

# Nouveaux critères pour juger de l'efficacité d'un fourneau à la combustion du charbon de bois.

M. Ndayisenga\*, G. Croiset\*\* & Y Cordier\*

Keywords: Water boil test – Stove – Combustion efficiency – Cooking test – Boiling time – Combustion rate – Charcoal.

## Résumé

L'efficacité du test d'ébullition de l'eau pour le choix du fourneau le plus économique en combustion est évaluée sur base de quatre fourneaux de cuisine. En plus de l'énergie de chauffage et de maintien de l'eau à l'ébullition (P.C.U.) généralement considérée comme critère de choix, d'autres critères tels que le temps d'ébullition et le taux de combustion ont été retenus pour indicateurs d'efficacité. Curieusement, il est apparu que le fourneau qui maintient l'eau le plus longtemps à l'ébullition avec le plus faible taux de combustion ne valorise pas l'énergie du combustible de façon efficace si l'on s'en tient au P.C.U. comme seul critère d'efficacité. Le test de cuisson a permis d'expliquer cette apparente contradiction: la fraction énergétique non comptabilisée dans le calcul du P.C.U. n'est pas réellement perdue. Le faible taux de combustion associé au temps d'ébullition important se révèlent les meilleurs indicateurs d'efficacité des fourneaux à la combustion. Le test d'ébullition de l'eau ne permet donc pas à lui seul d'identifier les fourneaux les plus adaptés économiquement. Le recours au test de cuisson reste incontournable.

## Summary

The water boil test efficiency for choosing the most economic stove in combustion is estimated on the basis of four stoves. In addition to the heating and boiling energy usually considered as selection criterion, other criteria such as the boiling time and the combustion rate have been taken to indicate efficiency. Strangely, it appeared that the stove which maintains water at its boiling point for a long time and has the lowest combustion rate doesn't valorize fuel energy efficiently if you only keep to the heating and boiling energy. The cooking test made it possible to explain that apparent contradiction: the fuel energy fraction which doesn't enter in the calculation of the heating and boiling energy isn't really lost. A low combustion rate associated with a long boiling time proved to be the best criteria of choosing the most economic stove in fuel. Therefore, the only water boil test doesn't make it possible to identify the most economically efficient stove. Resorting to the cooking test is compelling.

## 1. Introduction

Le bois constitue encore aujourd'hui la principale forme d'énergie rencontrée aussi bien au Burundi que dans la plupart des pays en voie de développement (3). Il existe deux grandes formes d'utilisation du bois-énergie au Burundi (1). Le bois de chauffage est de loin la forme la plus utilisée. Il est exploité par les ménages ruraux en foyers de type "trois pierres". Le charbon de bois est une autre forme du bois-énergie qui est plutôt exploité par les ménages urbains en fourneaux conçus et spécialisés à sa combustion. Cette dernière forme d'utilisation est le résultat de la carbonisation du bois dans des meules de carbonisation traditionnelles ou améliorées. La transformation du bois en charbon de bois lui confère un pouvoir calorifique volumique très élevé. Le charbon de bois devient alors un combustible de qualité qui nécessite un usage rationnel. Ainsi, les ménages urbains doivent-ils chercher à maximiser l'efficacité de la combustion en n'utilisant que des fourneaux de cuisine qui économisent le plus de combustible. Dès lors, une question très importante est posée: Comment évaluer les performances de ce type de fourneau? De Lepeleire et al. ont essayé d'y répondre en recourant au test d'ébullition de l'eau (4). Dans ce test, on simule une cuisson réelle en laboratoire. La nour-

riture est alors représentée par l'eau. Le pourcentage de chaleur utilisé (P.C.U.) réellement par cette dernière sert de référence dans le choix du fourneau. L'objectif étant de cuire un aliment avec un minimum de combustible, cette référence est discutable et la prise en considération d'autres critères se veut alors impérative. En outre, la cuisson proprement dite serait probablement plus habilitée à répondre à la question.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. Matériel

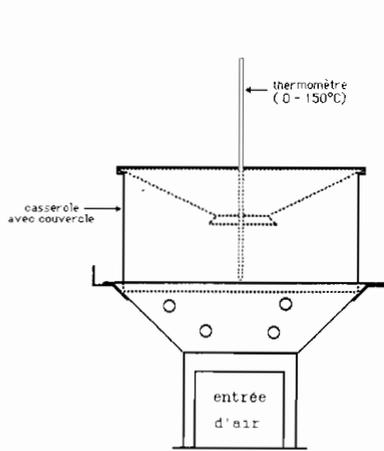
L'expérience a porté sur deux principaux modèles de fourneaux domestiques rencontrés sur le marché au Burundi et au Rwanda. Il s'agit respectivement du traditionnel et de l'amélioré burundais et rwandais. Les quatre modèles sont illustrés par les figures 1, a, b, c & d.

Les modèles dits améliorés possèdent une portière réglable qu'on peut maintenir ouverte ou fermée pendant une partie ou la totalité de l'expérience. Lors des expériences, ces modèles ont alors connu une double manipulation. La première

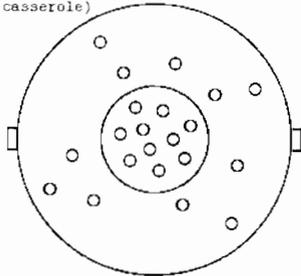
\* Université du Burundi, Faculté des Sciences Agronomiques, Département de Technologie, B.P. 2940 Bujumbura - Burundi.

\*\* Ministère de l'Énergie et des Mines. Direction Générale de l'Énergie. Projet Action Thématique Bois de Feu, Bujumbura-Burundi.

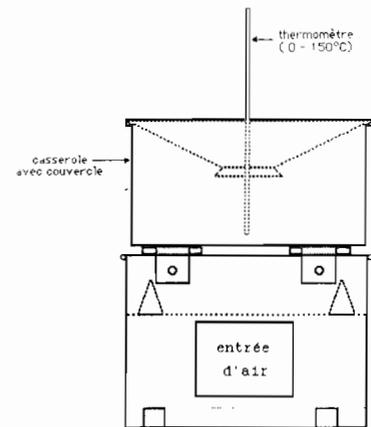
Figure 1: Représentation schématique des fourneaux employés.



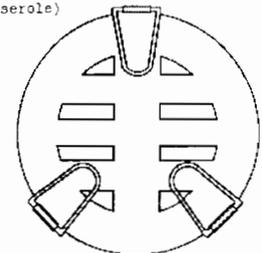
vue de haut (sans casserole)



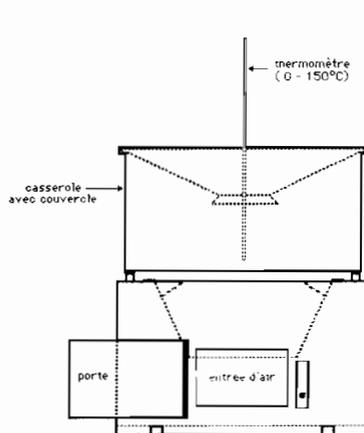
a. Dispositif expérimental avec le fourneau traditionnel burundais



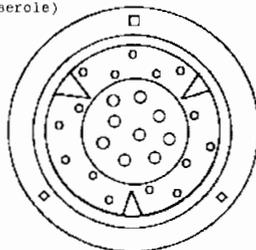
vue de haut (sans casserole)



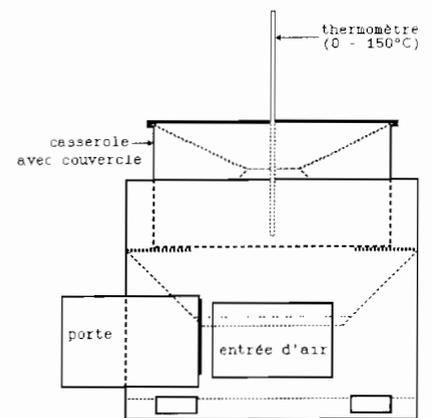
c. Dispositif expérimental avec le fourneau traditionnel rwandais



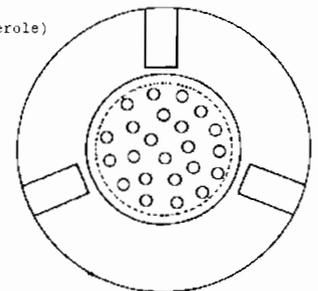
vue de haut (sans casserole)



b. Dispositif expérimental avec le fourneau ziganya amakara (amélioré burundais)



vue de haut (sans casserole)



d. Dispositif expérimental avec le fourneau rondereza (amélioré rwandais)

re consistait à maintenir la portière ouverte tout au long de l'essai alors que celle-ci était directement fermée aussitôt après l'ébullition de l'eau dans la deuxième manipulation. Ces modèles sont constitués d'une double paroi: la paroi interne aménagée en un réservoir de combustible ou chambre de combustion et la paroi externe enveloppant le réservoir et comportant la portière. La chambre de combustion est mobile et peut être enlevée pour chargement ou nettoyage.

Les modèles traditionnels possèdent quant à eux une portière qui n'est pas réglable et qui reste alors toujours maintenue naturellement ouverte. Ils sont constitués en une seule paroi formant à la fois la chambre de combustion et l'enveloppe extérieure.

## 2.2. Méthodes

La méthode de travail est le 'test d'ébullition de l'eau'. Cependant, pour plus d'objectivité, des essais complémentaires de cuisson ont été réalisés à l'aide de quelques fourneaux. Les étapes sont identiques dans les deux approches et se succèdent comme suit:

- 1) Peser 400 g de charbon de bois dont l'humidité est préalablement déterminée et les introduire dans la chambre de combustion du fourneau à tester.
- 2) Imbiber le combustible avec 50 ml de pétrole, l'allumer et laisser brûler pendant 3 minutes.
- 3) Placer sur le fourneau une casserole remplie aux 2/3 d'eau dont la température est connue et fermer avec un couvercle muni d'un thermomètre plongeant au milieu de l'eau jusqu'à 1 cm du fond de la casserole.
- 4) Mettre directement le chronomètre en marche et noter:
  - a) la température de l'eau toutes les 5 minutes jusqu'à son ébullition et de la fin de l'ébullition jusqu'à ce qu'elle atteigne 50°C
  - b) le temps au début de l'ébullition
  - c) le temps à la fin de l'ébullition
- 5) Arrêter l'expérience et peser la quantité d'eau restant dans la casserole, les imbrûlés et les cendres.

Chaque expérience a fait l'objet de trois répétitions.

## 2.3. Définitions des termes employés

Les paramètres qui ont retenu l'attention dans notre approche sont le pourcentage de chaleur utilisé ou P.C.U., le temps d'ébullition et le taux de combustion.

### 2.3.1. Le pourcentage de chaleur utilisé ou P.C.U.

Dans le domaine de la combustion, on entend par P.C.U. la fraction énergétique du combustible qui sert réellement à la cuisson. En d'autres termes, il s'agit de la quantité d'énergie dégagée par le combustible qui sert à chauffer et maintenir l'eau à l'ébullition. La part de l'énergie restant de ce combustible est dissipée à l'extérieur et sert plutôt au chauffage de la casserole, du fourneau et de l'air environnant.

Concrètement, d'après cette définition, plus le P.C.U. dans un fourneau est élevé, plus celui-ci valorise l'énergie du combustible utilisé.

La valeur du P.C.U. s'obtient de la manière suivante:

$$\text{P.C.U. (\%)} = 100 \times (\text{cch} + \text{céb})/\text{Ecc}$$

Où: \* cch(kJ) représente la quantité de chaleur nécessaire pour porter l'eau à l'ébullition, soit  $4,18 \text{ kJ/}^\circ\text{C} \cdot \text{kg} \times (\text{téb} - \text{ti}) \times \text{poids initial de l'eau (kg)}$  avec téb comme température d'ébullition et ti la température initiale de l'eau en  $^\circ\text{C}$  et  $4,18 \text{ kJ/}^\circ\text{C} \cdot \text{kg}$  la chaleur spécifique de l'eau (5).

\* céb(kJ) représente la quantité de chaleur nécessaire pour l'ébullition, soit  $2253 \text{ kJ/kg} \times \text{eau évaporée (kg)}$  avec  $2253 \text{ kJ/kg}$  comme chaleur latente de vaporisation de l'eau (5).

\* Ecc(kJ) représente la quantité d'énergie fournie par le combustible réellement consommé, soit  $\text{cc} \times (\text{PClO} \times (100 - \text{MMI}) / (100 + \text{H}) - (2,5 \times \text{H}) / (100 + \text{H}))$  avec cc comme le combustible consommé, PClO le pouvoir calorifique inférieur du combustible anhydre (environ  $30 \text{ MJ/kg}$  pour le charbon de bois), MMI la teneur en matière minérale du combustible et H la teneur en eau en pourcentage du combustible anhydre (2).

Ce paramètre a longtemps été considéré comme critère de choix des meilleurs fourneaux. Cependant, cette approche néglige totalement l'éventuel impact de la fraction énergétique soi-disant dissipée à l'extérieur.

### 2.3.2. Le temps d'ébullition

Dans le test d'ébullition de l'eau, le temps d'ébullition est l'intervalle de temps enregistré entre le début et la fin de l'ébullition. Pendant ce temps, la température de l'eau ne varie pas et reste maintenue à  $97^\circ\text{C}$ . En effet, la température d'ébullition est fonction de l'altitude; ce qui se traduit par la formule suivante:

$$\text{Tb} = (100 - \text{H}/300)^\circ\text{C} \quad (4)$$

Où: \* Tb est la température d'ébullition  
\* H l'altitude du lieu en mètres

Comme l'expérience s'est déroulée à Bujumbura où l'altitude est de 900 mètres environ, la température d'ébullition devient alors  $97^\circ\text{C}$ .

On pourrait considérer le temps d'ébullition comme la phase la plus importante dans la cuisson d'un aliment. En d'autres termes, plus cette phase consomme de combustible, moins le fourneau est efficace.

Donc, lorsque plusieurs fourneaux sont employés dans la cuisson d'un même aliment avec une même quantité d'un même combustible, le fourneau qui maintient l'ébullition le plus longtemps est indubitablement le plus économique en combustible.

### 2.3.3. Le taux de combustion

Le taux de combustion d'un fourneau est la quantité de combustible qu'il consomme par unité de temps. Dans la présente étude, cette consommation a été calculée sur base du temps écoulé entre la mise à feu du combustible et la fin de l'ébullition de l'eau. En effet, après l'ébullition, le pouvoir incandescent du combustible est affaibli et l'eau voit sa température diminuer progressivement.

Ainsi, le taux de combustion (Tc) s'exprime par la formule:

$$\text{Tc} = \text{Combustible sec consommé (CSC)} / \text{Temps à la fin de l'ébullition}$$

Où  $CSC = \frac{Pic}{(1 + Hc/100)} - Pimb (1 + Himb/100)$

Avec: \* Pic comme le poids initial du combustible  
\* Pimb, le poids des imbrûlés  
\* Hc, l'humidité du combustible  
\* Himb, l'humidité des imbrûlés

Donc, un fourneau qui a un taux de combustion faible consomme moins de combustible par unité de temps et est par conséquent plus économique.

### 3. Résultats et discussions

#### 3.1. Test d'ébullition de l'eau

Les essais portent sur les six modèles de fonctionnement qui sont offerts par les quatre types de fourneaux présentés plus haut. Les résultats obtenus sont résumés au tableau 1.

**TABLEAU 1**  
Caractéristiques moyennes des modèles de fonctionnement de fourneaux étudiés

Paramètre analysé	Modèle	Moyenne	Ecart-type	Coef. de variation(%)
1. P.C.U. (%)	T.BU	33,633	0,53	1,58
	T.RW	30,567	0,68	2,22
	A.BO	38,700	2,06	5,32
	A.BF	26,933	1,19	4,42
	A.RO	36,900	0,65	1,76
	A.RF	39,067	0,81	2,06
2. Temps d'ébullition (min)	T.BU	59,667	5,19	8,69
	T.RW	46,333	2,87	6,19
	A.BO	71,500	4,95	6,92
	A.BF	121,500	10,27	8,45
	A.RO	53,767	5,05	9,39
	A.RF	69,133	2,10	3,04
3. Taux de combustion (g/min)	T.BU	3,450	0,22	6,27
	T.RW	4,607	0,15	3,28
	A.BO	3,650	0,10	2,72
	A.BF	2,053	0,12	5,63
	A.RO	5,167	0,53	10,30
	A.RF	4,000	0,10	2,56

Signification des sigles:

T.BU: traditionnel burundais - T.RW: traditionnel rwandais

A.BO: amélioré burundais ouvert - A.BF: amélioré burundais fermé

A.RO: amélioré rwandais ouvert - A.RF: amélioré rwandais fermé

Les figures qui suivent illustrent ces résultats.

L'analyse de la variance a révélé des différences très hautement significatives entre les six modèles de fonctionnement de fourneaux au niveau des trois paramètres étudiés. Le test de Newman-Keuls au seuil de 5% a permis de dégager ces différences (tableau 2).

Il apparaît que le modèle amélioré burundais employé portière fermée après ébullition se démarque largement des autres. En effet, ce modèle maintient l'eau à l'ébullition beaucoup plus longtemps que les autres. En outre, il consomme le moins de combustible par unité de temps. Cependant, force est de constater que le même modèle valorise le moins l'énergie du combustible étant donné la faible valeur du P.C.U. Comment expliquer alors cette contradiction? L'énergie utile pour porter et maintenir l'eau à l'ébullition est faible pour le modèle en question essentiellement parce que l'évaporation est faible. En revanche, l'eau reste en ébullition pen-

Figure n°2: Représentation graphique des caractéristiques moyennes des fourneaux étudiés.

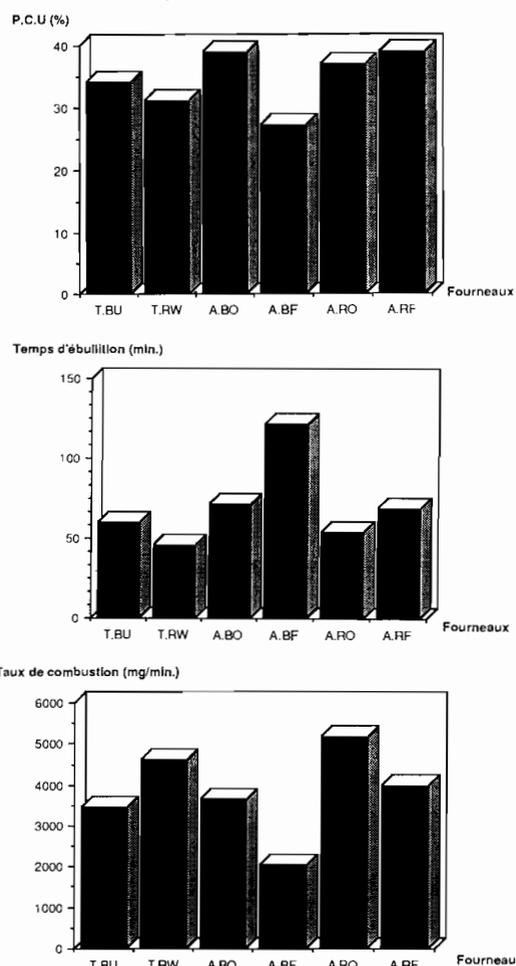


Figure 2: Représentation graphique des caractéristiques moyennes des fourneaux étudiés.

**TABLEAU 2**  
Classification des modèles en groupes homogènes

Paramètre étudié	Modèle	Moyenne	Groupes homogènes
1. P.C.U. (%)	A.BF	26,9333	A
	T.RW	30,5667	B
	T.BU	33,6333	C
	A.RO	36,9000	D
	A.BO	38,7000	D
	A.RF	39,0667	D
2. Temps d'ébullition (min)	T.RW	46,3333	A
	A.RO	53,7667	A
	T.BU	59,6667	A
	A.RF	69,1333	B
	A.BO	71,5000	B
	A.BF	121,5000	C
3. Taux de combustion (g/min)	A.BF	2,0533	A
	T.BU	3,4500	B
	A.BO	3,6500	B
	A.RF	4,0000	B
	T.RW	4,6067	C
	A.RO	5,1633	D

nant plus longtemps pour le même modèle. Cela trouverait une explication dans la forme du fourneau. En effet, dans le cas d'espèce, l'oxygénation du charbon de bois est modé-

rée et celui-ci brûle lentement; l'évaporation est par conséquent moins importante. L'énergie ainsi dégagée sert donc beaucoup plus à maintenir l'eau en ébullition qu'à son évaporation. Par contre, les autres fourneaux permettent une oxygénation relativement plus rapide et le combustible se voit alors épuisé rapidement. Cette vitesse de combustion influe sur l'évaporation qui augmente dans les mêmes proportions. L'énergie ainsi dégagée par le combustible sert alors plus à l'évaporation qu'à l'ébullition. Comme la quantité de l'eau évaporée influence beaucoup la valeur du P.C.U., celui-ci devient très élevé dans la dernière catégorie de fourneaux. Il est donc hors question de limiter les critères de choix au seul P.C.U. Dès lors, il importe d'analyser le phénomène dans son ensemble et prendre en considération des critères supplémentaires tels que présentés précédemment. Pour confirmer cela, il s'avère impératif de recourir réellement à la cuisson.

### 3.2. Test de cuisson

Les observations précédentes portent à pousser plus loin l'étude. Comme l'objectif poursuivi est de déterminer le fourneau qui économise le plus de combustible, les résultats obtenus plus haut méritent absolument une confirmation pratique à savoir: le test de cuisson.

C'est dans cette optique que le haricot (1 kg) a été associé à l'eau au lieu de se limiter au simple chauffage de l'eau. Ce choix a été motivé par deux principales raisons qui cadrent bien avec la logique de l'économie du bois-énergie au Burundi. D'une part, le haricot est l'aliment le plus permanent dans la cuisine burundaise. D'autre part, il figure parmi les aliments les plus exigeants en combustible (cuisson relativement longue).

Les essais ont été réduits aux modèles traditionnel et amélioré burundais avec portière fermée à l'ébullition dans le dernier cas. Ce choix a été motivé par la "curieuse" prédominance du fourneau traditionnel burundais sur le marché et dans la cuisine burundaise par rapport au fourneau dit "amé-

lioré" burundais. Les résultats de ces essais sont illustrés au tableau 3.

Il ressort de ces résultats que:

1°) Le temps d'ébullition requis pour cuire le kilogramme de haricot est sensiblement identique chez les deux modèles comparés. Cependant, ces derniers présentent une nette différence au niveau du taux de combustion. Cette situation s'explique par le fait que le fourneau traditionnel burundais a dû nécessiter du combustible supplémentaire pour mener à bien la cuisson du haricot qui, par ailleurs, dure en moyenne deux heures et demie dans les deux cas.

Le remplacement de ce fourneau par l'amélioré burundais avec portière fermée à l'ébullition occasionnerait alors une économie de charbon de bois qui pourrait s'évaluer à  $(3,32 - 1,765) / 3,32 \times 100$ , soit près de 47%.

2°) L'analyse du P.C.U. montre plutôt que le fourneau traditionnel valoriserait mieux le combustible que le fourneau amélioré par une combustion plus active.

Comment rapprocher alors ces deux observations ? La seule manière d'établir cette liaison est de considérer que la fraction énergétique du combustible non comptabilisée dans le calcul du P.C.U. n'est pas nécessairement perdue. Et dans ce cas, le fourneau amélioré se révèle en mesure d'exploiter largement cette fraction d'énergie. Comme précédemment, on peut considérer que, pour une combustion moins active, ce fourneau se révèle plus économique.

## 4. Conclusion

L'étude qui vient d'être menée sur la validité du test d'ébullition de l'eau dans l'identification des fourneaux les plus économiques en combustion aura permis de revoir son efficacité. En effet, pour avoir une bonne idée de l'économie réalisée en utilisant un fourneau au lieu d'un autre, il importe de dépasser le cadre du simple chauffage de l'eau et de recourir à la cuisson effective. En outre, le seul critère P.C.U. ne peut aucunement permettre de trancher sur l'efficacité d'un fourneau. Au contraire, la longueur de l'ébullition associée au taux de combustion semblent être les critères les mieux indiqués pour répondre à la question.

## 5. Remerciements

La réalisation de ce travail a été rendue possible grâce à l'appui financier de l'Administration Générale de la Coopération au Développement du Royaume de Belgique et de l'Université du Burundi que nous remercions ici très vivement.

**TABLEAU 3**  
**Caractéristiques moyennes des modèles en cuisson**

Paramètre analysé	Modèle	Moyenne	Ecart-type	Coef. de variation (%)
1. P.C.U. (%)	T.BU	38,650	2,85	7,37
	A.BF	29,450	1,05	3,57
2. Temps d'ébullition (min)	T.BU	125,000	2,00	1,60
	A.BF	124,500	0,50	0,40
3. Taux de combustion (g/min)	T.BU	3,320	0,26	7,83
	A.BF	1,765	0,06	3,12

## Références bibliographiques

1. Besse F. & Guizol P., 1991. Etude de la filière bois pour la ville de Bujumbura, Département des Forêts.
2. Carre J., Hebert J. & Lacrosse L., 1984. Analyse critique de la valorisation des matières ligneuses par voie sèche, Rapport final C.E.E. (D.G.VII), **Tome III**. Expérimentation (144 p.) et **Tome IV**. Conclusions et Recommandations (20 p.)
3. Cordier Y. & Byakweli J.M.V., 1991. Etude relative aux économies d'énergie dans le secteur industriel du Burundi, Faculté des Sciences Agronomiques, Université du Burundi, 100 p.
4. De Lepeleire G., Krishna-Prasad K., Verhaert P. & Visser P., 1984. Guide technique des fourneaux à bois, Association Bois de Feu, Nogent-Sur-Marne (France), 366 p.
5. Izard J., 1955. Physique industrielle, 30ème édition.
6. Ndayisenga M., Croiset G. & Cordier Y., 1993. Contribution à l'étude de la valorisation énergétique de la parche de café au Burundi, Mémoire de fin d'études, Faculté des Sciences Agronomiques, Université du Burundi, 59 p.

M. Ndayisenga, Burundais. Ingénieur Agronome, Assistant au Département de Technologie, Faculté des Sciences Agronomiques, Université du Burundi. (U.B., 1993)

G. Croiset, Belge. Ingénieur Agronome des Eaux et Forêts (F.S.A.Gx), En disponibilité (Chef du Projet Action Thématique Bois de Feu à Bujumbura au moment de l'élaboration de l'article).

Y. Cordier, Belge. Ingénieur Agronome du Génie Rural (F.S.A.Gx, 1978), Ingénieur en Géotechnie (U.L.B., 1981), Docteur en Sciences Agronomiques (F.S.A.Gx, 1983), Professeur à la Faculté des Sciences Agronomiques et Chef du Département de technologie à la même Faculté

Organismes ayant subsidié les travaux: - Université du Burundi - A.G.C.D.-FED

### Quelques titres en attente de publication

#### Some accepted titles awaiting publication

#### Enkele aanvaarde titels die op publikatie wacht wachten

#### Algunos títulos en espera publicación

Etude de la complémentation minérale dans les compostières en milieu paysan du Mugamba

Influence de divers substrats sur la production d'*Eudrilus eugeniae* (Oligochaeta)

Influence de la floraison, de la croissance en hauteur et en diamètre des plants sur la productivité de deux variétés de tomates

La voie foncière et administrative en appui à la voie écologique et agricole pour une gestion décentralisée des ressources naturelles dans le programme Après-Barrages au Sénégal.

Résultats d'enquête sur la brucellose bovine en Guinée

Caractéristiques physiques de la production du melon cantaloup *Cucumis melo* L., cultivé sous serre

Analyse statistique de la production vivrière au Zaïre

Influence of crop management and soil on plantain *Musa sp.*, AAB group response to black sigatoka infection in southeastern Nigeria

Effects of feeding poor quality desert grass and subsequent refeeding on a high plane of nutrition on growth and body composition of Sudan desert lambs

Interaction entre une punaise *Pseudotherapus devastans* Dist. et d'un champignon *Colletotrichum gloeosporioides* Penz sur l'installation de l'antracnose sur les tiges de manioc

Activités larvicide des espèces végétales *Nicotiana tabacum* L et *Tetradenia riparia* (Hoechst) Codd chez la tique *Rhipicephalus appendiculatus* Neumann

Nodulation et rendements du soja *Glycine max* L. Merrill inoculé par *Bradyrhizobium japonicum* dans différents systèmes de culture à Kombé-Brazzaville, Congo

The development of lean muscle, bone and fat in the West African Dwarf goat of Nigeria maintained on good plane of nutrition

Les pucerons des agrumes et leurs ennemis en Tunisie.

Estrous cycle characteristics and blood progesterone levels in holstein heifers under altitude and tropical conditions in Colombia

Tests au champ de la résistance de la pyriculariose du riz au Zaïre

Identification de quelques contraintes à la production de manioc *Manihot utilissima*, de patate douce *Ipomoea batatas* et de pomme de terre *Solanum tuberosum* à l'Est du Zaïre.