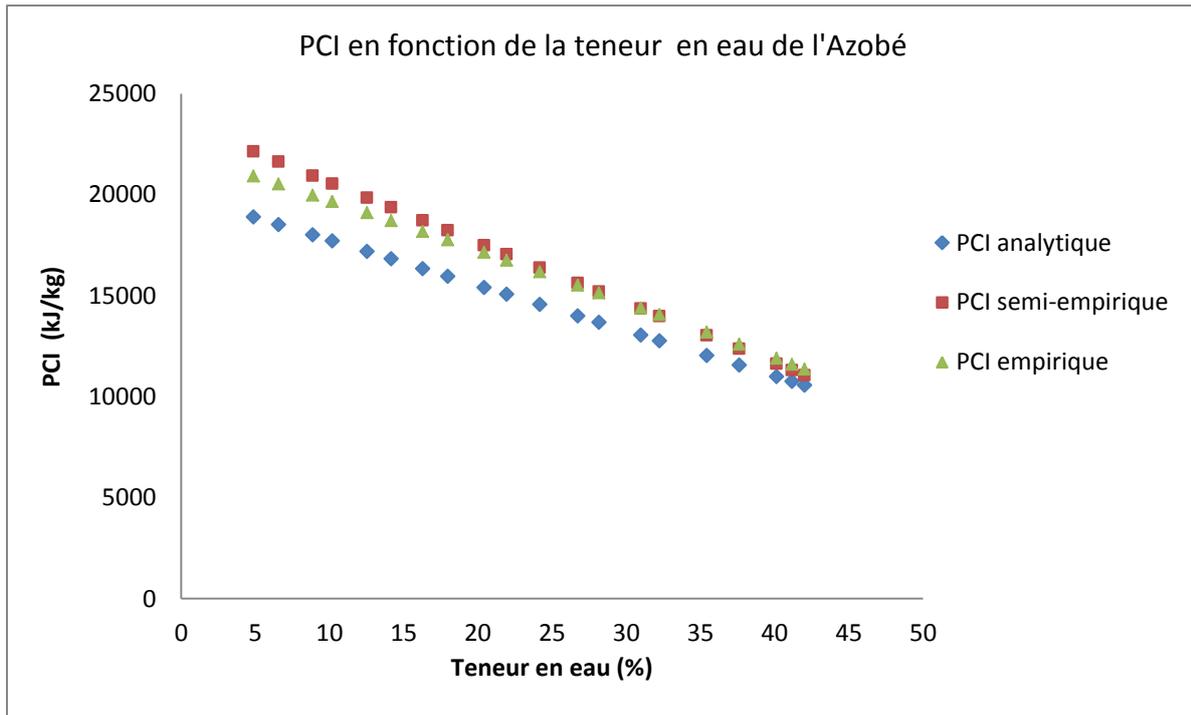


Figure 3-6 : Différentes approches méthodologiques de détermination du PCI de l'Azobé

III-3- LES EQUATIONS THEORIQUES DU PCI DES ECHANTILLONS DES BOIS AUX LABORATOIRES

Les courbes obtenues ci-dessus ont l'allure générale d'une droite pour toutes les températures. Donc on peut faire une interpolation linéaire pour avoir une relation explicite entre PCI et HB pour différentes approches.

$$PCI_{HB} = aHB + b \quad (3.1)$$

III-3-1-Interpolation linéaire : Méthode des moindres carrés

La méthode des moindres carrés est basée sur la minimisation de l'erreur quadratique S lors de l'interpolation :

$$\text{Où } S = \sum_{i=1}^{20} (aHB_i + b - PCI_{HB_i})^2 \quad (3-2)$$

Pour déterminer la droite des moindres carrés, il suffit de résoudre les systèmes d'équation linéaires obtenus en posant :

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0 \text{ Et } \frac{\partial S}{\partial b} = 0 \quad (3-3)$$

Nous obtenons alors le système suivant d'inconnus a et b

$$\begin{cases} \left(\sum_{i=1}^{20} HB_i^2 \right) a + \left(\sum_{i=1}^{20} HB_i \right) b = \sum_{i=1}^{20} HB_i \cdot PCI_{HB_i} \\ \left(\sum_{i=1}^{20} HB_i \right) a + 14b = \sum_{i=1}^{20} PCI_{HB_i} \end{cases} \quad (3-4)$$

III-3-1-1-Calcul des coefficients a et b.

La résolution de ce système donne les valeurs a et b :

$$a = \frac{20 \sum_{i=1}^{20} HB_i \cdot PCI_{HB_i} - \sum_{i=1}^{20} PCI_{HB_i} \sum_{i=1}^{20} HB_i}{20 \sum_{i=1}^{20} HB_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{20} HB_i \right)^2} \quad (3-5)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{20} HB_i^2 \sum_{i=1}^{20} PCI_{HB_i} - \sum_{i=1}^{20} HB_i \sum_{i=1}^{20} HB_i \cdot PCI_{HB_i}}{20 \sum_{i=1}^{20} HB_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{20} HB_i \right)^2} \quad (3-6)$$

III-3-1-2-Calcul de l'erreur sur les coefficients a et b.

➤ La moyenne de HB s'écrit : $\overline{HB} = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} HB_i$

➤ Sa variance s'écrit : $Var(HB) = \sigma_{HB}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{14} (HB_i - \overline{HB})^2}{20}$ (3-7)

➤ La moyenne de PCI_{HB} s'écrit : $\overline{PCI} = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} PCI_i$

➤ Et sa variance s'écrit : $Var(PCI) = \sigma_{PCI}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{14} (PCI_i - \overline{PCI})^2}{20}$ (3-8)

➤ La covariance entre HB et PCI s'écrit :

$$Cov(HB.PCI) = \sigma_{HB.PCI} = \frac{\sum_{i=1}^{14} (HB_i - \overline{HB})(PCI_i - \overline{PCI})}{20}$$

➤ La variance totale estimée s'écrit :

$$\sigma^2 = \sigma_{HB}^2 + \sigma_{PCI}^2 + \sigma_{HB.PCI} = \frac{\sum_{i=1}^{14} PCI_i - aHB_i - b^2}{20}$$

Ainsi les relations :

$$(\Delta a)^2 = 20 \frac{\sigma^2}{Det} \text{ et } (\Delta b)^2 = 20 \frac{\sigma^2}{Det} \sum_{i=1}^{20} HB_i \quad (3-9)$$

permettent de calculer Δa et Δb , erreurs sur les coefficients a et b estimés.

III-3-2-Calcul du coefficient de corrélation entre PCI et HB.

Le coefficient de corrélation permet d'apprécier le degré de liaison linéaire entre les deux variables. Soient deux variables HB et PCI relevées au cours d'une expérience. En réalité chacune de ses variables est constitué d'un vecteur de taille quatorze correspondant aux nombres d'observations expérimentales. Alors il s'obtient par la formule :

$$R = \frac{\sum HB_i - \overline{HB} \quad PCI_i - \overline{PCI}}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{20} HB_i - \overline{HB} \right]^2 \left[\sum_{i=1}^{20} PCI_i - \overline{PCI} \right]^2}} \quad (3-10)$$

Pour chaque valeur de la température de séchage du Sapelli, nous calculerons le coefficient de corrélation entre HB et PCI pour apprécier la nature de la liaison linéaire entre les deux variables.

Les équations des droites de régression linéaire sont obtenues dans les figures 3-7 et 3-8

Le coefficient de corrélation calculé à partir de la relation (3-10) R^2 est très proche de 1, confirmant une relation parfaite entre PCI et HB.

Nous constatons qu'au fur et à mesure que le taux d'humidité décroît, le PCI croît également. La figure 3-8 atteste que le pouvoir calorifique inférieur du Sapelli est supérieur 10 000 kJ/kg pour des teneurs en eau inférieures à 50%.

Pour des valeurs d'humidité inférieures ou égales à l'humidité de référence (15%) le PCI est supérieur à 20 000 kJ/kg. Ce résultat est confirmé par la littérature qui situe le PCI dans les intervalles de 9000 kJ/kg à 35 000kJ/kg (ADEME, 2008).

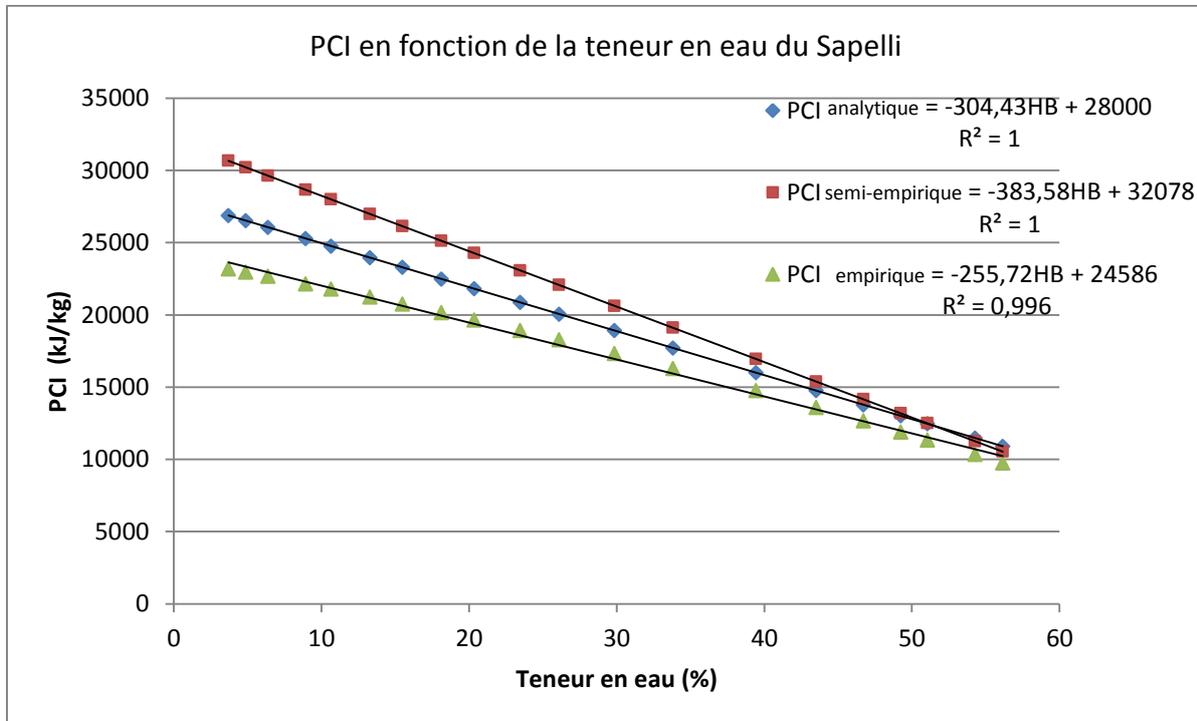


Figure 3-7 : Equation des droites de régression linéaire du Sapelli

La figure (3-9) atteste que le pouvoir calorifique inférieur de l'Azobe est supérieur 10 000 kJ/kg pour des teneurs en eau inférieures à 50%. Pour des valeurs d'humidité inférieures ou égales à l'humidité de référence (15%) le PCI est supérieur à 20 000 kJ/kg. Ce résultat soutient que le PCI est compris dans les intervalles de 9000 kJ/kg à 35 000kJ/kg (ADEME, 2008).

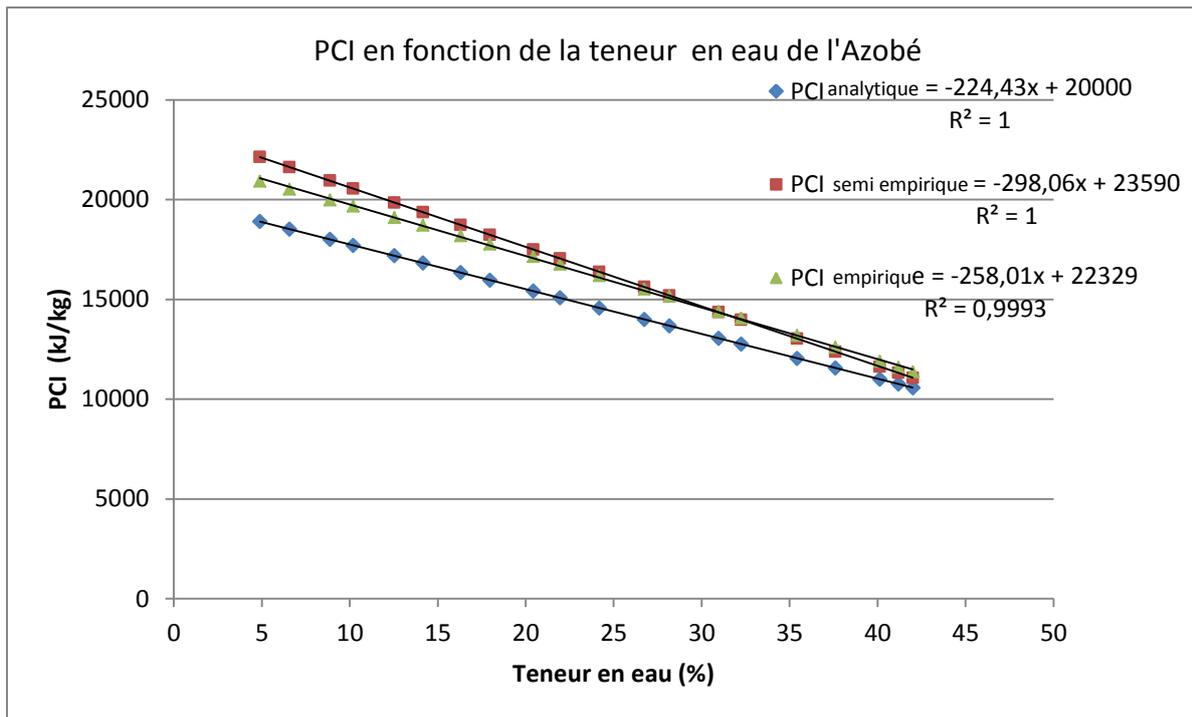


Figure 3-8 : Equation des droites de régression linéaire de l'Azobé

CHAPITRE IV : IMPLICATION DU SUJET SUR LE SYSTEME EDUCATIF.

La cinquième année de formation dans une école normale supérieure se clôture par la soutenance d'un mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de professeur de l'enseignement secondaire 2^e grade. Ce mémoire étant fait dans le domaine de l'enseignement, il est judicieux pour nous de ressortir l'implication du sujet sur le système éducatif. En ce qui concerne ce travail (contribution à la détermination des caractéristiques physico-chimiques des bois combustibles : cas de l'Azobe et du Sapelli), la pédagogie en générale et l'élève en particulier devront être capable de :

- ressortir les différents types de combustion et les éléments qui entrent dans la combustion
- faire l'inventaire des bois combustibles (savoir lequel brûle plus vite que l'autre)
- utiliser l'outil scientifique (mathématique, chimie informatique) pour différencier les différents modèles de combustion.

IV-1- LES COMBUSTIONS

Depuis la classe de 4^e, on apprend à l'élève qu'il existe deux types de combustion : la combustion complète et la combustion incomplète.

a) Les éléments qui entrent dans la combustion

Quatre éléments contribuent principalement à la composition chimique du bois : le carbone, l'oxygène, l'hydrogène et l'azote. La proportion de chaque élément varie légèrement selon l'essence du bois. On admet que la composition élémentaire moyenne du bois sec est la suivante : 50% de carbone, 44% d'oxygène, 6% d'hydrogène. La présence de l'azote (sous forme de protéine et amines) est négligée sur le plan énergétique. Par ailleurs, le bois peut également contenir des composés soufrés (0,02%) et du chlore en quantité extrêmement faible (0,001 à 0,03) (collet, 2000).

Cette étude permet donc à l'apprenant de pouvoir déterminer la formule brute du bois étudié c'est-à-dire déterminer les valeurs de x, y, z dans la formule C_xH_yO_z. Connaissant les pourcentages massiques du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène obtenus expérimentalement, l'élève peut donc appliquer les relations mathématiques apprises en classe :

$$X = \frac{C\% \times M}{1200} \quad Y = \frac{H\% \times M}{100} \quad Z = \frac{O\% \times M}{1600}$$

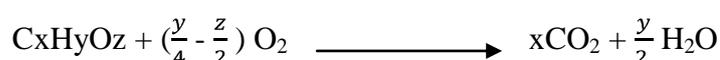
b) La combustion complète

Au cours de la combustion, si le gaz qui se dégage trouble l'eau de chaux, l'élève peut déduire qu'il s'agit du CO₂. La combustion est ainsi dite complète et on peut l'interpréter par l'équation :



c) La combustion incomplète

Si l'apprenant remarque plutôt un corps qui noircit le bas d'un couvercle posé sur la flamme, alors la combustion est incomplète et le corps formé est le carbone. La réaction peut s'interpréter par l'équation suivante :



IV-2- INVENTAIRE DES BOIS

A travers cette étude, nous avons pu déterminer le PCI des essences et donc leur intensité de combustion. L'intérêt de cet étude pour l'élève est la capacité, après un inventaire de bois bien fait, de les classer en fonction de leur facilité à brûler, de procurer des conseils et des orientations relatif à l'utilisation d'un type de bois pour combustion par rapport à un autre (savoir parmi les bois présentés ceux qui brûlent plus vite que d'autres).

IV-3- UTILITE SCIENTIFIQUE

Dans ce travail, plusieurs approches et méthodes ont été utilisées pour avoir des résultats facilement analysables. Parmi ces méthodes et approches on note :

-la manipulation des pieds à coulis qui permet à l'élève d'avoir les mesures des corps de petite dimension.

-la manipulation de l'étuve : ici l'élève découvre tout d'abord l'appareil permettant de chauffer ou de sécher le bois, ensuite il apprend à le manipuler.

-l'utilisation de l'outil informatique (l'ordinateur) : l'élève apprend comment enregistrer des données dans une feuille Excel, comment ressortir des graphes à partir des données obtenus.

-les travaux pratiques sur la détermination des caractéristiques physico-chimiques.

-l'importance des formules mathématiques et chimiques apprises en classe, car ceci intervient dans la détermination de la masse volumique, le calcul de la teneur en cendre et le calcul des PCI.

-la notion de quantité de chaleur : A travers cette étude, premièrement les élèves de la classe de 2^{nde} ont une réalité de la compréhension de la chaleur massique (C) et de la chaleur

latente qui sont des propriétés importantes dans la production de la chaleur. Deuxièmement, ceux de la classe de Terminale qui s'intéressent à la quantité de chaleur Q et comprennent que celle-ci est fonction du pouvoir calorifique.

IV-4- FICHE PEDAGOGIQUE

FICHE PEDAGOGIQUE

<p>* Thème : Contribution à la détermination des caractéristiques physico-chimiques des bois tropicaux combustibles : cas de l'Azobé et du Sapelli</p> <p>* Objectifs :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Définir : Teneur en eau, pouvoir calorifique inférieur - Classifier les bois en fonction de leur capacité de brûler - Savoir que le bois combustible est une source d'énergie <p>* Durée : 2 heures</p>		<p>Prérequis :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Généralités sur le bois - Notion d'énergie - Notion de chaleur - Utiliser la balance, Etuve 		
		<p>Matériel :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bois (Azobé, Sapelli) - Etuve - Balance - Fours - Pied à coulisse 		
Contenu	Activités de l'enseignant	Activité de l'élève	Eléments d'évaluation	Durée
Phase introductive	<p>* le professeur pose les questions, amande si nécessaire et valide les réponses des élèves aux questions suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Définir énergie, bois, combustion - Citer les modes de transfert d'énergie que vous connaissez - Citer les formes d'énergie que vous connaissez <p>* Communique les objectifs</p>	<p>* les élèves proposent des réponses</p> <p>* les élèves copient</p>	<p>*Définition (QCM) : Enonce, questionnaire</p>	

I. Les combustions	a) Les éléments qui en	<p>Activités I :</p> <p>i) Quels sont les 4 principaux éléments qui entrent dans la combustion ?</p> <p>ii) Quelles sont les formules mathématiques qui permettent d'évaluer les valeurs x, y, z d'un composé $C_xH_yO_z$?</p>	<p>Réponse des élèves :</p> <p>i) Carbone, oxygène, hydrogène, azote</p> <p>ii) $x = \frac{c\% \times M}{1200}$ $y = \frac{H\% \times M}{100}$</p> <p>$z = \frac{O\% \times M}{1600}$</p>	30 minutes
	b) Combustion complète	<p>i) Quand dit-on qu'une combustion est complète ?</p> <p>ii) Ecrire son équation bilan</p>	<p>réponse des élèves</p> <p>i) Lorsqu'elle produit du CO_2</p> <p>ii) $C_xH_yO_z + (x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2}) \longrightarrow xCO_2$</p> <p>+ $\frac{y}{2} H_2O$</p>	
	c) Combustion incomplète	<p>i) Quand dit-on qu'une combustion est incomplète ?</p> <p>ii) Ecrire son équation bilan</p>	<p>réponse des élèves</p> <p>i) Lorsqu'elle produit du O_2</p> <p>ii) $C_xH_yO_z + (\frac{y}{4} - \frac{z}{2}) O_2 \longrightarrow xCO_2 + \frac{y}{2} H_2O$</p>	
II. Inventaire de bois		<p><u>Activité 2</u> :</p> <p>Citez les différents types que vous connaissez?</p>	Les élèves répondent	10 minutes
III. Notion de teneur en eau	a) Définition	<p>i) Définir teneur en eau d'un combustible</p> <p>ii) Comment l'évalue t-on ?</p> <p>iii) Quelle est la procédure expérimentale</p>	<p>Réponse des élèves :</p> <p>i) C'est la quantité d'eau que contient un combustible</p> <p>ii) Elle est évaluée par la relation</p> $HB = \frac{M_{HB} - M_0}{M_{HB}} \times 100$ <p>iii) D'abord peser le bois humide, le sécher dans une étuve à 60°C</p>	30 minutes

			plusieurs fois, le peser encore lorsqu'il a séché. On obtient donc les masses M_{HB} et M_O		
	b) Importance	A quoi sert la détermination de la teneur en eau ?	Réponse : Elle nous permet de déterminer le pouvoir calorifique inférieur du bois		
IV. Notion de pouvoir calorifique inférieur	a) Définition	Activité 4 : i) Définir pouvoir calorifique inférieur ii) Comment l'évalue-t-on ? iii) Quelle est la procédure expérimentale ?	Réponse : i) C'est l'énergie dégagée par la combustion du bois sans récupérer la chaleur latente de la vapeur d'eau produite par la combustion ii) Elle est évaluée par la formule $PCI_{HB} = \frac{100-HB}{100} PCI_0 - 0,251 \times HB$ iii) Elle se fait à l'aide d'une bombe calorimétrique		40 minutes
	b) Importance	A quoi sert la détermination du PCI ?	Réponse : La connaissance du PCI des différents bois nous permet de faire une classification, sur la base des données scientifiques, des bois suivant la capacité de subir une combustion		
	c) Apport de la combustion du bois dans la domaine de l'énergie	Quel apport réalise la combustion du bois dans le domaine de l'énergie ?	La combustion du bois est une source de chaleur car elle fournit l'énergie. C'est l'un des modes de transfert d'énergie les plus utilisés dans le monde entier	- chaleur massique (C) -Chaleur latente L -Quantité de chaleur Q	

CONCLUSION GENERALE

Notre travail de recherche a porté sur la contribution à la détermination des caractéristiques physico-chimiques des bois combustibles au Cameroun. Nous avons utilisé ici deux types de bois : le Sapelli et l'Azobe. Tout d'abord, les valeurs trouvées expérimentalement sont approximativement égales à celles avancées par la littérature. Les écarts observés sont dus, d'une part à la particularité des essences étudiées, à leur provenance (parc-à-bois de Nkolbikok, Yaoundé), d'autre part à l'environnement expérimental inapproprié. A travers différentes approches (approche analytique, approches semi-empirique, approche empirique), nous avons pu ressortir des données telles que la masse brute, la masse anhydre, la masse de cendre, le taux de cendre des essences ; ce qui a facilité la détermination du pouvoir calorifique inférieur (PCI) des différentes essences. L'analyse de ces résultats nous permet de constater que plus le bois est humide, plus il a un faible PCI. Lorsque les teneurs en eau sont inférieures ou égales à 15%, toutes les essences ont une meilleure combustibilité. Aussi, les bois lourds (exemple : Azobe) ont des pouvoirs calorifiques inférieurs à celles des bois légers (exemple : Sapelli). Cette étude montre donc qu'on peut faire une utilisation rationnelle ou efficace du bois combustible, elle permet également de faire un choix judicieux sur les bois à utiliser comme combustible et à quelle teneur en eau il faut les utiliser. Au terme de cette analyse, on peut donc suggérer aux ménagères et aux potentiels utilisateurs de bois combustibles l'utilisation des essences dont le PCI est très grand c'est-à-dire un bois ayant une faible teneur en eau dans l'optique d'avoir une meilleure combustion.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- ADEME, Référentielle combustible bois Energie Définition et Exigences du 25 Avril 2008 Coordination technique : Elisabeth Le Net-Pole Economie, Energie et prospective, 10 avenue de Saint Mandé 75012 Paris.
- Ballard-GB (1997) : Appendix D Wood Combustion pge 8.
- Baudelaire KEMAJOU (avril 2011), foret et bois des communes forestières au Cameroun. Directeur du CTFC ; pge60.
- Centre technique forestier tropical (1983a) ; bois tropicaux, avenu de la belle-Gabrielle, 94130-NOGENT-sur-MARINE, France, pge129.
- Centre technique forestier tropical (1983b) ; bois tropicaux, avenu de la belle-Gabrielle, 94130-NOGENT-sur-MARINE, France, pge129.
- Collets S.(2009), les émissions des polluants par les foyers domestiques, pollution atmosphérique, Numéro spécial/le bois-énergie : enjeux écologiques et de santé environnementale, pge83.
- [1]Denis Pompidou FOLEFACK (2009), commercialisation du bois de chauffe en zone sahélienne du Cameroun, vol20, n°3, centre provincial de la recherche et de l'innovation de l'extrême nord, pge317.
- [2]Jacqueline NTSAMA ATANGANA, (2009), Evaluation environnementale de la problématique du bois de feu dans la ville de Garoua au Nord Cameroun ; pge47.
- MONKAM Louis (2006). Contribution à l'étude du séchage des bois tropicaux au Cameroun : cas du Doussié, du Moabi et de l'IROKO ; thèse PhD université de Yaoundé I, Faculté des sciences, Cameroun.
- NADEAU J.P (1995). Séchage : des processus physiques aux procédés industriels. Lavoisier Tec et Doc Paris.
- NFB52001 (1998). Classement visuel pour l'emploi en structure des principales essences de résineux et feuillus.
- NGOHE-EKAM Louis-Salomon (1992). Etude expérimentale des propriétés thermophysiques des bois tropicaux ; thèse Doctorat, Université CLAUDE BERNARD, LYON I.
- NSOUANDELE Jean Luc dit BOUERDJILA (2012). Etude des transferts couplés de masse et de chaleur lors du séchage convectif artificiel des bois tropicaux au Cameroun : cas du SIPO, SAPELLI, IROKO, BUBINGA, AZOBE, EBENE ; thèse PhD Université de Yaoundé I, Faculté des sciences, Cameroun.

- Rogaume Y. (2009), la combustion du bois et de la biomasse, pollution atmosphérique Numéro spécial/ le bois énergie : Enjeux économiques et de la santé, pge 66.
- SIMO TAGNE M. (2011). Contribution à l'étude du séchage des bois tropicaux au Cameroun. Aspect caractérisation, modélisation multi-échelle et simulation. Thèse PhD, Université de Yaoundé I, Faculté des sciences, Cameroun.
- [3]TAKOUGANG YIMDJEU Marc Adrien : (2014), « Etude comparative des propriétés des différents types de charbon de bois produits dans la région de l'Est-Cameroun » ; pge93.