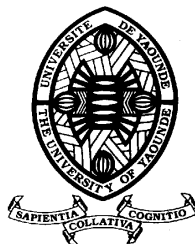


**UNIVERSITE DE YAOUNDE I**  
**FACULTE DES SCIENCES**  
CENTRE DE RECHERCHE ET DE  
FORMATION DOCTORAL, SCIENCE DE  
LA VIE, SANTE ET ENVIRONNEMENT



**UNIVERSITY OF YAOUNDE I**  
**FACULTY OF SCIENCE**  
CENTRE FOR RESEARCH AND  
TRAINING IN GRADUATE  
STUDIES IN LIFE HEALTH

**DEPARTEMENT DE BIOCHIMIE**  
**DEPARTMENT OF BIOCHEMISTRY**

**LABORATOIRE DE SECURITE SANITAIRE DES ALIMENTS**  
**FOOD SAFETY LABORATORY**

**Évaluation de l'efficacité des gazéificateurs et  
coques de riz comme source d'énergie et  
évaluation de la toxicité des fumées chez les rats.**

**THESE**

Présentée et soutenue publiquement en vue de l'obtention du Doctorat/PhD. en  
Biochimie

Spécialité : **Sécurité Sanitaire des Aliments**  
Par

**MBASSI Josiane Emilie Germaine**

Matricule 13T2144

*Maître-es Sciences*



**Superviseur de la Thèse : MBACHAM FON WILFRED, Professeur ;**

**Directeurs de la Thèse : NDINDENG SALI ATANGA, Maître de Recherche ;**

**ACHU MERCY BIH Epse LOH, Maître de Conférences.**

**Année 2021**

UNIVERSITE DE YAOUNDE I  
-----  
FACULTE DES SCIENCES  
-----  
DEPARTEMENT DE BIOCHIMIE  
-----  
B.P.812 Yaoundé



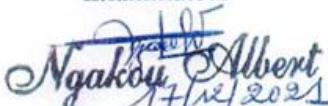
UNIVERSITY OF YAOUNDE I  
-----  
FACULTY OF SCIENCE  
-----  
DEPARTMENT OF BIOCHEMISTRY  
-----  
PO. BOX .812 Yaoundé

## ATTESTATION DE CORRECTION

Nous soussignés : Pr. **MOUNDIPA Paul**, Président du jury et Pr. **NGAKOU Albert**, Examinateur, attestons que Madame **MBASSI Josiane Emilie Germaine**, Matricule **13T2144** a effectué les corrections conformément aux exigences du jury de soutenance de sa thèse de Doctorat/Ph.D en Biochimie option Sécurité Sanitaire des Aliments, soutenue le 08 octobre 2021 à 10h dans la salle S01 /S02 de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I sous le thème «Évaluation de l'efficacité des gazéificateurs et coques de riz comme source d'énergie et évaluation de la toxicité des fumées chez les rats.».

En foi de quoi la présente attestation lui est établie pour servir et valoir ce que de droit.

Examineur

  
**Ngakou Albert**  
17/12/2021  
MSc. Ph.D Professor  
(Plant-Microbe-Insect Interactions)




Président du jury

20 DEC 2021

  
**Moundipa Paul**  
Professeur  
Enzymologie - Toxicologie



<b>UNIVERSITÉ DE YAOUNDE I</b> <b>Faculté des Sciences</b> Division de la Programmation et du Suivi des Activités Académiques		<b>THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I</b> <b>Faculty of Science</b> Division of Programming and Follow-up of Academic Affairs
<b>LISTE DES ENSEIGNANTS PERMANENTS</b>		<b>LIST OF PERMANENT TEACHING STAFF</b>

**ANNÉE ACADEMIQUE 2021/2022**

(Par Département et par Grade)

**DATE D'ACTUALISATION 22 septembre 2021**

**ADMINISTRATION**

**DOYEN** : TCHOUANKEU Jean- Claude, *Maître de Conférences*

**VICE-DOYEN / DPSAA** : ATCHADE Alex de Théodore, *Maître de Conférences*

**VICE-DOYEN / DSSE** : NYEGUE Maximilienne Ascension, *Professeur*

**VICE-DOYEN / DRC** : ABOSSOLO Monique, *Maître de Conférences*

**Chef Division Administrative et Financière** : NDOYE FOE Marie C. F., *Maître de Conférences*

**Chef Division des Affaires Académiques, de la Scolarité et de la Recherche DAASR** : AJEAGAH

Gideon AGHAINDUM, *Professeur*

**1- DÉPARTEMENT DE BIOCHIMIE (BC) (38)**

N°	NOMS ET PRÉNOMS	GRADE	OBSERVATIONS
1	BIGOGA DAIGA Jude	Professeur	En poste
2	FEKAM BOYOM Fabrice	Professeur	En poste
3	FOKOU Elie	Professeur	En poste
4	KANSCI Germain	Professeur	En poste
5	MBACHAM FON Wilfried	Professeur	En poste
6	MOUNDIPA FEWOU Paul	Professeur	Chef de Département
7	NINTCHOM PENLAP V. épouse BENG	Professeur	En poste
8	OBEN Julius ENYONG	Professeur	En poste
9	ACHU Merci BIH	Maître de Conférences	En poste
10	ATOGHO Barbara Mma	Maître de Conférences	En poste

11	AZANTSA KINGUE GABIN BORIS	Maître de Conférences	En poste
12	BELINGA née NDOYE FOE M. C. F.	Maître de Conférences	Chef DAF / FS
13	BOUDJEKO Thaddée	Maître de Conférences	En poste
14	DJUIDJE NGOUNOUE Marcelline	Maître de Conférences	En poste
15	EFFA NNOMO Pierre	Maître de Conférences	En poste
16	EWANE Cécile Anne	Maître de Conférences	En poste
17	MOFOR née TEUGWA Clotilde	Maître de Conférences	Inspecteur de Service MINESUP
18	NANA Louise épouse WAKAM	Maître de Conférences	En poste
19	NGONDI Judith Laure	Maître de Conférences	En poste
20	NGUEFACK Julienne	Maître de Conférences	En poste
21	NJAYOU Frédéric Nico	Maître de Conférences	En poste
22	TCHANA KOUATCHOUA Angèle	Maître de Conférences	En poste

23	AKINDEH MBUH NJI	Chargé de Cours	En poste
24	BEBEE Fadimatou	Chargée de Cours	En poste
25	BEBOY EDJENGUELE Sara Nathalie	Chargé de Cours	En poste
25	DAKOLE DABOY Charles	Chargé de Cours	En poste
26	DJUIKWO NKONGA Ruth Viviane	Chargée de Cours	En poste
27	DONGMO LEKAGNE Joseph Blaise	Chargé de Cours	En poste
28	FONKOUA Martin	Chargé de Cours	En poste
29	KOTUE KAPTUE Charles	Chargé de Cours	En poste
30	LUNGA Paul KEILAH	Chargé de Cours	En poste
31	MANANGA Marlyse Joséphine	Chargée de Cours	En poste
32	MBONG ANGIE M. Mary Anne	Chargée de Cours	En poste
33	Palmer MASUMBE NETONGO	Chargé de Cours	En poste
34	PECHANGOU NSANGO Sylvain	Chargé de Cours	En poste

35	MBOUCHE FANMOE Marceline Joëlle	Assistante	En poste
36	OWONA AYISSI Vincent Brice	Assistant	En poste
37	WILFRIED ANGIE Abia	Assistante	En poste

## 2- DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE ANIMALES (BPA) (46)

1	AJEAGAH Gideon AGHAINDUM	Professeur	<i>DAARS/FS</i>
2	BILONG BILONG Charles-Félix	Professeur	Chef de Département
3	DIMO Théophile	Professeur	En Poste
4	DJIETO LORDON Champlain	Professeur	En Poste
5	DZEUFLET DJOMENI Paul Désiré	Professeur	En Poste
6	ESSOMBA née NTSAMA MBALA	Professeur	<i>Vice Doyen/FMSB/UYI</i>
7	FOMENA Abraham	Professeur	En Poste
8	KAMTCHOUING Pierre	Professeur	En poste
9	KEKEUNOU Sévilor	Professeur	En poste
10	NJAMEN Dieudonné	Professeur	En poste
11	NJIOKOU Flobert	Professeur	En Poste
12	NOLA Moïse	Professeur	En poste
13	TAN Paul VERNYUY	Professeur	En poste
14	TCHUEM TCHUENTE Louis Albert	Professeur	<i>Inspecteur de service Coord.Progr./MINSANTE</i>
15	ZEBAZE TOGOUET Serge Hubert	Professeur	<i>En poste</i>

16	BILANDA Danielle Claude	Maître de Conférences	En poste
17	DJIOGUE Séfirin	Maître de Conférences	En poste
18	JATSA BOUKENG Hermine épouse MEGAPTCHE	Maître de Conférences	En Poste
19	LEKEUFACK FOLEFACK Guy B.	Maître de Conférences	En poste
20	MEGNEKOU Rosette	Maître de Conférences	En poste
21	MONY Ruth épouse NTONE	Maître de Conférences	En Poste
22	NGUEGUIM TSOFAK Florence	Maître de Conférences	En poste
23	TOMBI Jeannette	Maître de Conférences	En poste

24	ALENE Désirée Chantal	Chargée de Cours	En poste
25	ATSAMO Albert Donatien	Chargé de Cours	En poste
26	BELLET EDIMO Oscar Roger	Chargé de Cours	En poste
27	DONFACK Mireille	Chargée de Cours	En poste
28	ETEME ENAMA Serge	Chargé de Cours	En poste
29	GOUNOUE KAMKUMO Raceline	Chargée de Cours	En poste
30	KANDEDA KAVAYE Antoine	Chargé de Cours	En poste
31	MAHOB Raymond Joseph	Chargé de Cours	En poste
32	MBENOUN MASSE Paul Serge	Chargé de Cours	En poste
33	MOUNGANG Luciane Marlyse	Chargée de Cours	En poste
34	MVEYO NDANKEU Yves Patrick	Chargé de Cours	En poste
35	NGOUATEU KENFACK Omer Bébé	Chargé de Cours	En poste
36	NGUEMBOK	Chargé de Cours	En poste
37	NJUA Clarisse Yafi	Chargée de Cours	Chef Div. UBA
38	NOAH EWOTI Olive Vivien	Chargée de Cours	En poste
39	TADU Zephyrin	Chargé de Cours	En poste
40	TAMSA ARFAO Antoine	Chargé de Cours	En poste
41	YEDE	Chargé de Cours	En poste

42	BASSOCK BAYIHA Etienne Didier	Assistant	En poste
43	ESSAMA MBIDA Désirée Sandrine	Assistante	En poste
44	KOGA MANG DOBARA	Assistant	En poste
45	LEME BANOCK Lucie	Assistante	En poste
46	YOUNOUSSA LAME	Assistant	En poste

### **3- DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE VÉGÉTALES (BPV) (33)**

1	AMBANG Zachée	Professeur	Chef Division/UYII
2	BELL Joseph Martin	Professeur	En poste
3	DJOCGOUE Pierre François	Professeur	En poste
4	MBOLO Marie	Professeur	En poste
5	MOSSEBO Dominique Claude	Professeur	En poste
6	YOUMBI Emmanuel	Professeur	Chef de Département
7	ZAPFACK Louis	Professeur	En poste

8	ANGONI Hyacinthe	Maître de Conférences	En poste
9	BIYE Elvire Hortense	Maître de Conférences	En poste
10	KENGNE NOUMSI Ives Magloire	Maître de Conférences	En poste
11	MALA Armand William	Maître de Conférences	En poste
12	MBARGA BINDZI Marie Alain	Maître de Conférences	CT/ MINESUP
13	NDONGO BEKOLO	Maître de Conférences	<i>CE / MINRESI</i>
14	NGODO MELINGUI Jean Baptiste	Maître de Conférences	En poste
15	NGONKEU MAGAPTCHE Eddy L.	Maître de Conférences	En poste
16	TONFACK Libert Brice	Maître de Conférences	En poste
17	TSOATA Esaïe	Maître de Conférences	En poste

18	DJEUANI Astride Carole	Chargé de Cours	En poste
19	GOMANDJE Christelle	Chargée de Cours	En poste
20	MAFFO MAFFO Nicole Liliane	Chargé de Cours	En poste
21	MAHBOU SOMO TOUKAM. Gabriel	Chargé de Cours	En poste
22	NGALLE Hermine BILLE	Chargée de Cours	En poste
23	NGOUO Lucas Vincent	Chargé de Cours	En poste
24	NNANGA MEBENGA Ruth Laure	Chargé de Cours	En poste
25	NOUKEU KOUAKAM Armelle	Chargé de Cours	En poste
26	ONANA JEAN MICHEL	Chargé de Cours	En poste

27	GODSWILL NTSOMBAH NTSEFONG	Assistant	En poste
28	KABELONG BANAHOU Louis-Paul- Roger	Assistant	En poste
29	KONO Léon Dieudonné	Assistant	En poste
30	LIBALAH Moses BAKONCK	Assistant	En poste
31	LIKENG-LI-NGUE Benoit C	Assistant	En poste
32	TAEDOUNG Evariste Hermann	Assistant	En poste

33	TEMEGNE NONO Carine	Assistant	En poste
----	---------------------	-----------	----------

<b>4- DÉPARTEMENT DE CHIMIE INORGANIQUE (CI) (33)</b>
---

1	AGWARA ONDOH Moïse	Professeur	<i>Chef de Département</i>
2	DJOUFAC WOUMFO Emmanuel	Professeur	En poste
3	Florence UFI CHINJE épouse MELO	Professeur	<i>Recteur Univ.Ngaoundere</i>
4	GHOGOMU Paul MINGO	Professeur	<i>Ministre Chargé deMiss.PR</i>
5	NANSEU Njiki Charles Péguy	Professeur	En poste
6	NDIFON Peter TEKE	Professeur	<i>CT MINRESI</i>
7	NDIKONTAR Maurice KOR	Professeur	<i>Vice-Doyen Univ. Bamenda</i>
8	NENWA Justin	Professeur	En poste
9	NGAMENI Emmanuel	Professeur	<i>DOYEN FS UDs</i>
10	NGOMO Horace MANGA	Professeur	<i>Vice Chancellor/UB</i>

11	ACAYANKA Elie	Maître de Conférences	En poste
12	BABALE née DJAM DOUDOU	Maître de Conférences	<i>Chargée Mission P.R.</i>
13	EMADACK Alphonse	Maître de Conférences	En poste
14	KAMGANG YOUBI Georges	Maître de Conférences	En poste
15	KEMMEGNE MBOUGUEM Jean C.	Maître de Conférences	En poste
16	KONG SAKEO	Maître de Conférences	En poste
17	NDI NSAMI Julius	Maître de Conférences	En poste
18	NJIOMOU C. épse DJANGANG	Maître de Conférences	En poste
19	NJOYA Dayirou	Maître de Conférences	En poste
20	TCHAKOUTE KOUAMO Hervé	Maître de	En poste



		Conférences	
--	--	-------------	--

21	BELIBI BELIBI Placide Désiré	Chargé de Cours	CS/ ENS Bertoua
22	CHEUMANI YONA Arnaud M.	Chargé de Cours	En poste
23	KENNE DEDZO GUSTAVE	Chargé de Cours	En poste
24	KOUOTOU DAOUDA	Chargé de Cours	En poste
25	MAKON Thomas Beauregard	Chargé de Cours	En poste
26	MBEY Jean Aime	Chargé de Cours	En poste
27	NCHIMI NONO KATIA	Chargé de Cours	En poste
28	NEBA nee NDO SIRI Bridget NDOYE	Chargée de Cours	CT/ MINFEM
29	NYAMEN Linda Dyorisse	Chargée de Cours	En poste
30	PABOUDAM GBAMBIE A.	Chargée de Cours	En poste

31	NJANKWA NJABONG N. Eric	Assistant	En poste
32	PATOUOSSA ISSOFA	Assistant	En poste
33	SIEWE Jean Mermoz	Assistant	En Poste

#### 5- DÉPARTEMENT DE CHIMIE ORGANIQUE (CO) (34)

1	DONGO Etienne	Professeur	Vice-Doyen/FSE/UYI
2	GHO GOMU TIH Robert Ralph	Professeur	Dir. IBAF/UDA
3	NGOUELA Silvère Augustin	Professeur	Chef de Département UDS
4	NYASSE Barthélemy	Professeur	En poste
5	PEGNYEMB Dieudonné Emmanuel	Professeur	Directeur/ MINESUP/ Chef de Département
6	WANDJI Jean	Professeur	En poste

7	Alex de Théodore ATCHADE	Maître de Conférences	Vice-Doyen / DPSAA
8	AMBASSA Pantaléon	Maître de Conférences	En poste
9	EYONG Kenneth OBEN	Maître de Conférences	En poste
10	FOLEFOC Gabriel NGOSONG	Maître de Conférences	En poste
11	FOTSO WABO Ghislain	Maître de Conférences	En poste

12	KEUMEDJIO Félix	Maître de Conférences	En poste
13	KEUMOGNE Marguerite	Maître de Conférences	En poste
14	KOUAM Jacques	Maître de Conférences	En poste
15	MBAZOA née DJAMA Céline	Maître de Conférences	En poste
16	MKOUNGA Pierre	Maître de Conférences	En poste
17	MVOT AKAK CARINE	Maître de Conférences	En poste
18	NGO MBING Joséphine	Maître de Conférences	Sous/Direct. MINERESI
19	NGONO BIKOBO Dominique Serge	Maître de Conférences	C.E/ MINESUP
20	NOTE LOUGBOT Olivier Placide	Maître de Conférences	C.S/ MINESUP
21	NOUNGOUE TCHAMO Diderot	Maître de Conférences	En poste
22	TABOPDA KUATE Turibio	Maître de Conférences	En poste
23	TAGATSING FOTSING Maurice	Maître de Conférences	En poste
24	TCHOUANKEU Jean-Claude	Maître de Conférences	<i>Doyen /FS/ UYI</i>
25	TIH née NGO BILONG E. Anastasie	Maître de Conférences	En poste
26	YANKEP Emmanuel	Maître de Conférences	En poste
27	ZONDEGOUMBA Ernestine	Maître de Conférences	En poste

28	KAMTO Eutrophe Le Doux	Chargé de Cours	En poste
29	NGNINTEDO Dominique	Chargé de Cours	En poste
30	NGOMO Orléans	Chargée de Cours	En poste
31	OUAHOUE WACHE Blandine M.	Chargée de Cours	En poste
32	SIELINOUE TEDJON Valérie	Chargé de Cours	En poste

33	MESSI Angélique Nicolas	Assistant	En poste
34	TSEMEUGNE Joseph	Assistant	En poste

**6- DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE (IN) (25)**

1	ATSA ETOUNDI Roger	Professeur	<i>Chef Div.MINESUP</i>
2	FOUDA NDJODO Marcel Laurent	Professeur	<i>Chef Dpt ENS/Chef IGA.MINESUP</i>

3	NDOUNDAM René	Maître de Conférences	En poste
---	---------------	-----------------------	----------

4	ABESSOLO ALO'O Gislain	Chargé de Cours	En poste
5	AMINOUE Halidou	Chargé de Cours	<i>Chef de Département</i>
6	DJAM Xaviera YOUH - KIMBI	Chargé de Cours	En Poste
7	DOMGA KOMGUEM Rodrigue	Chargé de Cours	En poste
8	EBELE Serge Alain	Chargé de Cours	En poste
9	KOUOKAM KOUOKAM E. A.	Chargé de Cours	En poste
10	MELATAGIA YONTA Paulin	Chargé de Cours	En poste
11	MONTHÉ DJIADEU Valéry M.	Chargé de Cours	En poste
12	MOTO MPONG Serge Alain	Chargé de Cours	En poste
13	OLLE OLLE Daniel Claude Delort	Chargé de Cours	Directeur adjoint Enset. Ebolowa
14	TAPAMO Hyppolite	Chargé de Cours	En poste
15	TINDO Gilbert	Chargé de Cours	En poste
16	TSOPZE Norbert	Chargé de Cours	En poste
17	WAKU KOUAMOU Jules	Chargé de Cours	En poste

18	BAYEM Jacques Narcisse	Assistant	En poste
19	EKODECK Stéphane Gaël Raymond	Assistant	En poste
20	HAMZA Adamou	Assistant	En poste
21	JIOMEKONG AZANZI Fidel	Assistant	En poste
22	MAKEMBE. S . Oswald	Assistant	En poste
23	MESSI NGUELE Thomas	Assistant	En poste
24	MEYEMDOU Nadège Sylvianne	Assistante	En poste
25	NKONDOCK. MI. BAHANACK.N.	Assistant	En poste

**7- DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES (MA) (30)**

1	<b>AYISSI Raoult Domingo</b>	Professeur	Chef de Département
2	<b>EMVUDU WONO Yves S.</b>	Professeur	<i>Inspecteur MINESUP</i>

3	KIANPI Maurice	Maître de Conférences	En poste
4	MBANG Joseph	Maître de Conférences	En poste
5	MBEHOU Mohamed	Maître de Conférences	En poste
6	MBELE BIDIMA Martin Ledoux	Maître de Conférences	En poste
7	NKUIMI JUGNIA Célestin	Maître de Conférences	En poste
8	NOUNDJEU Pierre	Maître de Conférences	<i>Chef service des programmes &amp; Diplômes/FS/UYI</i>
9	TCHAPNDA NJABO Sophonie B.	Maître de Conférences	Directeur/AIMS Rwanda
10	TCHOUNDJA Edgar Landry	Maître de Conférences	En poste

11	AGHOUKENG JIOFACK Jean Gérard	Chargé de Cours	Chef Cellule MINPLAMAT
12	CHENDJOU Gilbert	Chargé de Cours	En poste
13	DJIADEU NGAHA Michel	Chargé de Cours	En poste
14	DOUANLA YONTA Herman	Chargé de Cours	En poste
15	FOMEKONG Christophe	Chargé de Cours	En poste
16	KIKI Maxime Armand	Chargé de Cours	En poste
17	MBAKOP Guy Merlin	Chargé de Cours	En poste
18	MENGUE MENGUE David Joe	Chargé de Cours	En poste
19	NGUEFACK Bernard	Chargé de Cours	En poste
20	NIMPA PEFOUKEU Romain	Chargée de Cours	En poste
21	POLA DOUNDOU Emmanuel	Chargé de Cours	En poste

22	TAKAM SOH Patrice	Chargé de Cours	En poste
23	TCHANGANG Roger Duclos	Chargé de Cours	En poste
24	TETSADJIO TCHILEPECK M. E.	Chargé de Cours	En poste
25	TIAYA TSAGUE N. Anne-Marie	Chargée de Cours	En poste

26	BITYE MVONDO Esther Claudine	Assistante	En poste
27	MBATAKOU Salomon Joseph	Assistant	En poste
28	MBIAKOP Hilaire George	Assistant	En poste
29	MEFENZA NOUNTU Thiery	Assistant	En poste
30	TCHEUTIA Daniel Duviol	Assistant	En poste

### 8- DÉPARTEMENT DE MICROBIOLOGIE (MIB) (18)

1	ESSIA NGANG Jean Justin	Professeur	<i>Chef de Département</i>
2	NYEGUE Maximilienne Ascension	Professeur	<i>VICE-DOYEN / DSSE</i>
3	NWAGA Dieudonné M.	Professeur	En poste

4	ASSAM ASSAM Jean Paul	Maître de Conférences	En poste
5	BOYOMO ONANA	Maître de Conférences	En poste
6	RIWOM Sara Honorine	Maître de Conférences	En poste
7	SADO KAMDEM Sylvain Leroy	Maître de Conférences	En poste

8	BODA Maurice	Chargé de Cours	En poste
9	BOUGNOM Blaise Pascal	Chargé de Cours	En poste
10	ESSONO OBOUGOU Germain G.	Chargé de Cours	En poste
11	NJIKI BIKOÏ Jacky	Chargée de Cours	En poste
12	TCHIKOUA Roger	Chargé de Cours	En poste
13	ESSONO Damien Marie	Assistant	En poste
14	LAMYE Glory MOH	Assistant	En poste
15	MEYIN A EBONG Solange	Assistante	En poste

16	NKOUDOU ZE Nardis	Assistant	En poste
17	SAKE NGANE Carole Stéphanie	Assistante	En poste
18	TOBOLBAÏ Richard	Assistant	En poste

**9. DEPARTEMENT DE PYSIQUE(PHY) (40)**

1	BEN- BOLIE Germain Hubert	Professeur	En poste
2	DJUIDJE KENMOE épouse ALOYEM	Professeur	En poste
3	EKOBENA FOU DA Henri Paul	Professeur	<i>Vice-Recteur. UN</i>
4	ESSIMBI ZOBO Bernard	Professeur	En poste
5	KOFANE Timoléon Crépin	Professeur	En poste
6	NANA ENGO Serge Guy	Professeur	En poste
7	NANA NBENDJO Blaise	Professeur	En poste
8	NDJAKA Jean Marie Bienvenu	Professeur	Chef de Département
9	NJANDJOCK NOUCK Philippe	Professeur	En poste
10	NOUAYOU Robert	Professeur	En poste
11	PEMHA Elkana	Professeur	En poste
12	TABOD Charles TABOD	Professeur	Doyen FS Univ/Bda
13	TCHAWOUA Clément	Professeur	En poste
14	WOAFO Paul	Professeur	En poste
15	ZEKENG Serge Sylvain	Professeur	En poste

16	BIYA MOTTO Frédéric	Maître de Conférences	DG/HYDRO Mekin
17	BODO Bertrand	Maître de Conférences	En poste
18	ENYEGUE A NYAM épse BELINGA	Maître de Conférences	En poste
19	EYEBE FOU DA Jean sire	Maître de Conférences	En poste
20	FEWO Serge Ibraïd	Maître de Conférences	En poste
21	HONA Jacques	Maître de Conférences	En poste
22	MBANE BIOUELE César	Maître de	En poste

		Conférences	
23	MBINACK Clément	Maître de Conférences	En poste
24	NDOP Joseph	Maître de Conférences	En poste
25	SAIDOU	Maître de Conférences	MINRESI
26	SIEWE SIEWE Martin	Maître de Conférences	En poste
27	SIMO Elie	Maître de Conférences	En poste
28	VONDOU Derbetini Appolinaire	Maître de Conférences	En poste
29	WAKATA née BEYA Annie	Maître de Conférences	<i>Directeur/ENS/Uyi</i>

30	ABDOURAHIMI	Chargé de Cours	En poste
31	CHAMANI Roméo	Chargé de Cours	En poste
32	EDONGUE HERVAIS	Chargé de Cours	En poste
33	FOUEDJIO David	Chargé de Cours	Chef Cell. MINADER
34	MBONO SAMBA Yves Christian U.	Chargé de Cours	En poste
35	MELI'I Joelle Larissa	Chargée de Cours	En poste
36	MVOGO ALAIN	Chargé de Cours	En poste
37	OBOUNOU Marcel	Chargé de Cours	DA/Univ Inter Etat/Sangmalima
38	WOULACHE Rosalie Laure	Chargée de Cours	En poste

39	AYISSI EYEBE Guy François Valérie	Assistant	En poste
40	TEYOU NGOUPOU Ariel	Assistant	En poste

**10- DÉPARTEMENT DE SCIENCES DE LA TERRE (ST) (43)**

1	BITOM Dieudonné	Professeur	<i>Doyen / FASA / UDs</i>
2	FOUATEU Rose épse YONGUE	Professeur	En poste
3	NDAM NGOUPAYOU Jules-Remy	Professeur	En poste
4	NDJIGUI Paul Désiré	Professeur	Chef de Département
5	NGOS III Simon	Professeur	En poste

6	NKOUMBOU Charles	Professeur	En poste
7	NZENTI Jean-Paul	Professeur	En poste

8	ABOSSOLO née ANGUE Monique	Maître de Conférences	<i>Vice-Doyen / DRC</i>
9	BISSO Dieudonné	Maître de Conférences	<i>Directeur/Projet Barrage Memve'ele</i>
10	EKOMANE Emile	Maître de Conférences	En poste
11	GANNO Sylvestre	Maître de Conférences	En poste
12	GHOGOMU Richard TANWI	Maître de Conférences	CD/Uma
13	MOUNDI Amidou	Maître de Conférences	<i>CT/ MINIMDT</i>
14	NGUEUTCHOUA Gabriel	Maître de Conférences	CEA/MINRESI
15	NJILAH Isaac KONFOR	Maître de Conférences	En poste
16	NYECK Bruno	Maître de Conférences	En poste
17	ONANA Vincent Laurent	Maître de Conférences	<i>Chef service Maintenance &amp; du Matériel/UYII</i>
18	TCHAKOUNTE J. épouse NOUMBEM	Maître de Conférences	<i>Chef.cell / MINRESI</i>
19	TCHOUANKOUE Jean-Pierre	Maître de Conférences	En poste
20	TEMDJIM Robert	Maître de Conférences	En poste
21	YENE ATANGANA Joseph Q.	Maître de Conférences	<i>Chef Div. /MINTP</i>
22	ZO'O ZAME Philémon	Maître de Conférences	<i>DG/ART</i>

23	ANABA ONANA Achille Basile	Chargé de Cours	En poste
24	BEKOA Etienne	Chargé de Cours	En poste
25	ELISE SABABA	Chargé de Cours	En poste
26	ESSONO Jean	Chargé de Cours	En poste



27	EYONG JOHN TAKEM	Chargé de Cours	En poste
28	FUH Calistus Gentry	Chargé de Cours	<i>Sec. D'Etat/MINMIDT</i>
29	LAMILLEN BILLA Daniel	Chargé de Cours	En poste
30	MBESSE CECILE OLIVE	Chargée de Cours	En poste
31	MBIDA YEM	Chargé de Cours	En poste
32	METANG Victor	Chargé de Cours	En poste
33	MINYEM Dieudonné-Lucien	Chargé de Cours	<i>CD/Uma</i>
34	NGO BELNOUN Rose Noël	Chargée de Cours	En poste
35	NGO BIDJECK Louise Marie	Chargée de Cours	En poste
36	NOMO NEGUE Emmanuel	Chargé de Cours	En poste
37	NTSAMA ATANGANA Jacqueline	Chargé de Cours	En poste
38	TCHAPTCHET TCHATO De P.	Chargé de Cours	En poste
39	TEHNA Nathanaël	Chargé de Cours	En poste
40	TEMGA Jean Pierre	Chargé de Cours	En poste

41	FEUMBA Roger	Assistant	En poste
42	MBANGA NYOBE Jules	Assistant	En poste

### Répartition chiffrée des Enseignants de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I

NOMBRE D'ENSEIGNANTS					
DÉPARTEMENT	Professeurs	Maîtres de Conférences	Chargés de Cours	Assistants	Total
BCH	8 (01)	14 (10)	13 (05)	3 (02)	<b>38 (18)</b>
BPA	15 (01)	8 (06)	18 (05)	05 (02)	<b>46 (14)</b>
BPV	07 (01)	10 (01)	9 (06)	07 (01)	<b>33 (9)</b>
CI	10 (01)	10 (02)	10 (02)	03 (0)	<b>33 (5)</b>
CO	6 (0)	21 (05)	05 (02)	02 (0)	<b>34(7)</b>
IN	2 (0)	1 (0)	14 (01)	08 (01)	<b>25 (2)</b>
MAT	2 (0)	8 (0)	15 (01)	05 (02)	<b>30 (3)</b>
MIB	3 (0)	4 (02)	05 (01)	06 (02)	<b>18 (5)</b>
PHY	15 (0)	14 (02)	09 (03)	02 (0)	<b>40 (5)</b>
ST	7 (1)	15 (01)	18 (05)	02 (0)	<b>42(7)</b>

<b>Total</b>	<b>75 (5)</b>	<b>105 (29)</b>	<b>116 (31)</b>	<b>43 (10)</b>	<b>339 (75)</b>
Soit un total de		<b>339 (75)</b>	dont :		
- Professeurs		<b>75 (5)</b>			
- Maîtres de Conférences		<b>105 (29)</b>			
- Chargés de Cours		<b>116 (31)</b>			
- Assistants		<b>43 (10)</b>			
( ) = Nombre de Femmes		<b>75</b>			

## **DEDICACE**

*À mes regrettés  
parents,  
MBASSI GABRIEL et  
BOHÉNDE  
MADELEINE.*

# REMERCIEMENTS

A l'issue de la rédaction de cette recherche, je suis convaincue que la thèse est loin d'être un travail solitaire. En effet, je n'aurais jamais pu réaliser ce travail doctoral sans le soutien d'un grand nombre de personnes qui m'ont permis de progresser dans cette phase délicate de « l'apprenti-chercheur ».

- Tout d'abord, j'aimerais exprimer mes remerciements particuliers à **mon Seigneur JESUS**, IL est toute ma vie, le socle et le ressort de toutes mes actions, l'auteur de la réalisation de mes rêves, et de ma mission sur la terre. « Je peux tout faire par le Christ qui me fortifie » (Phil. 4 :13). Merci pour la santé et tous les moyens nécessaires à la réalisation de cette thèse. A toi soit toute la gloire.
- **A Monsieur le Professeur MBACHAM Wilfred**, Professeur Titulaire au Département de Biochimie de l'Université de Yaoundé I, et responsable du Laboratoire de Sécurité Sanitaire des Aliments (Centre de Biotechnologie de Nkolbisson, Université de Yaoundé I), Superviseur de mes travaux de thèse qui m'a fait confiance en acceptant de diriger cette thèse. Veuillez trouver, Monsieur, dans ces mots, l'expression de mes sincères et vifs remerciements, et de mon profond respect.
- Je voudrais également exprimer ma sincère gratitude à mon co-directeur de cette thèse, le **Dr. NDINDENG SALI ATANGA**, Maître de Recherche et Chercheur Principal Associé à AfricaRice (Centre du Riz pour l'Afrique) qui a su me témoigner du début à la fin de cette thèse sa confiance en me proposant ce sujet certes difficile mais passionnant. Il a dirigé et suivi de très près ce travail de recherche malgré ses diverses occupations. Merci pour vos conseils, votre expertise, de me donner une direction technique en cas de besoin.
- J'adresse de chaleureux remerciements à mon co-encadrant de thèse, **Pr. MERCY BIH ACHU épouse LOH**, Maître de Conférences au Département de Biochimie de la Faculté des Sciences à l'Université de Yaoundé I, pour son attention de tout instant sur mes travaux, pour ses conseils avisés et son écoute. J'ai pris un grand plaisir à travailler avec vous Madame.
- **Au Professeur Jean-Claude MBANYA**, Directeur du Centre de Biotechnologie, qui m'a donné l'opportunité de mener à bien ma thèse dans ce prestigieux centre de recherche de l'Université de Yaoundé I. Je vous remercie.

- **A Monsieur le Professeur MOUNDIPA FEWOU Paul, le Chef de Département de Biochimie**, Merci et au personnel du Département de Biochimie de l'Université de Yaoundé I pour leur assistance, leurs conseils et leur disponibilité tout au long de cette thèse.
- Plus important encore, je souhaite exprimer ma plus profonde gratitude à mon cher époux et confident, **M. ZAMBO Richard Pierre**, pour son soutien quotidien indéfectible et son enthousiasme contagieux à l'égard de mes travaux comme de la vie en général. Merci d'être toujours là pour moi en toute circonstance.
- Je souhaite exprimer mes remerciements à mes enfants **MBASSI ZAMBO Yohan Gabriel**, **AMOMBO ZAMBO Mickaëlle Richeline** et **BOHENDE ZAMBO Divine Madeleine** pour leur amour inconditionnel malgré le fait que je suis toujours absente pour des raisons professionnelles et / ou des études.
- Je tiens à remercier le soutien et l'assistance de **l'Institut de Recherche et de Développement Agricoles (IRAD)** pour la fourniture d'installations permettant de mener des recherches qui ont abouti aux résultats présentés dans cette thèse.
- Je voudrais remercier tout particulièrement **les membres du jury** pour leur disponibilité à évaluer ce travail.
- Je souhaite exprimer ma gratitude au **Dr. NGOME Francis**. Merci pour vos précieux commentaires sur mon travail. Merci pour l'intérêt que vous portez à mon projet et à mes progrès.
- Merci à **tous les étudiants et Chercheurs** des différents laboratoires du Centre de Biotechnologie de l'Université de Yaoundé I pour leur support, commentaires utiles sur mes recherches et sur le temps que nous avons passé ensemble.
- **A tous mes collègues** de l'Institut de recherche et de développement agricoles (IRAD), Merci à tous pour votre collaboration et votre soutien moral.
- Je souhaite exprimer ma plus profonde gratitude à **toute la grande famille MBASSI et NTONDE**, pour vos encouragements et votre soutien. Merci à tous.
- Je souhaite adresser mes remerciements à toutes les autres personnes que je n'ai pas mentionnées individuellement ici. Je vous serai reconnaissante à jamais. Tout cela ne serait jamais passé sans que vous soyez là.

## TABLE DES MATIERES

<b>DEDICACE .....</b>	<b>.....</b>
<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>I</b>
<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>III</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>X</b>
<b>Liste des annexes .....</b>	<b>XII</b>
<b>Liste des abréviations et acronymes .....</b>	<b>XIII</b>
<b>Résumé .....</b>	<b>XVII</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I. REVUE DE LA LITTERATURE .....</b>	<b>5</b>
<b>I.1. ENERGIES RENOUVELABLES : DEFINITIONS, RESSOURCES ET EXPLOITATION.....</b>	<b>5</b>
<b>I.2. GENERALITES SUR LA BIOMASSE .....</b>	<b>6</b>
<b>I.2.1. Définition et composition de la biomasse .....</b>	<b>7</b>
I.2.1.1. Définition de la biomasse .....	7
I.2.1.2. Composition élémentaire de la biomasse.....	7
<b>I.2.2. Estimation de la quantité de résidus de biomasse .....</b>	<b>7</b>
<b>I.3. GENERALITES SUR LA COQUE DE RIZ ET SES UTILISATIONS</b>	<b>8</b>
<b>I.3.1. Généralités sur le riz .....</b>	<b>8</b>
I.3.1.1. Structure du grain de paddy .....	9

I.3.1.2. Caractéristiques de la balle de riz .....	10
<b>I.4. DENSIFICATION DE LA BIOMASSE .....</b>	<b>13</b>
<b>I. 4.1. Principe de la densification.....</b>	<b>13</b>
<b>I. 4.2. Etudes antérieures de densification de biomasse.....</b>	<b>13</b>
<b>I. 4.3. Variables influençant la densification de la biomasse .....</b>	<b>14</b>
I. 4.3.1. Variables liées au processus .....	14
I. 4.3.2. Variables liées à la matière première / matériau.....	16
<b>I.5. VOIES DE VALORISATION DE LA BIOMASSE .....</b>	<b>17</b>
<b>1. 5.1. La pyrolyse .....</b>	<b>19</b>
<b>1. 5.2. La gazéification .....</b>	<b>19</b>
<b>1. 5.3. La combustion .....</b>	<b>19</b>
<b>I .6. GAZEIFICATION DE LA BIOMASSE.....</b>	<b>19</b>
<b>I.6.1. Définition de la gazéification .....</b>	<b>19</b>
<b>I. 6.2. Mécanismes de la gazéification.....</b>	<b>20</b>
<b>I. 6.3. Type de gazéificateurs.....</b>	<b>21</b>
I. 6.3.1. Gazéificateurs à lit fixe .....	22
I.6.3.2. Lit fluidisé.....	24
1.6.3.3. Réacteurs à lit entraîné.....	25
<b>I.7. ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV) .....</b>	<b>25</b>
<b>I.7.1. Définition.....</b>	<b>26</b>
<b>I. 7.2. Normalisation et phases d'une ACV .....</b>	<b>27</b>
<b>I. 7.3. Limites de l'ACV .....</b>	<b>28</b>
<b>I.8. TOXICITE DES COMBUSTIBLES POUR LA CUISSON .....</b>	<b>29</b>
<b>I.8.1. Toxicité liée à l'environnement de la cuisine.....</b>	<b>30</b>
I. 8.1.1. Types de feux.....	30
I.8.1.2. Composition de fumées .....	32

<b>I. 8.2. Produits toxiques communs de combustion .....</b>	<b>32</b>
<b>I. 8.3. Toxicité liée aux aliments cuits .....</b>	<b>33</b>
<b>CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES .....</b>	<b>1</b>
<b>II.1. Production et caractérisation des briquettes.....</b>	<b>1</b>
<b>II.1.1. Production des briquettes à base de coques de riz.....</b>	<b>1</b>
II.1.1.1. Matériel végétal.....	1
II.1.1.2. Liants utilisés.....	1
II.1.1.3. Différents types de briquettes produits .....	3
II.1.1.4. Construction et description de la briqueteuse.....	3
II.1.1.5. Préparation des différentes composantes de briquettes .....	5
II.1.1.6. Les étapes de fabrication des différents échantillons de briquettes .....	5
II.1.1.7. Optimisation de la dureté des briquettes .....	7
<b>II.1.2. Caractérisation des briquettes .....</b>	<b>7</b>
II.1.2.1. Paramètres physiques et physicochimiques.....	8
II.1.2.2. Tests de combustion des différents échantillons de briquettes.....	10
II.1.2.3. Paramètres de combustion des différents échantillons de briquettes .....	11
<b>II.2. Comparaison entre des propriétés de combustion des briquettes à base de coque de riz, les gazéificateurs à coque de riz pure et les combustibles traditionnels .....</b>	<b>16</b>
II.2.1. Les foyers utilisés .....	16
II.2.2. Métrique thermique.....	19
II.2.3. Détermination de la température de la flamme .....	19
II.2.4. Évaluation des foyers par l'utilisateur final .....	19
<b>II.3. Analyse du Cycle de Vie (ACV) des gazéificateurs à coques de riz .....</b>	<b>20</b>
II.3.1. Caractérisation des paramètres de construction et d'utilisation des gazéificateurs .....	21



II.3.2. Analyse des flux gazeux (FG) et des matières particulaires (MP) issus des gazéificateurs à coques de riz pures.....	22
II.3.3. Méthodologie d'évaluation de l'Analyse Cycle de Vie (ACV) .....	23
II.3.3.1. Définition des objectifs .....	23
<b>II.4. Evaluation de la toxicité <i>in vivo</i> des gazéificateurs à coques de riz .....</b>	<b>24</b>
II .4.1. Traitement des rats dans l'animalerie .....	24
II .4.1.1. Réception et acclimatation des rats .....	24
II.4.1.2. Alimentation des rats.....	25
II.4.2. Préparation de l'échantillon d'eau .....	25
II.4.3. Evaluation de la toxicité .....	27
II.4.4. Dosage des paramètres hématologiques, biochimiques et histopathologique.....	28
<b>II.5. Analyse statistique des données.....</b>	<b>42</b>
<b>CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>44</b>
<b>III.1. RESULTATS .....</b>	<b>44</b>
<b>III.1.1. Caractérisation de briquettes.....</b>	<b>44</b>
III.1.1.1. Vitesse de production et densités des briquettes.....	44
III.1.1.2. Influence de quelques paramètres sur la dureté des briquettes.....	44
III.1.1.3. Caractéristiques des briquettes fabriquées à partir de mélanges de coque et de son et additionnées aux liants .....	46
<b>III.1.2. Comparaison entre des propriétés de combustion des briquettes à base de coque de riz, les coques de riz pures et les combustibles traditionnels.....</b>	<b>50</b>
III.1.2.1. Métriques thermiques des différents gazéificateurs.....	50
III.1.2.2. Température de la flamme .....	52
III.1.2.3. Evaluation des foyers par l'utilisateur final.....	53
<b>III.1.3. Evaluation de l'ACV des foyers à coques de riz.....</b>	<b>55</b>

<b>III.1.3.1. Réalisation de l'inventaire du cycle de vie (ICV) .....</b>	<b>55</b>
III.1.3.1.1. Inventaire du flux entrant .....	55
III.1.3.1.2. Inventaire du flux sortant de la gazéification des foyers.....	56
<b>III.1.3.2. Evaluation de l'impact des gazéificateurs à coques de riz sur l'environnement et la santé.....</b>	<b>59</b>
III.1.3.2.1. Energie Consommée le long du cycle de vie .....	59
III.1.3.2.2. Facteurs de caractérisation de l'impact sur l'environnement et la santé .....	59
<b>III.1.4. Evaluation de la toxicité <i>in vivo</i> des coques de riz utilisée comme combustibles chez les rats.....</b>	<b>61</b>
<b>III.1.4.1. Toxicité aiguë .....</b>	<b>61</b>
III.1.4.1.1. Détermination de la DL50.....	61
III.1.4.1.2. Évaluation des paramètres comportementaux.....	63
III.1.4.1.3. Suivi du poids corporel et du poids relatif des organes.....	63
<b>III.1.4.2. Toxicité sub-chronique.....</b>	<b>65</b>
III.1.4.2.1. Évaluation des paramètres comportementaux.....	65
III.1.4.2.2. Evolution de la croissance pondérale et du poids relatif des organes .....	65
III.1.4.2.3. Evaluation des paramètres biochimiques, hématologique et histologique.....	67
<b>III.2. DISCUSSION.....</b>	<b>76</b>
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>86</b>
<b>PERSPECTIVES .....</b>	<b>87</b>
<b>REFERENCES .....</b>	<b>88</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>XXXVII</b>

## Liste des tableaux

Tableau I : Rapport résidus sur production (RRP) des cultures agricoles et forestières.....	8
Tableau II: Composition de la balle riz.....	11
Tableau III: Propriétés sélectionnées de la balle de riz par rapport à d'autres combustibles.....	12
Tableau IV: Composants nutritionnels de la coque de riz .....	12
Tableau V: Caractéristiques de trois voies de valorisation thermochimique (Siedlecki et al., 2011) .....	18
Tableau VI : Analyse ultime (% matière sèche) et valeur calorifique de la coque de riz (Jenkins et al., 1998) .....	2
Tableau VII: Types de briquettes à base de coque de riz à produire. ....	3
Tableau VIII: Optimisation Sequentielle de la dureté des briquettes à base de coque de riz .....	7
Tableau IX: Description des différents gazéificateurs à coques de riz .....	18
Tableau X: Les critères d'évaluation des foyers et leurs descripteurs.....	20
Tableau XI: Mode opératoire du dosage de l'acide urique.....	34
Tableau XII: Protocole de dosage des protéines .....	35
Tableau XIII: Protocole de dosage de la bilirubine totale .....	36
Tableau XIV: Protocole d'une batterie de déparaffinage .....	38
Tableau XV: Protocole de coloration à l'hématoxyline et à l'éosine .....	41
Tableau XVI: Effet principal et interaction des facteurs qui affectent la dureté des briquettes de balle de riz à pression constante.....	45
Tableau XVII: Effet de combinaisons des facteurs sur la dureté des briquettes à base des coques et son de riz. ....	46
Tableau XVIII: Variation des caractéristiques des types de briquettes brûlés dans un foyer à briquettes Salmar par rapport au charbon de bois.....	49
Tableau XIX: Les métriques thermiques des différents gazéificateurs .....	51
Tableau XX: Critères d'évaluation des foyers par les utilisateurs finaux. ....	54
Tableau XXI: Les intrants (input) et sortants (output) pour la production et l'utilisation des gazéificateurs. ....	56
Tableau XXII: Impact de la production et de l'utilisation des gazéificateurs sur la santé humaine et l'environnement. ....	62

Tableau XXIII : Effets de l'eau distillée bouillie à la coque de riz sur quelques paramètres physiologiques chez les rats au cours des 3 heures ainsi que des 14 jours qui suivent l'administration. .... 63

Tableau XXIV: Variation de quelques paramètres hématologique des animaux mâles et femelles traités à différentes doses d'eau bouillie aux coques de riz ..... 72

## Liste des figures

Figure 1 : Structure du grain de riz (Tauon et Panchapan, 2002).....	10
Figure 2 : Différents produits à chaque étape d’usinage du riz paddy (Bhattacharya <i>et al.</i> , 1999) .....	10
Figure 3 : Représentation schématique de phénomènes thermochimiques au cours de la gazéification (Reed et Das, 1988).....	21
Figure 4: Schéma d’un gazéificateur à co-courant (Source : Basu, 2010).....	23
Figure 5: Schéma d’un gazéificateur à contre-courant (Source : Basu, 2010) .....	24
Figure 6: Les phases d'une Analyse de Cycle de Vie (ISO 14044, 2006) .....	27
Figure 7 : Coques de riz et mélange coque-son de riz .....	1
Figure 8 : Différents liants utilisés dans la production des briquettes : a= son de riz ; b= Fibre de noix palme ; c= Boue issue de l’extraction de noix de palm ; d= Argile.....	3
Figure 9 : Dessin technique de la briqueteuse .....	4
Figure 10 : Diagramme schématique du processus de production des briquettes .....	6
Figure 11 : Combustion des briquettes dans le foyer SALMAR .....	11
Figure 12 : Double thermomètre traçable (VWR-USA) équipé de sondes thermiques.....	12
Figure 13 : Gazéificateurs à coques de riz .....	16
Figure 14 : Foyers à combustibles traditionnels .....	19
Figure 15 : Schéma représentatif des éléments entrants et sortants du système d’utilisation des gazéificateurs .....	22
Figure 16: Analyseur d’émissions portable Testo350® et DustMate® pour évaluer la composition des fumées en flux gazeux et matière particulaire respectivement .....	23
Figure 17 : Présentation schématique de la configuration de l'eau bouillante avec le foyer PO150. .....	26
Figure 18 : Représentation de l’essai utilisant l’appareillage l’hématomètre.....	29
Figure 19 : Schéma des différentes étapes pour la réalisation des coupes histologiques. ....	41
Figure 20 : Briquette à base de coque et de son de riz.....	44
Figure 21 : Echantillons de briquettes (coque–son) consolidées par différents liants.....	47
Figure 22: Température de la flamme de différents types de briquettes et de charbon de bois lors de la combustion dans un foyer à briquettes Salmar pendant une période de 55 min. ....	50

Figure 23: Température de la flamme de différents types de gazéificateurs et des briquettes CS du foyer SALMAR .....	52
Figure 24: Variation des flux gazeux émis par différents gazéificateurs de balles de riz (a) dans une pièce fermée et (b) dans une pièce ouverte. ....	57
Figure 25: Variation des matières particulaires émises par différents gazéificateurs de balles de riz (a) dans une pièce fermée et (b) dans une pièce ouverte. ....	58
Figure 26: Demande d'énergie Cumulative pour différents types de gazéificateurs.....	60
Figure 27 : Evolution pondérale des rats des groupes témoin et test.....	64
Figure 28: Poids relatif des organes des groupes de rats traités et témoins .....	64
Figure 29: Evolution pondérale des rats mâles (A) et femelles (B) traités à différentes doses d'eau bouillie aux coques de riz.....	65
Figure 30: Effets de l'eau bouillie aux coques de riz sur le poids relatif des organes de détoxification des rats mâles (A) et femelles (B).....	66
Figure 31 : Effets de l'eau bouillie aux coques de riz sur l'activité de l'enzyme ALAT des rats mâles (A) et femelles (B).....	67
Figure 32: Effets de l'eau bouillie aux coques de riz sur l'activité de l'enzyme ASAT des rats mâles (A) et femelles (B).....	68
Figure 33: Effets de l'eau bouillie aux coques de riz sur le taux sérique de créatinine des rats mâles (A) et femelles (B).....	69
Figure 34: Effets de l'eau bouillie aux coques de riz sur l'acide urique des rats mâles (A) et femelles (B).....	69
Figure 35: Effets de l'eau bouillie aux coques de riz sur le taux bilirubine sérique des rats mâles (A) et femelles (B) traités .....	70
Figure 36: Effets de l'eau bouillie aux coques de riz sur le taux de protéines totales des rats mâles (A) et femelles (B) traités .....	71
Figure 37: Microphotographies du foie des rats (Hématoxyline-éosine X 100). X : mâles et Y : femelles. ....	73
Figure 38: Microphotographies du rein des rats (Hématoxyline-éosine X 200). X : mâles et Y : femelles. ....	74
Figure 39: Microphotographie du cœur des rats (Hématoxyline-éosine X 200). X : mâles et Y : femelles. ....	75

## **Liste des annexes**

Annexe 1 : Fiches techniques pour le test d'ébullition de l'eau .....	XXXVII
Annexe 2 : Courbes d'étalonnage.....	XLIV
Annexe 3 : Liste des publications issues de la thèse.....	XLVI

## Liste des abréviations et acronymes

<b>ACV :</b>	Analyse de Cycle de Vie
<b>ALAT :</b>	ALanine Amino Transférase
<b>ASAT :</b>	ASpartate Amino Transférase
<b>ASS :</b>	Afrique Sub-Saharienne
<b>CCA :</b>	Charbon de Coque de riz issu de la gazéification et Argile
<b>CCMH :</b>	Concentration Corpusculaire Moyenne en Hémoglobine
<b>CFC</b>	Chlorofluorocarbures
<b>CSF :</b>	Coque–Son de riz et Fibre de noix palme
<b>CS :</b>	Coque–Son de riz
<b>CSB :</b>	Coque–Son de riz et Boue de noix palme
<b>CO:</b>	Monoxyde de Carbone
<b>CO<sub>2</sub>:</b>	Dioxyde de Carbone
<b>DCB :</b>	DiChloro-Benzène
<b>DEC :</b>	Demande d'Energie Cumulée
<b>EB :</b>	Eau bouillie
<b>DNPH :</b>	Dinitro-phényl hydrazine
<b>FAO:</b>	Food and Agricultural Organization
<b>FG :</b>	Flux gazeux
<b>GB :</b>	Globules blancs
<b>GES :</b>	Gaz à Effet de Serre
<b>GR :</b>	Globules Rouges



<b>GRA :</b>	Granulocytes
<b>HCT :</b>	Hématocrite
<b>HGB :</b>	Hémoglobine
<b>HHV:</b>	Higher Heating Value
<b>IRAD:</b>	Institut de Recherche Agricole pour le Développement
<b>IRRI:</b>	International Rice Research Institute
<b>ISO :</b>	International Standardization Organization
<b>HAP:</b>	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
<b>CNH :</b>	Cyanure d'hydrogène
<b>LHV:</b>	Lower Heating Value
<b>LYM :</b>	Lymphocytes
<b>M :</b>	Mayon
<b>MON :</b>	Monocytes
<b>MP :</b>	Matière Particulaire
<b>MP1 :</b>	Particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 1µm
<b>MP2.5:</b>	Particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 2,5 µm
<b>MPa :</b>	Méga Pascal
<b>MS :</b>	Méthode de Séchage
<b>MW:</b>	Mega Watts
<b>N:</b>	Azote
<b>NO:</b>	Monoxyde d'azote
<b>NOx:</b>	Oxydes d'azote

<b>OCDE:</b>	Organisation de Coopération et de Développement Économiques
<b>OMS :</b>	Organisation Mondiale de la Santé
<b>P :</b>	Phosphore
<b>Pc :</b>	poids corporel
<b>PCW:</b>	Palm nuts shell-Charcoal-Wood
<b>PLT</b>	Plaquette
<b>PO:</b>	Paul Olivier
<b>PO150:</b>	Paul Olivier avec 150 cm de diamètre
<b>PO250:</b>	Paul Olivier avec 250 cm de diamètre
<b>R:</b>	Rua
<b>RCS :</b>	Ratio Coque – Son
<b>SAT :</b>	Satellite
<b>SBC:</b>	Salmar Briquette-Charcoal
<b>SO<sub>2</sub>:</b>	Dioxyde de Soufre
<b>SPSS:</b>	Statistical Package for the Social Sciences
<b>TCC :</b>	Test de Cuisson Contrôlée
<b>TE :</b>	Température de l'Eau
<b>TEE:</b>	Test d'Ébullition d'Eau
<b>TGMH :</b>	Taux Globulaire Moyen en Hémoglobine
<b>TP :</b>	Taille des Particules
<b>TRC:</b>	Tripod-Charcoal
<b>TSF:</b>	Three-Stone Fireplace

**VGM :** Volume Globulaire Moyen

**V:** Viet

**WHO :** World Health Organization

## Résumé

La présente étude a été menée dans le but de garantir l'utilisation efficace des sous-produits du riz comme source d'énergie. Différentes briquettes ont été produites en variant quatre paramètres : le ratio coque – son de riz (RCS) (1 :1, 1 :2, 1 :0, 0 :1, 2 :1), la méthode de séchage (MS) (au soleil et au four), la taille des particules (TP) (fine, moyenne, large) et la température de l'eau (TE) (97 °C et 28 °C). Les protocoles de test de cuisson contrôlée (CCT) et le Test Ebullition d'Eau (TEE) ont été utilisés pour l'évaluation des performances des foyers utilisant les briquettes produites à d'autres foyers à coques de riz pures (R : Rua ; V : Viet ; PO150 : Paul Olivier 150 ; PO250 : Paul Olivier 250 ; M : Mayon) et aux combustibles traditionnellement utilisés. Une évaluation du cycle de vie et la de toxicité *in vivo* des coques de riz comme combustibles pour la cuisson a été menée chez des rats *Wistar*. Les résultats ont montré que l'utilisation de son de riz ou d'autres formes de liants était nécessaire pour produire des briquettes de coque de riz d'une dureté suffisante. De façon générale, les briquettes fabriquées à partir de taille fine, de l'eau chaude, séchées au soleil pendant 21 jours et indépendamment du RCS avaient des valeurs de dureté moyenne plus élevées. Les briquettes CSF (Coque–Son de riz et Fibre de noix palme) et CS (Coque–Son de riz) produites ont présenté les meilleurs indices de qualité notamment facilité d'allumage, vitesse de combustion, consommation spécifique de combustible et température de flamme comparé aux briquettes CSB (Coque–Son de riz et Boue de noix de palme) et CCA (Charbon de Coque de riz issu de la gazéification et Argile). Les gazéificateurs assistés par ventilateur (R, V et PO) ont de meilleurs indices thermiques comparés à M à ventilation naturelle et aux foyers à combustibles traditionnels. La PO150 a fourni les meilleurs indices en termes de ressources, d'impact humain et environnemental. Pour l'étude de toxicité, l'eau bouillie administrée à des doses de 0,5, 1 et 2 ml / 100 g a conduit à une différence significative dans certains paramètres tels que la créatinine chez les males (71,81 mg/ dL), l'acide urique (2,75 mg/ dL), la bilirubine totale (0,08 mg/ dL), et granulocytes ( $2,70 \cdot 10^3 / \mu\text{L}$ ) chez les femelles par rapport aux témoins (64,16 mg/ dL, 2,25 mg/ dL, 0,19 mg/ L, et  $1,80 \cdot 10^3 / \mu\text{L}$  respectivement) ; mais ces valeurs se situaient dans la plage normale de cette espèce animale en santé. La coque de riz utilisée comme combustible dans le gazéificateur de type PO150 permet d'obtenir un aliment cuit plus sûr et non toxique.

**Mots clés** : coque de riz, briquettes, combustible, gazéification, combustion, analyse du cycle de vie, toxicité *in vivo*

## Abstract

This study was conducted to ensure the efficient use of rice by-products and to increase the productivity of rice value chain. Different types of briquettes were produced by varying four parameters namely: The Husk: Bran ratio (1: 1, 1: 2, 1: 0, 0: 1, 2: 1), the drying method (MS) (sun and oven), the particle size (fine, medium, large) and the water temperature (97 ° C for boiled water, 28 ° C for water at room temperature) to determine the combination that would produce optimal performance of briquettes. The Controlled Cooking Test (CCT) and the Water Boiling Test (WBT) protocols were used for benchmarking the performance of stoves using the briquettes produced in this study to other gasification stoves using pure rice husks (R: Rua; VRHS: Viet; PO150: Paul Olivier 150; PO250: Paul Olivier 250 and M: Mayon) and traditional fuels. A Life Cycle Assessment (LCA) of rice husk gasifiers was evaluated by simulation using SimaPro software, evaluation of *in vivo* toxicity of rice husks was carried out in *Wistar* rats. The results showed that the use of binders or other forms of binders was necessary to produce rice husk briquettes of sufficient hardness. The husk–bran–palm press fiber (HBF) and husk–bran only (HBO) briquettes showed the best fuel quality in terms of hardness, ease of ignition, heat value, ash content, burning rate, specific fuel consumption and flame temperature compared to briquettes husk–bran–palm press sludge (HBS) and husk–biochar–clay (HBC). The fan-assisted gasifiers (R, V and PO) had better thermal indices compared to naturally ventilated M and traditional fuel burning fireplaces. For the sub-chronic toxicity study, boiled water at doses of 0.5, 1 and 2 ml/100 g showed significant difference ( $p \leq 0.05$ ) in some parameters such as creatinine in males (71.81 mg/dL), uric acid (2.75 mg/dL) and total bilirubin (0.08 mg/dL), and granulocytes ( $2.70 \cdot 10^3/\mu\text{L}$ ) in females compared to Control group (64.16 mg/dL, 2.25 mg/dL, 0.19 mg/L, and  $1.80 \cdot 10^3/\mu\text{L}$  for each parameter respectively), but data were below the threshold levels to be considered to have toxic effects. In conclusion, these results on rice husks used as fuel were obtained in order to increase confidence in its safety for humans when used in household cooking.

**Key words:** rice husk, briquettes, fuel, gasification, combustion, life cycle analysis, *in vivo* toxicity

## INTRODUCTION

A l'échelle mondiale, la hausse des revenus ainsi que la croissance de la population mondiale de plus de 1,7 milliard de personnes, principalement dans les zones urbaines des économies en développement, mènent à une augmentation de la demande énergétique mondiale de plus d'un quart d'ici 2040 (AEI, 2018). Ce développement fulgurant touche tous les secteurs et plus particulièrement l'énergie. Le transport et l'industrie qui sont de grands consommateurs d'énergie fossile, sont responsables de 60 % des émissions de gaz à effet de serre. Cette énergie fossile consommée, représente plus de 87 % de toute l'énergie consommée en 2010 (Williams *et al.*, 2011). La demande journalière, qui ne cesse d'augmenter se situait aux alentours de 92,1 millions de barils de pétrole par jour en décembre 2013 pour atteindre 97,4 millions de barils par jour (mbj) en 2017, selon l'Agence internationale de l'énergie (AEI, 2018). Ce qui montre que les ressources fossiles ont été et demeurent des piliers du développement en raison de leur forte consommation dans presque tous les secteurs de développement (industrie, usages domestiques et transport). La principale conséquence qui en découle est l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre, qui a une conséquence négative sur le changement climatique actuel.

Par conséquent, une question fondamentale se pose : comment concilier progrès économique et social sans mettre en péril l'équilibre de la planète ? C'est pour apporter des réponses à cette question qu'est né le concept de développement durable. Un concept que l'on résume d'une phrase : "un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs" (Sylvie et Brahim, 2012).

Le recours à des sources d'énergie renouvelables demeure indispensable pour continuer à satisfaire les besoins énergétiques mondiaux tout en préservant l'environnement. En raison de l'importance de son gisement, la filière biomasse est une voie prometteuse. La majeure partie de l'énergie de la biomasse utilisée en Afrique subsaharienne repose sur un usage traditionnel dont l'efficacité énergétique est souvent faible et dans laquelle le bois occupe une place importante sans qu'il y ait une gestion durable de la source. Toutefois, cette alternative de production d'énergie reste aujourd'hui conditionnée par l'émergence de solutions technologiques permettant de transformer cette biomasse en plusieurs formes d'énergies finales incluant l'électricité, la chaleur ou les carburants tout en offrant une certaine flexibilité d'échelle de production pour tenir compte de la disponibilité variable de la ressource. Parmi les nombreuses ressources de

biomasse, les déchets agricoles sont un choix les plus prometteurs comme combustibles de cuisson (**Akintaro et al., 2017**). Les sous-produits de la transformation du riz sont l'un de ces déchets agricoles.

Le riz (*Oryza spp.*) est une source importante de calories en Afrique subsaharienne et la production devrait augmenter pour satisfaire la demande sans cesse croissante. Selon le Département américain de l'agriculture (USDA), la production de paddy en Afrique subsaharienne (ASS) en 2018 était de 26,5 millions de tonnes (**IRRI -RICESTAT, 2019**). En moyenne, le paddy comprend 72% de riz, 5 à 8% de son et 20 à 22% de coques (**Prasad et al., 2001**). Ainsi, le décorticage de 26,5 Mt de paddy générera environ 5,3 Mt de coques. La coque de riz est l'un des coproduits de la transformation du riz. Depuis la crise alimentaire de 2007-2008, les gouvernements africains et leurs partenaires de développement ont mis en place des programmes visant à accroître la production de riz avec une augmentation attendue des sous-produits de la rizerie. Les revenus tirés des sous-produits de la transformation du riz sont très faibles en ASS. Bien que le son de riz soit hautement nutritif (**Saunders et Betschart, 1979 ; Amish et al., 2003**), ce sous-produit est principalement utilisé en ASS uniquement comme ingrédient dans la production d'aliments pour le bétail. Cependant, lorsque le son est mélangé à la coque, comme c'est le cas pendant le décorticage dans des machines de type Engelberg, l'utilisation de ce produit comme aliment du bétail n'est pas souhaitable en raison de la forte teneur en silice dans sa constitution (**So et al., 2008**). Des études ont démontré le potentiel d'utilisation du son de riz dans la production de produits chimiques utiles (**Li et al., 2012**), d'huile (**Rohman, 2014**), de biodiesel (**Saravanan et al., 2007 ; Lin et al., 2009 ; Gunawan et al., 2011**), de fibres solubles (**Wan et al., 2012**), de composés phénoliques (**Pourali et al., 2010**), de charbon actif (**Suzuki et al., 2007**) et de boissons (**Faccin et al., 2009**). Contrairement au son, la majeure partie de la coque de riz produite en ASS est éliminée par combustion dans des champs ou abandonnée derrière des installations de traitement du riz. Cela pollue l'air et le sol et génère des gaz à effet de serre tels que le méthane (CH<sub>4</sub>), l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) et le monoxyde carbone (CO) (**Lim et al., 2012a ; Mai Thao et al., 2011**). Peu de technologies testées en ASS qui ajoutent de la valeur à la coque de riz incluent l'utilisation de la coque de riz comme biocarburant pour la production de chaleur et d'électricité (**Sookkumnerd et al., 2005; Goyal et al., 2008; Lim et al., 2012a**), la bio-sorption de métaux lourds à partir de solutions mono- et mixtes (**Krishnani et al., 2008; El-Shafey, 2010**), le vermicompostage destiné à la production



d'engrais organique (**Lim et al., 2012b**), comme aliment du bétail après un traitement physique, chimique ou biologique (**Vadiveloo et al., 2009**), et comme support pour la fermentation à l'état solide (**Kapilan et Arasaratnam, 2011**). La forte volatilité et la faible densité de la coque de riz ( $120 \text{ kg} / \text{m}^3$ ) entraînent une valeur calorifique inférieure par unité de masse de biomasse par rapport aux combustibles fossiles et peuvent poser des problèmes de manutention et de transport. Pour les ménages qui ne se trouvent pas à proximité d'installations de rizerie ou d'usines pouvant avoir besoin de coques ou de mélanges de coques-son, ces problèmes peuvent être surmontés par la densification (briquetage) sur les sites de production de coques.

Les technologies de fabrication de briquettes, telles que la fabrication de briquettes de presse par filière chauffée (**Toan et al., 2000 ; Ahiduzzaman et Islam, 2013**), la presse à simple piston et matrice (**Chin et Siddiqui, 2000 ; Bhattacharya et al., 2002**), et l'utilisation ultérieure de briquettes comme combustible est courant en Chine, en Inde, à Taiwan, en Thaïlande et au Vietnam. Bien que des investissements massifs aient été réalisés dans la fabrication de briquettes en ASS, très peu de succès commerciaux ont été documentés (**Mwampamba et al., 2013**). La qualité, la disponibilité, la commodité et le prix des briquettes semblent être des facteurs majeurs entravant l'adoption généralisée des technologies de briquetage dans la région. De plus, la dépendance vis-à-vis de l'importation de matériel, de pièces de rechange et du service après-vente limite l'ampleur de la production de briquettes et explique dans une large mesure la rareté de ses usines dans la région (**Grover et al., 1994 ; Mwampamba et al., 2013**).

La conversion thermochimique de la coque de riz pour produire de l'énergie thermique peut être obtenue par combustion directe, gazéification et pyrolyse (**Lim et al., 2012a**). Des systèmes de haute technologie existent pour chacun de ces processus, mais leur adoption et leur durabilité par les petits transformateurs en ASS restent à démontrer. Les foyers à gazéification de coques de riz seront plus utiles pour les ménages situés à proximité d'installations de rizerie (**Parmigiani et al., 2014**). La méthode de gazéification a attiré l'attention du monde entier pour des applications avancées de conversion de la biomasse en énergie en raison de ses utilisations variées et de ses avantages (**Asadullah, 2014**). La gazéification est un processus de conversion propre et très efficace largement étudiée car elle possède une large gamme combustible, grande puissance, et une efficacité de conversion de carbone élevée avec des émissions minimales. (**Jignesh et al., 2018**).

L'utilisation de fourneaux de cuisine traditionnels dans les pays en développement affecte des millions de vies au quotidien, avec des répercussions profondes sur la santé et l'environnement. Les effets toxiques sur la santé des combustibles solides ont été identifiés dès la fin du XVIIIe siècle, lorsque la suie de charbon était reconnue comme une cause de cancer du scrotum dans les ramoneurs (**Brown et al., 1957**). Au XXe siècle, le charbon et les combustibles issus de la biomasse ont fait l'objet d'enquêtes intensives sur leurs éventuels effets négatifs sur la santé. Les résultats de ces recherches suggèrent que certains constituants des émissions de fumée de biomasse ont des propriétés irritantes, inflammatoires et cancérigènes (**Wei et Seow, 2012**). Les émissions de fumée ont des propriétés cancérigènes et mutagènes dans les études menées sur des systèmes *in vitro* et des modèles animaux. Cependant, très peu de travaux sur la toxicité *in vivo* de la coque de riz comme combustible ont été décrits dans la littérature. De ce fait, la coque de riz négligée dans les installations de rizerie pourrait-elle être un bon alternatif aux autres combustibles déjà existants afin de réduire la pression sur les ressources forestières et fossiles ? Les émissions seraient-elles respectueuses de l'environnement, et les aliments cuits sains pour le consommateur ?

## **Hypothèse**

Les coques de riz utilisées comme combustible sous une forme appropriée et dans des foyers adaptés produisent des fumées non-toxiques pour l'utilisateur.

## **Objectif général**

L'objectif général de ce travail est donc d'évaluer l'efficacité et l'acceptabilité et la toxicité des gazéificateurs et coque de riz utilisée comme combustibles afin d'accroître la productivité de la chaîne de valeur du riz.

## **Objectifs spécifiques**

De façon plus spécifique, nous envisageons de :

1. Produire et caractériser les briquettes à base de coque de riz ;
2. Evaluer les performances et l'acceptabilité de 5 foyers à gazéification à coque de riz pour la cuisson ;

3. Evaluer le cycle de vie des gazéificateurs à coque de riz et la toxicité *in vivo* des coques de riz comme combustibles pour la cuisson.

## CHAPITRE I. REVUE DE LA LITTÉRATURE

De nos jours, l'augmentation de l'effet de serre et l'épuisement des ressources minières constituent une préoccupation pour la plupart de nos dirigeants. Ce qui amène ainsi un grand nombre de pays à se tourner vers des sources d'énergies alternatives, les énergies renouvelables, pour un développement durable.

### I.1. ENERGIES RENOUVELABLES : DEFINITIONS, RESSOURCES ET EXPLOITATION

Une énergie renouvelable est toute forme d'énergie pouvant être reconstituée par un processus naturel à vitesse supérieure ou égale à sa vitesse d'utilisation. Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. Les énergies dites renouvelables et propres constituent une alternative aux énergies fossiles sur plusieurs points :

- ✓ Elles respectent l'environnement (sont propres) ne dégagent pas de gaz à effet de serre, ni de déchets toxiques.
- ✓ Elles sont comme leurs noms l'indiquent « inépuisables ».
- ✓ Elles permettent une production décentralisée adaptée aux besoins locaux.

Parmi les énergies renouvelables nous citons : L'éolien, le solaire thermique et photovoltaïque, la biomasse, la géothermie, l'hydraulique (*Shiva et al., 2017*).

#### a) L'énergie solaire

C'est l'une des ressources renouvelables les plus abondantes sur terre, le flux d'énergie solaire reçu annuellement sur la surface de la terre représente environ 15000 fois la consommation d'énergie (*Mirecki, 2005*). Elle est actuellement exploitée selon deux techniques :

- La conversion du rayonnement solaire en chaleur par des capteurs thermiques. C'est le solaire thermique.

- La conversion directe du rayonnement lumineux en électricité par des capteurs (Cellule photovoltaïque) c'est le solaire photovoltaïque.

#### **b) La géothermie**

Elle consiste à capter la chaleur de la croûte terrestre pour produire du chauffage ou de l'électricité. Le sous-sol est naturellement chaud surtout à grande profondeur, plus on s'enfonce dans les entrailles de la terre, plus les températures augmentent, 3 à 4°C tous les 100m, cette eau chaude est utilisée pour le chauffage des maisons et autres immeubles (**Mirecki, 2005**).

#### **c) L'hydraulique**

L'hydraulique première des énergies renouvelables au monde, se distingue par sa souplesse d'utilisation, ses atouts écologiques et économiques. Comme les ancestrales roues entraînées par le débit d'un cours d'eau, les turbines des centrales hydrauliques sont activées par la force de l'eau passant d'un niveau supérieur à un niveau inférieur. Plus la hauteur de la chute d'eau et le débit sont importants plus la puissance électrique développée sera élevée. (**Gergaud, 2002**)

#### **d) L'éolien**

Parmi toutes les énergies renouvelables l'éolien est l'une des plus prometteuses, l'évolution technologique (augmentation de la taille et de la puissance des installations, optimisation des matériaux) alliée à la baisse continue des coûts de production (effet de série) font actuellement de l'éolien l'une des énergies renouvelables les plus compétitives. (**Dickson et Fanelli, 2003**)

#### **e) La biomasse**

Le terme biomasse désigne au sens large l'ensemble de la matière vivante. Depuis le premier choc pétrolier, ce concept s'applique aux produits organiques végétaux utilisés à des fins énergétiques. Ainsi, la biomasse se trouve incontestablement être l'une des sources d'énergies renouvelables les plus prometteuses, du fait de son coût peu élevé, mais aussi de par son potentiel énergétique non négligeable.

## **I.2. GENERALITES SUR LA BIOMASSE**

## **I.2.1. Définition et composition de la biomasse**

### **I.2.1.1. Définition de la biomasse**

L'Agence Internationale de l'Energie définit la biomasse comme toute matière organique issue des plantes ou des animaux et disponible de manière durable. La biomasse est tout matériaux d'origine biologique provenant de sous-produits de l'agriculture, de déchets des forêts ou des industries agricoles. La biomasse inclut le bois, les plantations agricoles, la phase organique des déchets et également les lisiers et fumiers. Cette biomasse provient de multiples sources : les résidus (résidus de cultures, d'exploitations forestières, et d'industries agro-alimentaires), les déjections d'animaux, les forêts existantes et les plantations. En plus de ces sources potentielles, on peut considérer la biomasse maritime et celle constituée par les boues résultantes des stations d'épuration.

### **I.2.1.2. Composition élémentaire de la biomasse**

La biomasse est principalement composée de Carbone, Oxygène et Hydrogène, avec moins de 1% de minéraux (azote, calcium, potassium, magnésium, phosphore ; silice dans certains bois tropicaux). Les concentrations en éléments C, H, O varient assez peu d'une biomasse lignocellulosique à une autre. Le carbone reste en général l'élément le plus abondant en masse (~50%) suivi par l'oxygène (~40%) et l'hydrogène (~6%). L'azote et le soufre ne représentent qu'une part très faible (~1,5%) (Melkior *et al.*, 2012).

## **I.2.2. Estimation de la quantité de résidus de biomasse**

Il y a eu de nombreuses tentatives pour estimer la production et l'utilisation des déchets dans l'ensemble, mais toutes montrent de nombreuses variantes, par l'existence de différents usages alternatifs. Ainsi, le ratio RRP (Rapport Résidus sur Production) nous permet de quantifier les résidus des échantillons de biomasses grâce à la connaissance des données statistiques agricoles obtenues via le système FAOSTAT (Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics) de la FAO. Pour mener à terme ce travail, une étude bibliographique a été faite pour connaître les différents indices de ratio correspondants à chaque culture (ce ratio estime le rapport de la production de graines, amandes à celle du résidu de la biomasse correspondant).

La connaissance de ces indices permet de retrouver les quantités de résidus de biomasse moyennes produites chaque année pour chaque culture. Le Tableau I résume ainsi les différents indices issus de la littérature. Le calcul de cet indice, noté  $b$  se fait tel décrit par l'équation suivante.

$$b = \frac{\text{Paille}}{\text{Grain}}$$

**Tableau I** : Rapport résidus sur production (RRP) des cultures agricoles et forestières

<b>Cultures</b>	<b>Ratios résidues / production</b>	<b>Source</b>
Arachide	Coque : 0,58	<b>Squilbin (2002)</b>
Coton	tige : 0,24 grain : 0,29	<b>Squilbin (2002)</b> <b>Tchouate (1999)</b>
Maïs	paille : 0,44 épi : 0,44	<b>Hanping et al., (2008)</b>
Mil	paille : 0,50	<b>Safiétou et al., (1989),</b>
Riz	balle : 0,20 paille : 0,57	<b>Safiétou et al., (1989), et</b> <b>Adrien et al., (2010)</b>
Sorgho	tige : 0,50	<b>Tchouate (1999)</b>
Noix palme	Coque: 0,80	<b>Squilbin (2002)</b>
Noix cajou	0,73	<b>Tchouate et al. (2012)</b>

Dans la suite de cette revue, nous nous intéresserons aux sous-produits de la transformation du riz paddy, principalement la coque de riz. Nous décrirons sa composition et son utilisation.

### **I.3. GENERALITES SUR LA COQUE DE RIZ ET SES UTILISATIONS**

#### **I.3.1. Généralités sur le riz**

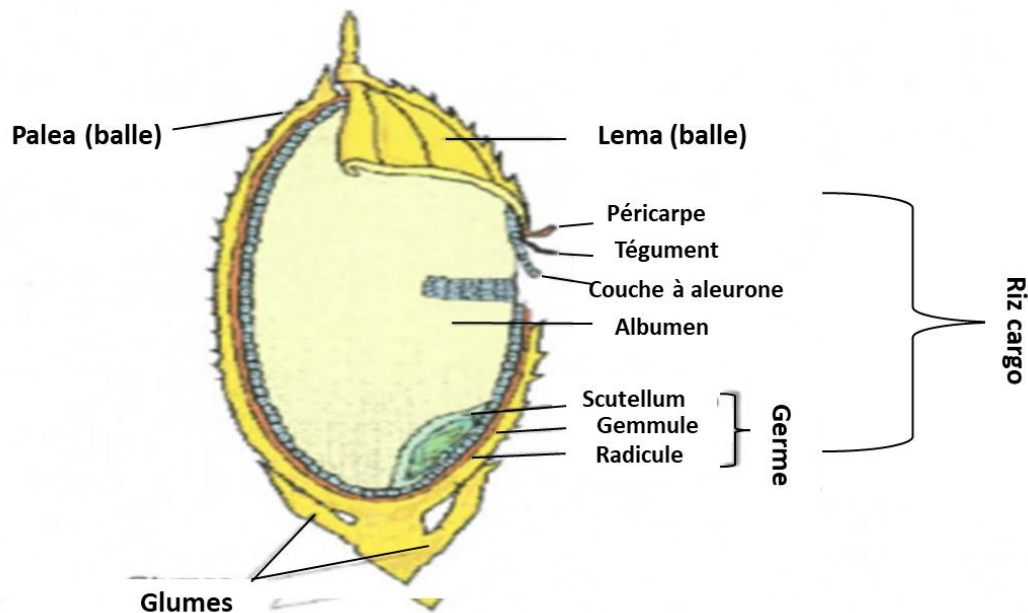
Le riz est une céréale de la famille des *poacées* (anciennement graminées), cultivée dans les régions tropicales, subtropicales et tempérées chaudes pour son fruit, ou caryopse, riche en amidon. Il désigne l'ensemble des plantes du genre *Oryza*, parmi lesquelles les deux seules espèces cultigènes, qui sont cultivées le plus souvent dans des champs plus ou moins inondés appelés rizières : *Oryza sativa* (appelé couramment « riz asiatique ») et *Oryza glaberrima*

(appelé couramment « riz ouest-africain » ou « riz de Casamance ») (Bhagirath *et al.*, 2017). Dans le langage courant, le terme de riz désigne le plus souvent ses grains, qui sont un élément fondamental de l'alimentation de nombreuses populations du monde, notamment en Amérique du Sud, en Afrique et en Asie. C'est la première céréale mondiale pour l'alimentation humaine (à lui seul il représente 20 % des besoins mondiaux en énergie alimentaire), la deuxième après le maïs pour le tonnage récolté. Le riz est notamment l'aliment de base de la cuisine asiatique, chinoise, indienne et japonaise.

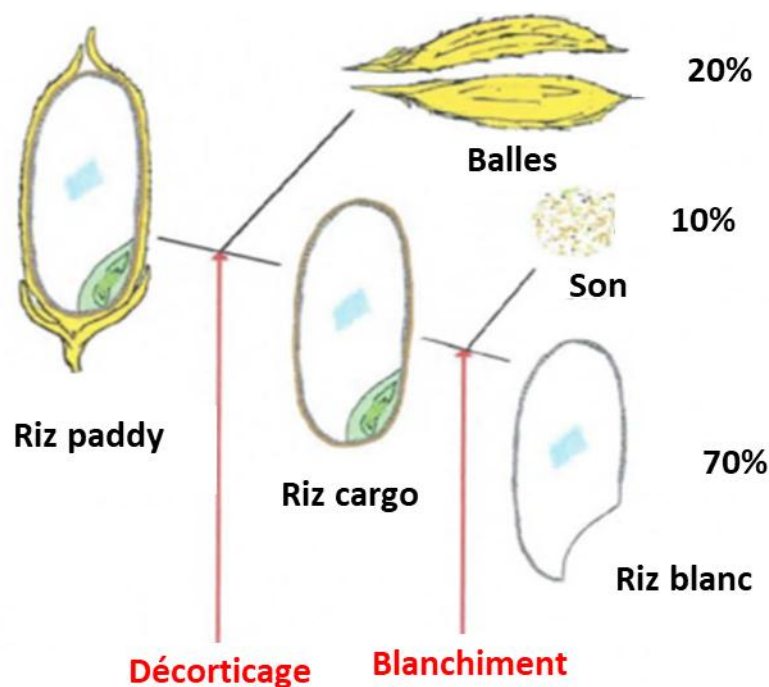
### I.3.1.1. Structure du grain de paddy

La connaissance de la structure du grain (représentée à la Figure 1) est capitale pour comprendre le choix des procédés utilisés en matière de transformation du riz. A la récolte, le riz est une céréale vêtue appelée "*paddy*" où le grain est encore entouré de ses glumes (ou balles). Sa transformation nécessite d'abord une élimination de ces enveloppes extérieures pour récupérer le riz brun (appelé aussi *riz cargo*) puis une usure du péricarpe et du germe pour obtenir le *riz blanc*, forme sous laquelle il est le plus souvent consommé (Tauon et Panchapan, 2002).

L'usinage du riz (Figure 2) consiste à transformer le paddy en riz blanc. La première opération qui permet de séparer les coques du grain est appelée décorticage. Elle est habituellement suivie du blanchiment qui consiste à éliminer le son (péricarpe et germe) pour obtenir le riz blanc. Le terme usinage est utilisé pour désigner l'ensemble de ces deux opérations successives.



**Figure 1 : Structure du grain de riz (Tauon et Panchapan, 2002)**



**Figure 2 : Différents produits à chaque étape d'usinage du riz paddy (Bhattacharya *et al.*, 1999)**

Le rendement à l'usinage et le taux de brisures sont les deux principales grandeurs caractérisant la qualité technologique. Le rendement à l'usinage qui correspond au pourcentage de riz blanc obtenu à partir d'une quantité donnée de paddy est potentiellement voisin de 70%. Les balles représentent environ 20% du poids du grain paddy sec et le son 10%.

### **I.3.1.2. Caractéristiques de la balle de riz**

La balle ou coque de riz est l'un des coproduits de la transformation du riz dans les rizeries. La balle est générée au cours de la première étape du processus de mouture, lorsque le riz paddy est décortiqué. Le pourcentage de balle de riz dans le riz paddy varie selon les pays et est influencé par divers paramètres tels que les espèces de riz, la superficie cultivée, la fertilité du sol, les conditions météorologiques, l'efficacité de l'irrigation, les pratiques agricoles, etc. Cependant, 20% sont généralement considérés comme une moyenne pour la balle de riz (Beagle, 1978 ; Bhattacharya *et al.*, 1999).



Physiquement, la balle de riz est abrasive, légère et volumineuse. Cela le rend difficile à manipuler ; il nécessite un grand espace intérieur pour le stockage, et peut être facilement emporté par le vent. De plus, ses caractéristiques encombrantes peuvent rendre son transport difficile. Par exemple, les camions d'une capacité de charge de 50 tonnes de riz ne peuvent transporter que 10 tonnes de coques de riz, ce qui rend le transport de ces balles coûteux (**Beagle, 1978**).

La composition de la balle de riz diffère d'un pays à l'autre. Le Tableau II montre la composition de la balle de riz sélectionnée dans la littérature. Cela montre qu'en général, le carbone et l'oxygène sont les principaux éléments chimiques de la balle de riz. Cette composition trouve son origine dans le processus de photosynthèse au cours de la phase de croissance du riz. Le carbone fixé dans la balle de riz résultait de la conversion solaire du dioxyde de carbone et de l'eau lors de la photosynthèse. Le carbone contenu dans la balle de riz est bénéfique pour certaines applications industrielles. L'enveloppe de riz présente des caractéristiques distinctives, telles qu'un pouvoir calorifique relativement élevé et une faible teneur en humidité par rapport aux autres résidus agricoles. Cela indique que la balle de riz est un bon carburant potentiel. La balle de riz a une teneur plus élevée en cendres que d'autres résidus agricoles. Cependant, comparé à d'autres combustibles tels que le charbon, la balle de riz contient moins de cendres. Le tableau III montre ces caractéristiques de la balle de riz par rapport aux autres résidus agricoles (**Beagle 1978**).

**Tableau II:** Composition de la balle riz

Paramètres	Balle de riz <sup>a</sup>	Balle de riz <sup>b</sup>	Balle de riz <sup>c</sup>
Carbone (% M)	37.13	42.80	38.00
Hydrogène (% M)	4.12	4.48	4.55
Oxygène (% M)	31.60	29.33	32.40
Nitrogène (% M)	0.36	0.37	0.69
Sulphure (%M)	0.05	0.02	0.06
Cendres (% M)	17.75	15.70	14.00
Humidité (% M)	9.00	7.30	10.30
Valeur calorifique inférieure (MJ/kg)	13.61	15.70	14.98

Légende : <sup>a, b</sup> et <sup>c</sup> représentent les sources : **CDM – Executive Board, 2006 ; Janvijitsakul & Kuprianov, 2008 et Madhiyanon *et al.*, 2006** respectivement. M : masse.

**Tableau III:** Propriétés sélectionnées de la balle de riz par rapport à d'autres combustibles

Propriétés	Balle de riz <sup>a</sup>	Bagasse <sup>b</sup>	Sciure <sup>c</sup>	Lignite <sup>d</sup>
Valeur calorifique inférieure (MJ / kg)	15.82	7.32	13.90	11.13
Teneur en humidité (% M)	8.87	53.00	15.90	30.20
Teneur en cendres (% M)	14.76	1.84	0.61	25.40

Légende : <sup>a, b, c</sup> et <sup>d</sup> représentent les sources : **Kiatkittipong *et al.*, (2009) ; Permchart & Koupryanov, 2004 et Sampattagul *et al.*, 2004** respectivement. M : masse.

La balle de riz a de faibles valeurs nutritionnelles et un caractère abrasif. Par conséquent, il n'est normalement pas utilisé pour nourrir les animaux. Le tableau IV indique son contenu nutritionnel (**Beagle 1978**). Ces données proviennent d'analyses de la balle de riz effectuées dans le monde entier sur une période de 100 ans et sont présentées sous forme de plage de valeurs. Ce tableau montre que la balle de riz contient très peu de protéines et de matières grasses. D'autre part, il contient des composants riches en glucides (tels que la cellulose et les pentosanes) et de la lignine, un composé chimique lié à la paroi cellulaire des celluloses. Par conséquent, la balle de riz peut être une source potentielle de cellulose et de lignine.

**Tableau IV:** Composants nutritionnels de la coque de riz

Composants	% Masse
Humidité	2.40-11.35
Protéine	1.70-7.26
Lipides	0.38-2.98
Cendres	13.16-29.04
Pentosanes	16.94-21.95
Cellulose	34.34-43.80
Autres	21.40-46.97

Source : **Beagle, 1978**

Ces caractéristiques de la balle de riz augmentent les coûts et les exigences de manutention, de transport et de stockage et réduisent la densité d'énergie volumétrique et l'efficacité de la combustion (**Singh & Kashyap, 1985**). La combustion d'un matériau de faible densité entraîne une mauvaise conversion thermochimique en raison de la distribution non uniforme de la température et du mauvais mélange au sein du combustible hétérogène (**Zhang et al., 2012**). Une densification des résidus est alors nécessaire pour optimiser la production d'énergie.

#### **I.4. DENSIFICATION DE LA BIOMASSE**

La densification consiste à l'agglomération de fines particules en une forme homogène plus grande et solide de densité supérieure. Le procédé, qui est également souvent appliqué à l'industrie des aliments pour animaux, peut potentiellement augmenter la densité apparente initiale des matières en vrac ou en balles, généralement autour de 40-200 kg/m<sup>3</sup> à une densité apparente finale de 600 à 800 kg m<sup>-3</sup> (**Mani et al., 2002 ; Obernberger et Thek, 2004**). Cette densité apparente plus élevée augmente en même temps la densité de l'énergie, améliore les performances de combustion, contrôle l'uniformité et la qualité du produit et réduit les problèmes de transport, de stockage et de manutention.

##### **I. 4.1. Principe de la densification**

Il est impératif de faire une distinction entre la densification qui réalise une agglomération intime au niveau des particules et les autres formes de compactage et de pressage plus ou moins accentués qui obtiennent une certaine cohésion par simple imbrication mécanique des fibres ou à l'aide de ficelles dans le cas des presses à balles (**Louvel, 1986**). La densification consiste à agglomérer des fragments de résidus en utilisant la lignine comme liant naturel.

##### **I. 4.2. Etudes antérieures de densification de biomasse**

La compression uni-axiale via un piston dans une matrice cylindrique est l'une des méthodes les plus rapportées dans la littérature pour étudier les caractéristiques de force-déformation, de relaxation et de qualité ultérieures d'une variété de poudre et de matériaux écrasés. Cette méthode permet une analyse détaillée du comportement compression / relaxation des matières premières à l'échelle du laboratoire. Des systèmes à piston plongeur ont été utilisés pour étudier la compression de la luzerne (**Tabil et Sokhansanj, 1997 ; Adapa et al., 2002**), des pailles / graminées (**Kaliyan Morey, 2006 ; Mani et al., 2006b**), fibre/ coque de palme (**Husain et al.,**

2002), tourteaux / ordures d'olive (Al-Widyan *et al.*, 2002 ; Yaman *et al.*, 2000), ainsi que le bois et déchets de bois (Chin et Siddiqui, 2000 ; Li et Liu, 2000 ; Demirbaş *et al.*, 2004 ; Rhén *et al.*, 2005). Les matières premières brutes sont généralement broyées et conditionnées à une teneur en humidité appropriée (par déshydratation ou addition d'humidité) avant le processus de densification. Il s'agit de simuler les conditions de densification commerciale / industrielle. Les produits résultants des tests uni-axiaux sont couramment désignés dans la littérature par pellets ou briquettes. La dénomination « pellet » désigne généralement les matériaux de moins de 15 mm de diamètre, tandis que « briquette » désigne généralement les plus grosses unités de matériau densifié.

### **I. 4.3. Variables influençant la densification de la biomasse**

D'après des études antérieures sur la densification de la biomasse, il a été constaté que les facteurs suivants influent sur la densification sans liant utilisant un assemblage plongeur-matrice pour produire des pellets / briquettes uniques (Rehkugler et Buchele, 1969 ; Granada *et al.*, 2002) :

- ✓ Variables liées au processus : température, pression et taux d'application de la pression (vitesse de compression), temps d'attente, géométrie ;
- ✓ Variables liées aux matières premières / matériau : teneur en humidité, taille et forme et distribution des particules, caractéristiques biochimiques, prétraitement.

#### **I. 4.3.1. Variables liées au processus**

Les variables de processus sont les facteurs non spécifiques aux matériaux, c'est-à-dire qu'il s'agit d'un ensemble de conditions (température, pression, etc.) imposées aux matériaux de la biomasse par l'équipement de densification mécanique.

- a) **Température** : Mani *et al.*, (2006a) ont constaté que des températures élevées nécessitent moins de charge pour atteindre la densité compacte souhaitée avec une consommation d'énergie moindre. Hall et Hall (1968) ont constaté que, pour une teneur en humidité donnée, la pression requise pour obtenir une certaine densité de plaquettes (luzerne et herbe des Bermudes) était réduite par l'augmentation de la chaleur dans la matrice de fabrication de plaquettes. De même, l'augmentation de chaleur augmentait la

teneur en humidité à laquelle une certaine pression était capable de produire une densité spécifique de plaquettes. **Sokhansanj et al., (2005)** ont souscrit à cette observation en affirmant que lorsque la température augmentait, la résistance du matériau diminuait face à une charge appliquée.

**b) Pression : Butler et McColly (1959)** ont observé que la densité des pellets de foin de luzerne coupés était proportionnelle au logarithme naturel de la pression appliquée. Il ne fait aucun doute qu'une augmentation de la pression appliquée augmentera la densité ; Cependant, la résistance mécanique des pellets n'est pas aussi facile à prédire. **Yaman et al., (2000)** ont recommandé que la pression de compression soit choisie à une valeur optimale. Ils ont expliqué que lorsque la pression de briquetage augmentait, la résistance mécanique des briquettes augmentait du fait de la déformation plastique. Cependant, au-dessus d'une pression de briquetage optimale, des fractures peuvent se produire dans la briquette en raison d'une dilatation soudaine. Pour une taille de matrice et des conditions de stockage données, il existe une pression de matrice maximale au-delà de laquelle aucun gain significatif en cohésion (collage) de la briquette ne peut être obtenu (**Ndiema et al., 2002**).

**c) Temps d'attente :** Le temps de maintien du matériau dans la matrice influencera sur la qualité des pellets. **Li et Liu (2000)** ont constaté que le temps de maintien de la sciure de chêne avait plus d'effet à des pressions plus basses qu'à des pressions plus élevées. À la pression la plus élevée (138 MPa), l'effet du temps de maintien est devenu négligeable. Le temps de maintien a eu peu d'effet sur le taux d'expansion. Il est apparu que des temps de maintien supérieurs à 40 secondes avaient un effet négligeable sur la densité. **Al-Widyan et al. (2002)** ont découvert que des durées de maintien comprises entre 5 et 20 secondes n'avaient pas d'effet significatif sur la durabilité et la stabilité des briquettes de tourteaux d'olives.

**d) Géométrie :** Dans ce contexte, la géométrie de la matrice fait référence à la taille de la matrice et influe sur la quantité de matériau pouvant être pelleté, l'énergie nécessaire à la compression, etc. **Butler et McColly (1959)** ont constaté que, lors du pelletage d'une masse constante de matériau, la densité du pellet était plus grande pour les chambres de plus petit diamètre à une pression donnée. De plus, des pellets plus longs ont été produits

dans les plus petites chambres (en utilisant une masse constante dans toutes les chambres), entraînant un pourcentage de dilatation plus faible.

#### **I. 4.3.2. Variables liées à la matière première / matériau**

Ce sont les facteurs caractéristiques d'une matière première de biomasse particulière.

##### **a) Teneur en humidité**

Dans le processus de briquetage, l'eau agit comme un liant de type film en renforçant et en favorisant la liaison via les forces de van der Waal en augmentant la surface de contact des particules (**Mani et al., 2006a**). En règle générale, plus la teneur en humidité est élevée, plus la densité de la briquette est faible. **Demirbaş (2004)** a constaté que l'augmentation de la teneur en humidité (7-15%) des déchets de pâte et de la sciure de bois d'épicéa donnait des briquettes plus résistantes. **Mani et al. (2006a)** ont indiqué que la trempe de maïs à faible teneur en eau (5 à 10%) donnait des briquettes plus denses, plus stables et plus durables que les pâtes à forte humidité (15%). **Li et Liu (2000)** recommandent que la teneur en humidité optimale pour le compactage du bois dans un assemblage poinçon-matrice soit d'environ 8%. À la suite d'une étude sur le compactage de l'écorce d'arbre, des déchets de scierie, des copeaux de bois, du foin de luzerne, de la luzerne fraîche et de l'herbe, **Moshenin et Zaske (1976)** ont rapporté que des matériaux moins humides et contenant moins de fibres longues (plus de fines) donnaient des gaufrettes plus stables, due à une expansion limitée.

##### **b) Taille, forme et distribution des particules**

De nombreuses études indiquent que des particules plus petites produisent des pellets de plus haute densité. Généralement, la qualité des pellets est inversement proportionnelle à la taille des particules ; Cependant, ce n'est pas toujours le cas car des résultats contradictoires peuvent être trouvés dans la littérature. **Mani et al. (2006a)** ont fait allusion à l'idée que la distribution granulométrique a un effet sur la qualité des pellets. **Payne (1978)** a signalé qu'une proportion de particules fines à moyennes est requise, mais que la qualité des pellets et l'efficacité des pellets commerciaux en souffriront si la matière grossière n'est pas présente. L'effet de la distribution granulométrique a été répertorié comme une propriété matérielle importante pour la mise en fourrage lors de la comparaison des rapports feuille sur tige ; une teneur plus élevée en feuille produisant un produit densifié supérieur ; cela

peut aussi être dû à une augmentation de la teneur en protéines de la feuille. **Smith et al. (1977)** ont noté que le compactage et la stabilisation de la paille pouvaient avoir un mécanisme différent de celui de l'herbe, car la paille était un matériau mort et avait une teneur en feuilles nettement inférieure.

### c) **Composition biochimique**

En raison de la vaste gamme de matériaux de la biomasse, le nombre de constituants chimiques et de compositions est presque innombrable. En conséquence, il est presque impossible d'identifier et de quantifier toutes les réactions chimiques ayant lieu pendant le processus de densification. Par conséquent, il est sage de se concentrer sur les composants chimiques communs à la majorité, sinon à la totalité, des matières premières de biomasse pertinentes, afin de comprendre en quoi ces composés chimiques choisis affectent la qualité du produit densifié. La recherche dans ce domaine vise principalement la fabrication d'aliments pour animaux et de comprimés pharmaceutiques.

**Thomas et al. (1998)** ont indiqué que les composants des ingrédients (destinés à la granulation des aliments pour animaux) peuvent être classés en amidon, protéines, sucre et polysaccharides non amylacés (NSP), graisses, fibres, matières inorganiques et eau. Les conditions de traitement (température, pression, cisaillement, vapeur d'eau) induisent des modifications entraînant des composants individuels, ou des composants en interaction, à affecter positivement ou négativement la qualité des briquettes. Dans l'industrie de la transformation des aliments, les mélanges de polymères utilisés dans les aliments peuvent donner des gels plus forts que les polymères seuls, en raison de mécanismes synergiques (**Shim et Mulvaney, 2001**). Ce que l'on ignore, ce sont toutes les spécificités de l'influence des constituants chimiques sur la qualité des pellets.

## **I.5. VOIES DE VALORISATION DE LA BIOMASSE**

La biomasse est un combustible difficilement exploitable dans son état brut. Sa transformation permet d'obtenir des combustibles plus intéressants sous forme :

- ✓ Solide comme les granulés, les plaquettes, le charbon de bois ;
- ✓ Liquide comme l'éthanol, le biodiesel, les bio-huiles de pyrolyse ;

- ✓ Gazeuse comme les gaz de décharge, le biogaz, le gaz de bois ou d'autres résidus utilisables dans des moteurs, chaudières ou turbines.

La conversion énergétique de la biomasse repose essentiellement sur deux familles de procédés de conversion à savoir :

- Voie thermochimique ou voie sèche (combustion, gazéification, pyrolyse, liquéfaction) ;
- Voie biochimique ou voie humide (digestion, fermentation).

Chaque voie de valorisation possède des caractéristiques spécifiques, y compris la gamme de matières premières et des produits, coproduits, coûts, l'échelle et le stade de développement de la technologie. Le choix dépendra du type et de la quantité de biomasse disponible, du type d'énergie finale souhaitée, des conditions économiques, environnementales et d'autres facteurs (**Zouhour, 2004**).

Dans le cadre de la présente étude, un accent particulier est mis sur la valorisation thermochimique, à travers la combustion et la gazéification de la biomasse qui constituent réellement les voies de valorisation de la biomasse à l'échelle industrielle.

La conversion thermochimique est un processus de reformage chimique à haute température qui coupe les liaisons de la matière organique et transforme ses intermédiaires en charbon, gaz de synthèse et bio-huile hautement oxygénée (**Belkadi, 2009**). Il existe trois principaux procédés thermochimiques de valorisation énergétique de la biomasse : la pyrolyse, la gazéification, et la combustion (Tableau V). Selon les conditions opératoires de température, pression, concentrations en agents oxydants ou réducteurs, la matière organique dégradée par la chaleur produit différents composés solides, liquides ou gazeux. Ainsi les procédés thermochimiques permettent dans un premier temps de transformer la biomasse, solide et hétérogène, en combustibles gazeux ou liquides plus faciles à manipuler et à transporter. Ensuite, ces combustibles (huiles de pyrolyse ou de liquéfaction, gaz de synthèse) sont soit utilisés directement pour la production de chaleur et d'électricité, soit convertis en autre forme de combustibles (biocarburants liquides ...)

**Tableau V:** Caractéristiques de trois voies de valorisation thermochimique (**Siedlecki et al., 2011**)

Principaux produits	Combustion	Gazéification	Pyrolyse
---------------------	------------	---------------	----------



	Chaleur, gaz de combustion	Gaz combustible, chaleur	Huile (combustible), gaz et charbon
<b>Bilan énergétique</b>	Exothermique	Auto-thermique	Allo-thermique
<b>Conversion du carbone</b>	>99%	80 – 95%	75% (rendement en huile)
<b>Constituants de gaz brut</b>	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub>	CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , goudrons	CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> , charbons
<b>Stœchiométrie en O<sub>2</sub></b>	>1	0< $\lambda$ <1	0
<b>Réactivité chimique du produit final</b>	Inerte	Combustible mais stable	Combustible mais réactif
<b>Valeurs calorifiques (MJ/Kg)</b>	0	5- 20	16- 19

Légende : CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub> représentent respectivement le monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, hydrogène, eau, méthane et azote.

### 1. 5.1. La pyrolyse

Procédé anaérobie de décomposition de la partie organique de la biomasse en un mélange de charbon et de gaz volatiles (**Belkadi, 2009**). C'est une transformation se déroulant en atmosphère aussi inerte que possible (absence d'oxygène) et à une température de réaction n'excédant pas 600°C.

### 1. 5.2. La gazéification

La gazéification est un procédé thermique à température élevée dans laquelle un combustible solide réagit avec une quantité contrôlée d'oxygène et est transformé en un mélange de gaz dont l'hydrogène et le monoxyde de carbone sont les deux composés principaux, si l'on exclut bien sûr l'azote lorsque la réaction est effectuée en présence d'air (**Dufour et al., 2009**).

### 1. 5.3. La combustion

C'est la façon la plus ancienne et la plus répandue de transformation de la biomasse en énergie. L'agent oxydant employé est toujours l'oxygène, principalement puisé dans l'air. Les réactions de combustion sont toujours exothermiques (**Belkadi, 2009**).

## I .6. GAZEIFICATION DE LA BIOMASSE

### I.6.1. Définition de la gazéification

La gazéification est une réaction qui permet de transformer un solide (biomasse) en un gaz combustible essentiellement composé d'hydrogène, de monoxyde de carbone, et d'hydrocarbures légers (CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>).

La gazéification se déroule à haute température en présence d'un agent oxydant de gazéification. Ces agents oxydants sont généralement l'oxygène (de l'air) et/ou la vapeur d'eau et/ou le dioxyde de carbone. Comme pour la combustion, ces agents oxydants vont conduire à l'oxydation des vapeurs (gaz et goudrons) de pyrolyse et à une oxydation hétérogène du charbon.

La température des réacteurs est comprise entre 800 et 1400°C. Les réactions d'oxydation à l'oxygène fournissent l'énergie nécessaire pour maintenir la température du processus. Si la vapeur d'eau est utilisée comme agent de gazéification pour augmenter la teneur en hydrogène du gaz, la chaleur doit être apportée le plus souvent par un sable caloporteur (comme dans un lit fluidisé double). La valeur calorifique du gaz est significativement affectée par la présence d'azote. Si l'eau est utilisée sans la présence d'azote de l'air, le procédé de gazéification produit un gaz plus riche (avec un meilleur pouvoir calorifique).

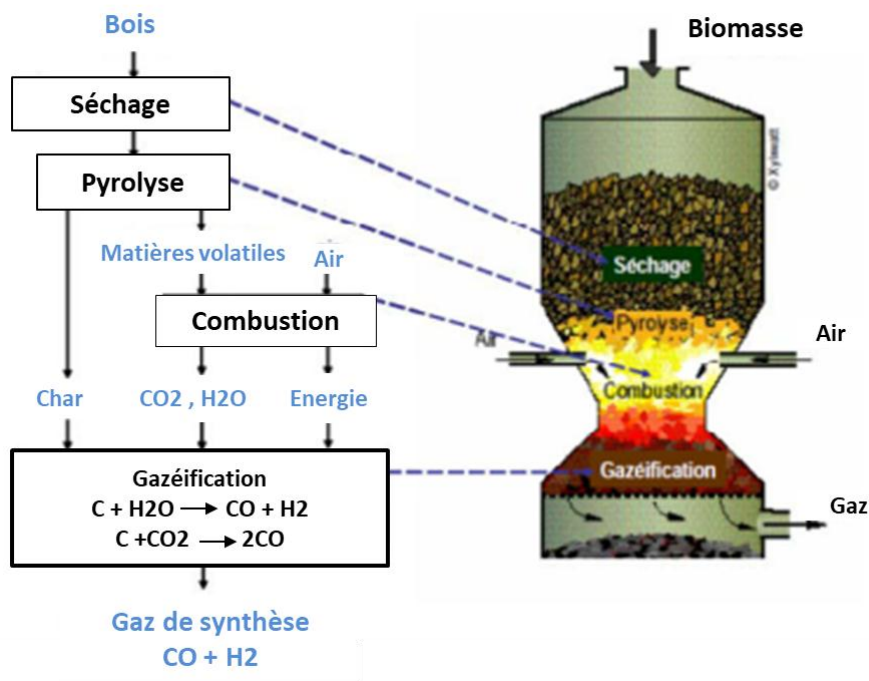
La gazéification directe avec l'oxygène pur a les mêmes avantages que le procédé de gazéification à l'eau. Cependant, le coût de production d'oxygène est estimé à plus de 20 % de la production globale d'électricité (**Belgiorno et al., 2003**).

## **I. 6.2. Mécanismes de la gazéification**

La gazéification de la biomasse dans un gazogène peut être résumée en quatre phénomènes thermochimiques complexes pouvant avoir lieu simultanément ou successivement en fonction de la technologie et des conditions opératoires. En effet ils sont toujours présents mais leur déroulement et leur configuration spatiale et temporelle peuvent différer selon le mode d'introduction de la biomasse, l'agent gazéifiant et le type de gazogène (**Reed et Das, 1988**). La gazéification en lit fixe est ainsi représentée schématiquement par la Figure 3. Ces étapes sont énumérées ci-dessous et sont illustrées par les phénomènes physiques et chimiques dominants :

- La phase de séchage permet de vaporiser l'humidité contenue dans la biomasse,
- La pyrolyse transforme la biomasse en un mélange de gaz, goudrons et charbon,
- L'oxydation à l'oxygène brûle une partie des gaz, des goudrons et du charbon pour fournir la chaleur nécessaire au procédé,

- L'oxydation à  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$  convertit le reste de charbon en produit gazeux (essentiellement  $\text{CO}$  et  $\text{H}_2$ ).



**Figure 3 :** Représentation schématique de phénomènes thermo-chimiques au cours de la gazéification (Reed et Das, 1988)

### I. 6.3. Type de gazéificateurs

Les types de gazéificateurs sont nombreux, mais le principe de fonctionnement reste similaire dans la mesure où toutes les étapes citées précédemment sont présentées. Ces gazéificateurs se distinguent par plusieurs paramètres à savoir : le mode d'introduction de la biomasse, l'agent oxydant, le sens de l'écoulement de la biomasse et de l'oxydant, le mode d'évacuation des cendres, les moyens supportant le combustible solide dans le réacteur, et la source de la chaleur fournie au réacteur. Les procédés commercialement développés reposent principalement sur quatre voies de gazéification :

- La gazéification à lit fixe avec extraction des cendres,
- La gazéification à lit fluidisé (lit dense ou circulant ou double),
- La gazéification à lit entraîné,
- La pyro-gazéification étagée.

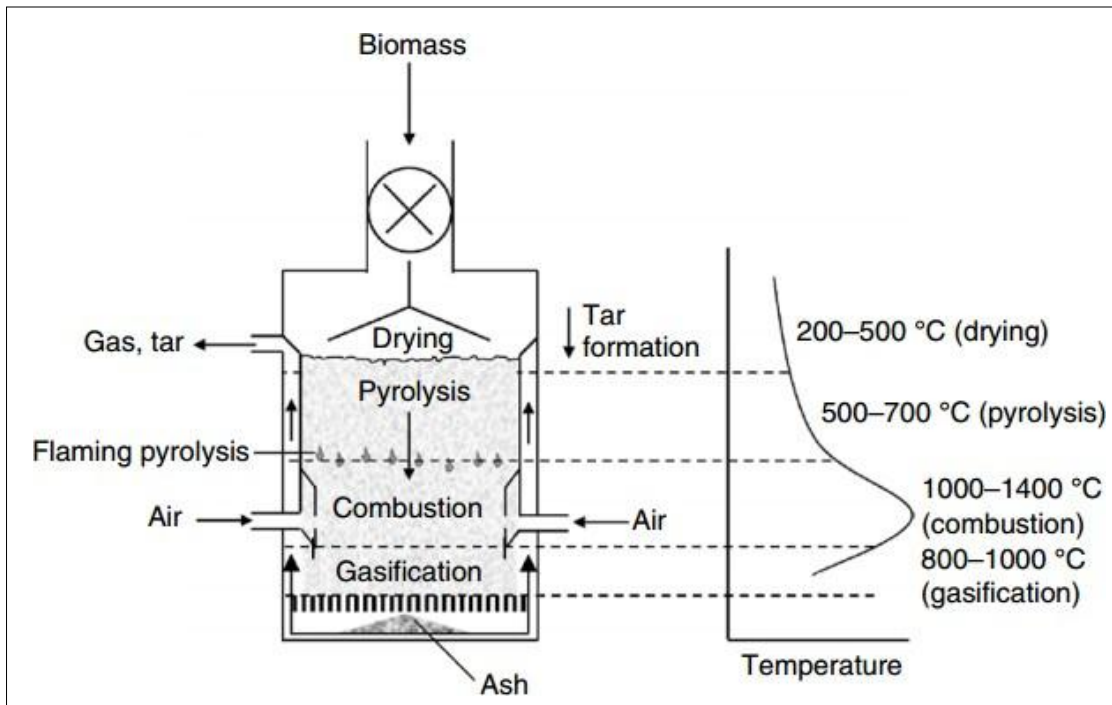
### **I. 6.3.1. Gazéificateurs à lit fixe**

Le lit fixe est la méthode traditionnelle de gazéification. Les procédés à lit fixe sont en général de construction simple et robuste. Dans ces procédés, le combustible (biomasse) forme un lit dense au sein du réacteur et se déplace verticalement vers le bas. Il se caractérise par une zone d'oxydation/réduction stationnaire où le lit est maintenu par une grille. Il existe plusieurs types de réacteurs à lit fixe, dépendant de la direction d'écoulement des gaz. On distingue ainsi des réacteurs à lit fixe à tirage descendant ou co-courant (downdraft), à tirage ascendant ou contre-courant (updraft). Ces gazogènes sont sensibles à la taille des particules de la biomasse utilisée et ne sont pas utilisables pour des installations de grande puissance, notamment pour les lits à co-courants (<1MW). Par contre leur simplicité d'utilisation, la relative bonne connaissance du procédé ainsi que son contrôle simple en font le type privilégié pour les installations de faible à moyenne puissance utilisant des déchets de bois (**Lv et al., 2007**).

#### **a) Gazéificateurs à co-courant (downdraft)**

Le combustible et les gaz s'écoulent dans la même direction : de haut en bas. Une grille supporte le lit et laisse passer les cendres (Figure 4). Avant la zone d'injection du gaz réactif, le combustible est d'abord séché puis pyrolysé. La zone d'injection de l'air présente en général

une restriction de diamètre pour améliorer les transferts de matière et de chaleur dans cette zone d'oxydation. En effet, dans cette zone d'oxydation, les goudrons sont craqués thermiquement sous l'effet des hautes températures et de l'oxygène (~1000°C). Dans la zone de réduction, le charbon produit par pyrolyse est gazéifié et les gaz produits quittent le réacteur par le bas. Les gaz formés quittent le réacteur en partie basse, après avoir traversé la zone la plus chaude du réacteur, permettant une conversion maximum des goudrons produits durant la pyrolyse (**Babu et Sheth, 2006**).



**Figure 4:** Schéma d'un gazéificateur à co-courant (Source : **Basu, 2010**)

Les gaz sortent du réacteur à haute température. Il est donc important que cette énergie soit valorisée par la suite. Les réacteurs de gazéification à tirage descendant sont plus exigeants en

termes de taux d'humidité (<20%) et de taille des particules qui doivent être plus faibles. Mais

l'avantage de cette technologie reste la production de gaz à faible teneur en goudrons. C'est pourquoi les réacteurs à co-courant sont plus intéressants pour des applications nécessitant une bonne qualité des gaz comme la production d'électricité par exemple.

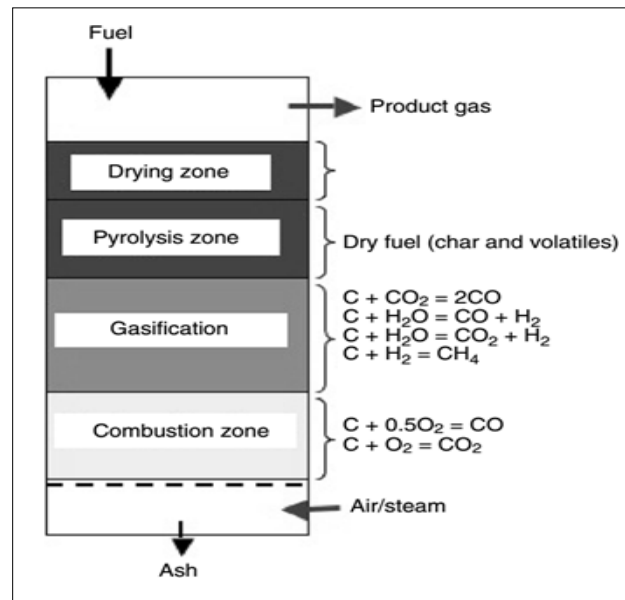
#### **b) Gazéificateurs à contre-courant**

Dans ce système, l'alimentation en combustible se fait toujours par le haut du réacteur (Figure 5). Le charbon est à nouveau retenu au fond via une grille. L'injection d'air se fait par contre en dessous de la grille et les gaz produits sont extraits par le haut du réacteur. Ils servent donc à sécher la biomasse entrante, d'où une température des gaz en sortie relativement faible

d'environ 200-300 °C (**McKendry, 2002**). Le combustible et la biomasse circulent donc en

sens contraire. Une autre différence majeure est que les gaz sortants ont traversé la zone de pyrolyse : la biomasse subit les réactions de réduction avant d'arriver dans la zone d'oxydation.

Un gazéificateur à lit fixe à contre-courant présente ainsi un bon rendement énergétique grâce à la bonne intégration thermique (gaz sortant assez froid). Il est également plus tolérant sur le taux d'humidité du combustible. Par contre, le taux de goudrons final est élevé car les gaz



pyrolyse sortent sans être passés par la zone d'oxydation. Il en résulte qu'un traitement complexe des gaz est indispensable pour pouvoir les utiliser dans une unité de cogénération. En revanche, les gazéificateurs à lit fixe à contre-courant sont bien adaptés à l'utilisation des gaz directement dans un brûleur pour la production de chaleur (Michel *et al.*, 2014).

**Figure 5:** Schéma d'un gazéificateur à contre-courant (Source : Basu, 2010)

### I.6.3.2. Lit fluidisé

Il est constitué de particules d'un matériau inerte (sable, dolomie, alumine, olivine, etc.) en suspension et de combustible solide. Le solide se comporte alors « comme un fluide ». La fluidisation du lit permet une excellente homogénéité de température et un bon transfert de chaleur. Les conditions opératoires sont bien maîtrisées et les vitesses apparentes de

dévolatilisation sont beaucoup plus importantes que dans les procédés à lit fixe. D'autre part, le gaz produit est fortement chargé en particules, nécessitant des équipements de traitement et d'épuration du gaz onéreux avant sa valorisation. Par contre, la température de fonctionnement (700-900°C) est limitée par la température de fusion des cendres (**Zouhour, 2014**).

### **1.6.3.3. Réacteurs à lit entraîné**

Dans ce cas, le combustible est introduit (quelques centaines de micromètres) dans le flux gazeux d'agent gazéifiant. Par conséquent, le temps de séjour du combustible dans le réacteur est très faible (de l'ordre de la seconde) et la cinétique de réaction est très rapide. La température de réaction est élevée (1200 – 1600°C) et la pression dans le réacteur est de 20 à 50 bars. Il en résulte un craquage presque complet des goudrons mais une formation de suies. Les procédés mettant en œuvre un gazéifieur à lit entraîné ont connu des développements importants lors de ces dernières années, en raison de leurs qualités capitales (**Zouhour, 2014**).

## **I.7. ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV)**

Les principaux agents moteurs de promotion de la production et de l'utilisation de la bioénergie sont les éventuels avantages environnementaux obtenus en remplaçant les combustibles fossiles par des biocarburants provenant de biomasse (sources renouvelables). Il y a un large consensus au sein de la communauté scientifique que l'ACV est l'une des meilleures méthodes pour l'évaluation des charges environnementales associées à la production de biocarburants, en identifiant l'énergie et les matériaux utilisés ainsi que les déchets et les émissions rejetées dans l'environnement. En outre, elle permet également l'identification des possibilités d'amélioration des performances environnementales des systèmes sujets d'étude. Compte tenu de la variété des processus de la conversion de biomasse en énergie, et de la discussion controversée de leurs « avantages nets », plusieurs études ont été menées à l'aide de cette méthode pour analyser les processus, afin de savoir quel biocarburant implique le plus d'impacts environnementaux négatifs (**Iribarren et al., 2013 ; Heffels et al., 2014**).

La biomasse ligno-cellulosique est le type le plus étudié des matières premières, probablement parce que c'est la ressource de biomasse la plus abondante dans le monde et disponible localement dans la plupart des pays. Les résidus de biomasse sont des matériaux d'origine biologique provenant de sous-produits de l'agriculture, de déchets des forêts ou des industries agricoles. Contrairement aux cultures énergétiques dédiées, les déchets biologiques ne sont pas produits spécifiquement pour être utilisés comme source d'énergie. Ils sont le résultat d'activités économiques et de la production de biens dans presque tous les secteurs de l'économie. Par conséquent, puisque les bio-déchets sont produits de toute façon, leur valorisation à des fins énergétiques n'augmente pas généralement les pressions environnementales. En outre, la production de biocarburants se traduit généralement par la production de coproduits, qui peuvent remplacer les produits traditionnels, et ainsi fournir d'autres avantages environnementaux de la chaîne de processus de biocarburants. Les impacts sur l'environnement des systèmes de valorisation des déchets de biomasse varient selon le type de sources de matières premières, les technologies de conversion et les technologies d'utilisation finale. Les différences régionales peuvent également être significatives, en particulier en ce qui concerne l'utilisation des terres et les modes de production de la biomasse (Steubing *et al.*, 2014).

### **I.7.1. Définition**

L'Analyse du Cycle de Vie est une méthode qui étudie les aspects environnementaux et les impacts potentiels tout au long de la vie d'un système (du berceau au tombeau). Le terme de système désigne un procédé, un produit ou un service. L'ACV prend en compte l'ensemble des activités consécutives directement ou indirectement associées au système. Selon la norme (ISO 14044, 2006), l'ACV implique l'extraction et le traitement des matières premières, la transformation, le transport et la distribution, la consommation, le recyclage, l'élimination et la gestion des déchets associés à un système. Une ACV permet de :

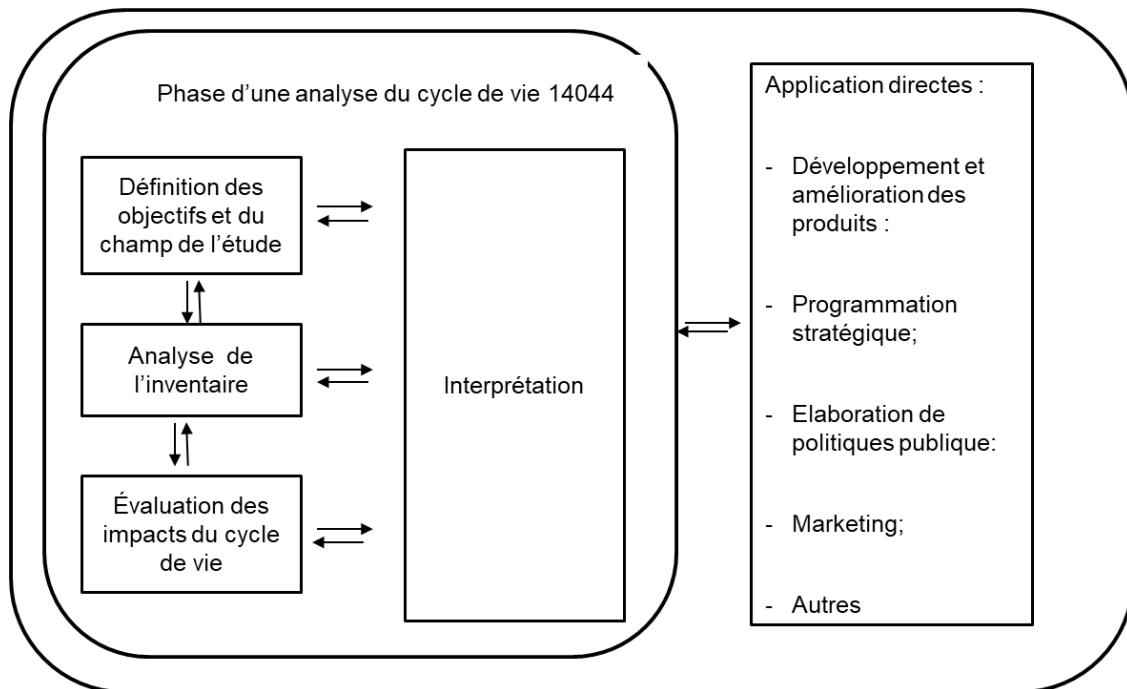
- Réaliser des études comparatives entre des systèmes ayant la même fonction,
- Identifier les étapes d'un processus qui entraînent le plus grand impact environnemental,
- Développer de nouveaux produits ou procédés,
- Mettre sur pied ou orienter des politiques publiques,



- Guider le choix des matières premières, des sources d'énergie, des types d'emballage, des filières de traitement des rejets.

### I. 7.2. Normalisation et phases d'une ACV

La méthodologie à employer lors de la réalisation d'une ACV a été normalisée à la fin des années 1990. Cette normalisation liste les définitions du vocabulaire dédié à la pratique de l'ACV, en fixe les phases de réalisation et décrit les éléments constitutifs de chacune d'elles.



**Figure 6:** Les phases d'une Analyse de Cycle de Vie (ISO 14044, 2006)

Elle formule également des recommandations pour la communication des conclusions d'une étude par ACV et la réalisation de la revue critique d'une telle étude. En accord avec le cadre méthodologique établi par la SETAC et l'organisation internationale de standardisation (ISO 14044, 2006), l'ACV est composée de quatre étapes (Figure 6) : (1) la définition des objectifs et du champ de l'étude ; (2) l'analyse de l'inventaire ; (3) l'évaluation des impacts du cycle de vie ; (4) l'interprétation des résultats et les recommandations émanant de l'étude.

### **I. 7.3. Limites de l'ACV**

La caractéristique essentielle de l'ACV est sa nature « holistique ». Elle est à la fois sa force majeure et, en même temps, sa limitation. En effet, cette exigence de globalité implique pour sa faisabilité un certain nombre de simplifications.

En outre, dans sa version de base, l'ACV met l'accent sur les aspects environnementaux des produits et n'évoque pas leurs caractéristiques économiques ni sociales. Les impacts environnementaux sont souvent décrits comme des « impacts potentiels », parce qu'ils ne sont pas spécifiés dans le temps et dans l'espace et qu'ils sont liés à une unité fonctionnelle souvent définie arbitrairement.

Ainsi, on dit que l'ACV a vocation à évaluer la capacité d'un système à causer des effets indésirables pour l'environnement (impacts potentiels) plutôt que la réalisation réelle de ces effets dans un environnement parfaitement identifié et spécifié (impacts réels).

Bien que l'ACV vise à s'appuyer sur des bases scientifiques, elle implique certaines hypothèses et des choix techniques. De plus les différents indicateurs de catégorie d'impacts ont des degrés de robustesse plus ou moins élevés. Notamment, il est reconnu que les indicateurs « toxicité humaine » et « écotoxicité » sont sujets à de très fortes incertitudes. Par conséquent, les résultats sur ces indicateurs doivent donc être interprétés avec la nuance requise.

Les limites d'ACV concernent non seulement l'état de l'art, mais aussi la disponibilité des données. En effet, les bases de données sont en cours d'élaboration dans divers pays, et le format des bases de données est en cours de normalisation. Mais dans la pratique, les données sont souvent obsolètes, incomparables, ou de qualité inconnue.

L'ACV est caractérisé comme étant un outil d'analyse dans la mesure où elle fournit des informations servant comme étant un support de décision. L'ACV ne peut pas remplacer le processus de prise de décision. En effet on ne peut pas dire : « L'ACV a prouvé que cette décision doit être prise ». Mais on dit plutôt « basé sur une étude de l'ACV et autres arguments de preuve, la décision suivante a été prise ».

Les limites de l'ACV telles que présentées ci-dessus peuvent être prises en compte en élargissant l'analyse et/ou en faisant appel à d'autres outils d'analyse. L'utilisation complémentaire de différents outils est impérative si on s'intéresse à d'autres aspects d'un nouveau produit, telles que

les aspects sociaux et économiques. Enfin, l'objectif est de fournir « une boîte » à outils qui offre des opportunités de différents types d'analyse, en rapport avec les besoins conformément aux circonstances étudiées. Les limitations décrites dans la section précédente se réfèrent non seulement à l'état de l'art des différents outils, mais aussi à la disponibilité des données correctes. Cette boîte à outils est donc un objectif à long terme, plutôt qu'à court terme. Néanmoins, le but de combiner l'utilisation de différents outils dans une situation de décision est valide et possible (**Zouhour, 2014**).

## **I.8. TOXICITE DES COMBUSTIBLES POUR LA CUISSON**

La consommation d'énergie et de combustibles est importante pour le bien-être des ménages dans le monde en général et les pays en développement. L'utilisation d'une source d'énergie pour l'éclairage et la cuisine est essentielle à la vie humaine et fait partie de ce qui a défini pour la première fois la race humaine comme distincte des animaux à l'époque préhistorique (**Ramus, 2003**). Dans le monde entier, environ 50% des ménages et 90% des ménages ruraux utilisent des combustibles solides pour la cuisson ou le chauffage, tels que le fumier, le charbon de bois, le bois ou les résidus de récolte. Lorsque ces combustibles sont utilisés dans des conditions peu ventilées et brûlés dans des feux ouverts ou des foyers inefficaces dans les ménages des pays en développement, la consommation de combustibles solides peut générer des niveaux de pollution d'air intérieure bien supérieurs à ceux des villes les plus sales (**Smith, 1993**). Bien que les biocombustibles constituent une source d'énergie domestique facilement accessible et abordable pour les populations rurales des pays en développement, sa combustion pose plusieurs risques pour l'environnement et la santé. Environ 3% de la charge mondiale de maladies est causée par la pollution intérieure, qui entraîne 1,6 million de décès prématurés chaque année (**OMS, 2002 ; Mishra, 2008**). Il a été démontré que la cuisson et la transformation des aliments à température élevée génèrent différents types de substances géno-toxiques ou toxiques pour la cuisson (**Wei and Seow, 2012**). Les émissions de fumée de biomasse ont des propriétés irritantes, inflammatoires et cancérigènes sur des systèmes in vitro due à la combustion incomplète produisant CO, NO<sub>2</sub>, volatiles (**Dherani et al., 2008**).

## **I.8.1. Toxicité liée à l'environnement de la cuisine**

Dans les foyers simples, les biocombustibles émettent des quantités importantes de polluants nocifs pour la santé, notamment des particules respirables, du monoxyde de carbone, des oxydes d'azote, du benzène, du formaldéhyde, du 1,3-butadiène et des composés poly-aromatiques (**Smith, 1987**). La dégradation thermique des matériaux peut se produire dans un certain nombre de conditions différentes, ce qui peut affecter le degré de dégradation de la matière. L'utilisation de la biomasse par combustion ou par d'autres procédés de conversion thermo-chimiques (à savoir la gazéification et la pyrolyse) est actuellement principalement utilisée pour la production de chaleur et d'électricité, mais aussi de plus en plus axée sur la production de combustible liquide. Outre les émissions de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz à effet de serre, les processus de combustion sont malheureusement aussi la source principale d'un grand nombre de nombreux polluants atmosphériques classiques qui posent un problème de santé environnementale, par exemple. SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, hydrocarbures et matières particulaires (PM). Aujourd'hui, on s'intéresse de plus en plus à la pollution atmosphérique par les particules liées à la combustion et à ses conséquences sur le réchauffement planétaire (**Ramanathan et al., 2001**) et sur la santé humaine (**Holgate et al., 1999**).

### **I. 8.1.1. Types de feux**

#### **I.8.1.1.1. Combustion enflammée, bien ventilée**

La décomposition thermique et la conversion chimique des matériaux dans un environnement « d'oxygène normal » en présence de flammes peuvent être décrites comme une combustion flamme bien ventilée. La combustion enflammée est la combustion très efficace de matériaux au-dessus de la température d'auto-inflammation en présence d'une quantité suffisante d'oxygène (**Norris et al., 1999**). La combustion complète se produit lorsqu'un matériau organique est transformé par oxydation en dioxyde de carbone et en eau uniquement dans un environnement riche en oxygène. La combustion enflammée d'un matériau dans un environnement d'oxygène normal produit une oxydation complète de ce matériau. Toutefois, dans la plupart des cas, le dioxyde de carbone et l'eau ne seront pas les seuls produits de combustion dans ces conditions, en raison de la présence d'autres éléments dans l'atmosphère et dans le matériau servant de combustible pour le feu. Par exemple, dans un environnement d'oxygène normal, l'azote de

l'atmosphère de combustion subira également une oxydation pour former du dioxyde d'azote. Initialement, dans des conditions de combustion bien ventilée, la production de fumée et de composés toxiques tend à être faible, des produits plus toxiques se formant au fur et à mesure que l'incendie se développe (**Department of Health, 1996**).

#### **I. 8.1.1.2. Combustion enflammée, par ventilation contrôlée**

La décomposition thermique et la conversion chimique des matériaux dans un environnement pauvre en oxygène en présence de flammes peuvent être décrites comme une combustion enflammée par la ventilation contrôlée. Les incendies contrôlés par la ventilation se produisent lorsque l'alimentation en air est restreinte par rapport à la quantité de combustible disponible pour la combustion. Les incendies par ventilation contrôlée peuvent être soit de petits incendies fermés, soit des incendies importants post- flashover. Le flashover est un terme souvent utilisé pour décrire la phase d'un feu lorsque tous les gaz et matériaux combustibles se trouvant à proximité s'enflamment simultanément. La réduction de l'oxygène présent dans ces types de feux conduit à la production de rendements élevés en monoxyde de carbone, en dioxyde de carbone, en acide cyanhydrique, en autres gaz organiques et inorganiques et en fumée (**Norris et al., 1999 ; Department of Health, 1996**).

#### **I.8.1.1.3. Pyrolyse oxydante (étouffée)**

La pyrolyse oxydante, également appelée combustion lente, peut être décrite comme la décomposition thermique et la conversion chimique de matériaux dans un environnement d'oxygène normal, mais en l'absence de flamme. La combustion étouffée progresse à un rythme beaucoup plus lent que la combustion enflammée, et le plus souvent implique un matériau combustible poreux et est entretenue par la chaleur dégagée lors de l'oxydation à la surface du combustible (**Ohlemiller, 2002**). La pyrolyse se produit à des températures beaucoup plus basses que la combustion enflammée et est généralement définie comme la dégradation thermique d'un matériau à une température inférieure à la température d'auto-inflammation (**Norris et al., 1999**). La combustion lente est une forme de combustion incomplète due aux températures plus basses impliquées et peut donc produire une quantité de produits toxiques beaucoup plus grande qu'une combustion enflammée (**Department of Health, 1996 ; Ohlemiller, 2002**).

#### **I.8.1.1.4. Pyrolyse anaérobie**

La pyrolyse anaérobie peut être décrite comme une dégradation thermique et une conversion chimique des matériaux dans un environnement pauvre en oxygène et l'absence de flamme (Norris *et al.*, 1999). Ce type de combustion peut être initié sous forme de pyrolyse oxydante, mais peut se poursuivre dans un environnement pauvre en oxygène, tel qu'il peut se produire suite à un épuisement de l'oxygène lors de la pyrolyse dans un compartiment fermé. Dans cette situation, plus la température de l'environnement de combustion est élevée, plus la quantité d'oxygène requise est faible. La pyrolyse anaérobie est similaire à la combustion lente, en ce sens que la conversion chimique est incomplète et produira par conséquent des quantités beaucoup plus importantes de produits toxiques que la combustion enflammée (Department of Health, 1996 ; Ohlemiller, 2002).

#### **I.8.1.2. Composition de fumées**

La composition de la fumée dans un environnement de combustion dépend d'un grand nombre de variables et peut être extrêmement complexe en raison de la nature dynamique d'un feu. Parmi les principaux facteurs pouvant influencer sur la composition de la fumée, citons la nature des combustibles impliqués (composition chimique, structure et formulation), le stade de combustion (combustion lente, ou post-flashover), la température de combustion, la disponibilité en oxygène et la ventilation dans l'environnement du feu (Tewarson, 1996 ; Norris *et al.*, 1999 ; Levin *et al.*, 2006).

### **I. 8.2. Produits toxiques communs de combustion**

Les produits gazeux formés lors de la combustion de la plupart des matières organiques peuvent être classés en deux catégories principales sur la base de leur toxicité. La première catégorie concerne les composants de la fumée d'incendie qui ont des propriétés asphyxiantes et également un appauvrissement en oxygène dû au feu lui-même (monoxyde de carbone CO, cyanure d'hydrogène HCN, dioxyde de carbone CO<sub>2</sub>). La deuxième catégorie concerne les composants de la fumée qui provoquent une irritation, soit comme irritants sensoriels des yeux et des voies respiratoires supérieures (nez, bouche et gorge), soit comme irritants des poumons, bien que dans de nombreux cas, une irritation sensorielle et pulmonaire puisse être présent simultanément. Ces produits sont des gaz acides inorganiques composés de chlorure d'hydrogène (HCl), de bromure

d'hydrogène (HBr), de fluorure d'hydrogène (HF), de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), de pentoxyde de phosphore (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) ; Les irritants organiques qui sont l'acroléine, le formaldéhyde et d'autres irritants inorganiques tels que l'ammoniac (NH<sub>3</sub>), le chlore, le phosgène (COCl<sub>2</sub>). Une troisième catégorie peut parfois être utilisée pour décrire des produits pouvant donner lieu à une toxicité contrairement à celle couverte par les deux catégories principales. Ce sont les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les dioxines / dibenzofuranes, les isocyanates, le perfluoroisobutylène (PFIB), les matières particulaires (PM) (**Hartzell, 1996**).

### **I. 8.3. Toxicité liée aux aliments cuits**

L'autosuffisance alimentaire est un défi important pour le développement de chaque pays. Cependant, plus que la disponibilité des aliments, la qualité des aliments devient préoccupante en ce qui concerne la diversité des maladies d'origine alimentaire. Outre la qualité de la matière première, la technologie de transformation est essentielle pour déterminer la qualité des produits finis (**Sengor et al., 2004 ; Olokor et al., 2007**). Les aliments peuvent être contaminés lors de traitements thermiques pendant des processus de préparation et de fabrication des aliments (séchage et fumage) et de la cuisson (rôtissage, cuisson au four et friture) (**Ishizaki et al., 2010**). Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) proviennent des vapeurs de cuisson et ont un impact plus important sur la santé humaine. (**Dherani et al., 2008**).

## CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES

### II.1. Production et caractérisation des briquettes

#### II.1.1. Production des briquettes à base de coques de riz

##### II.1.1.1. Matériel végétal

Deux types de résidus de riz ont été utilisés dans cette étude : La coque/ balle de riz pure (présentée à la Figure 7) et le mélange coque-son de riz provenant d'écortiqueuse à rouleaux de caoutchouc et Engelberg respectivement (Ndindeng *et al.*, 2014). La densité apparente de l'enveloppe était de 120 kg / m<sup>3</sup> et sa teneur en humidité était de 12,6%. Ces résidus proviennent d'Obala dans la région du Centre du Cameroun ; il est l'un des trois (3) grands bassins de production de riz au Cameroun. La coque de riz est constituée principalement de matière volatile de carbone et d'oxygène (Tableau VI).



Figure 7 : Coques de riz et mélange coque-son de riz

##### II.1.1.2. Liants utilisés

Les liants sont ajoutés aux matières premières qui ne peuvent pas à elles seules se densifier pour former des briquettes solides. L'ajout d'un liant améliore l'adhérence et la stabilité des briquettes. Il est établi que 6% à 25% du liant devrait être ajouté dans la matière première pour une qualité optimale des briquettes (Phonphuak et Thiansem, 2012).



**Tableau VI : Analyse ultime (% matière sèche) et valeur calorifique de la coque de riz (Jenkins et al., 1998)**

<b>Paramètres</b>	<b>Coques de riz</b>
<b>Teneur en humidité (%)</b>	12.6
<b>Matière volatile (%)</b>	63.52
<b>Cendres (%)</b>	20.26
<b>Carbone (%)</b>	38.83
<b>Oxygène (%)</b>	35.47
<b>Hydrogène (%)</b>	4.75
<b>Nitrogène (%)</b>	0.52
<b>Sulfure (%)</b>	< 0.2
<b>Chlore (%)</b>	< 0.2
<b>Valeur calorifique (MJ/kg)</b>	15.7 – 16.3

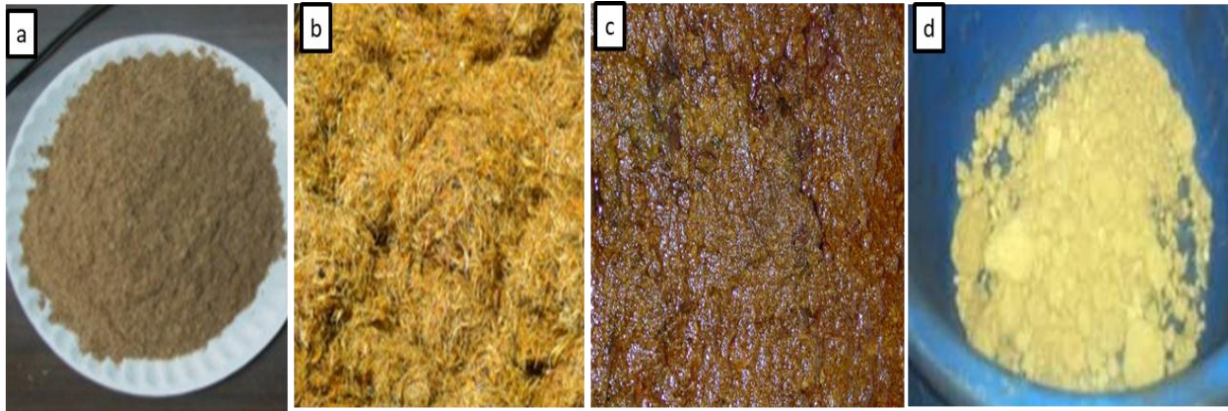
Le pourcentage de liant ajouté dans cette étude est de 10%. Les liants utilisés dans cette étude pour la fabrication des briquettes sont :

✓ **Le son de riz** : il est un des sous-produits de l'usinage du riz paddy (Figure 8a). Dépendamment de la décortiqueuse utilisée, il peut être produit seul ou associé à la coque de riz. La fraction utilisée dans cette étude est celle générée séparément de la coque de riz issue de la décortiqueuse à rouleaux de caoutchouc. Il provient tout comme les coques de riz, d'Obala dans la région du Centre du Cameroun.

✓ **Les fibres de noix de palme et la boue** issues de la presse de noix de palme (Figure 8b et c) : ils ont été collectés d'une d'extraction artisanale d'huile de palme à Makénéne dans la région du Centre du Cameroun. Ils sont généralement utilisés comme combustibles de la combustion du bois de chauffe dans les communautés rurales. Ils ont été ajoutés à la formulation des briquettes afin d'améliorer leurs caractéristiques de combustion.

✓ **L'argile** (Figure 8d) : L'argile est un matériau naturel composé principalement de minéraux à grains fins. Il se compose de minuscules particules ayant des propriétés plastiques et

adhésives.



**Figure 8 :** Différents liants utilisés dans la production des briquettes : a= son de riz ; b= Fibre de noix palme ; c= Boue issue de l'extraction de noix de palm ; d= Argile

### I.1.1.3. Différents types de briquettes produits

Le Tableau VII représente le matériel pour la production de quatre (4) types de briquettes en fonction des liants : CSF (Coque–Son de riz et Fibre de noix palme), CSB (Coque–Son de riz et Boue de noix palme), CS (Coque–Son de riz), CCA (Charbon de Coque de riz issu de la gazéification et Argile) ().

**Tableau VII:** Types de briquettes à base de coque de riz à produire.

Type de Briquette	Sous-produits de riz	Liants (10%)
CSF	Mélange Coque–Son de riz	Fibre de noix de palme
CSB	Mélange Coque–Son de riz	Boue issue de l'extraction de noix de palme
CS	Mélange Coque–Son de riz	/
CCA	Charbon de coque de riz issu de la gazéification	Argile

Légende : CSF : Coque–Son de riz et Fibre de noix palme, CSB : Coque–Son de riz et Boue de noix palme, CS : Coque–Son de riz, CCA : Charbon de Coque de riz issu de la gazéification et Argile.

### II.1.1.4. Construction et description de la briqueteuse

Une briqueteuse à presse hydraulique multi-pistons à neuf cylindres (Figure 9) a été construite par le Centre du Riz pour l'Afrique (AfricaRice). Tous les matériaux utilisés pour la construction ont été acquis auprès de vendeurs locaux. La pression totale (P) et la pression exercée sur chaque

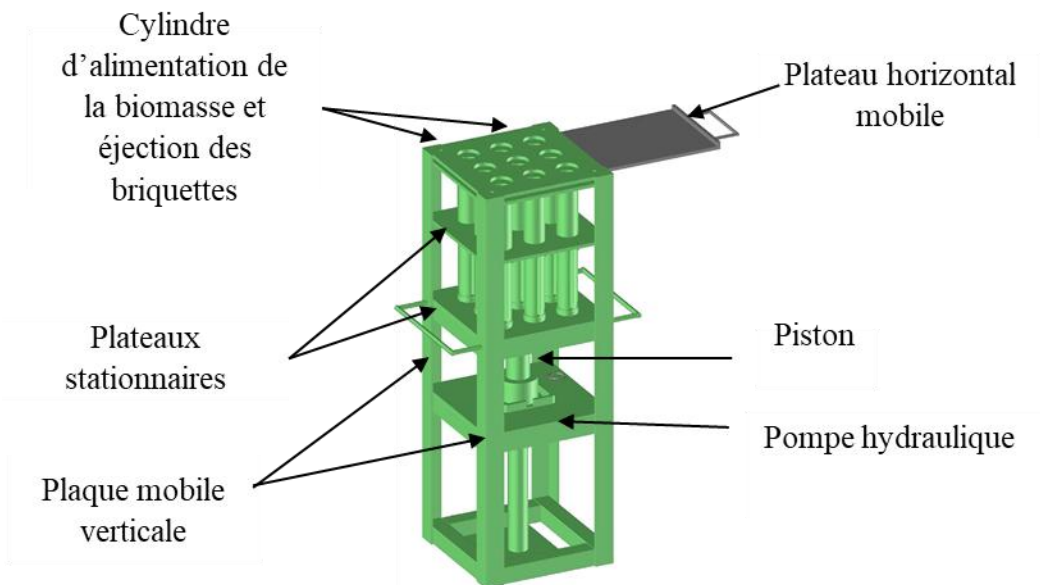
briquette (Pc) dérivent de l'équation (1) qui a ensuite été utilisé pour développer les équations. (2) et (3).

$$P = \frac{F}{S} \quad (1)$$

$$P = \frac{4F}{n(D^2 - d^2)} \quad (2)$$

$$Pc = \frac{P}{9} \quad (3)$$

Où F est la force en newtons, S est la surface totale en mètres carrés, D est le diamètre du cylindre en millimètres, d est le diamètre de la tige centrale dans le cylindre en millimètres et 9 est le nombre de cylindres de la machine.



**Figure 9** : Dessin technique de la briqueteuse

Les composants principaux de la briqueteuse (Figure 9) sont un vérin hydraulique, des plaques et un système de cylindres et de pistons. Tous ces éléments forment un cadre qui maintient l'ensemble. La force générée par la pompe hydraulique entraîne les pistons situés dans la plaque mobile verticale à travers les cylindres et comprime la biomasse dans les cylindres contre la plaque mobile horizontale. Lorsque le matériau à briqueter est placé dans les cylindres, le piston ascendant comprime le matériau contre la plaque mobile horizontale. Lorsque le matériau est

complètement comprimé, la pression exercée sur la plaque mobile horizontale est atténuée en relâchant légèrement la force appliquée par le vérin à l'aide de la clé de réduction de force. Cette action permet de retirer la plaque mobile horizontale en la faisant glisser. Les pistons sont ensuite pompés vers le haut pour libérer les briquettes. Les briquettes à ce stade sont molles et doivent être séchées pour les durcir. Cette méthode de collecte ascendante permet d'enlever facilement et en toute sécurité les briquettes maintenues dans cette position par les pistons et de les placer sur des plateaux de séchage. La force produite par le vérin est alors complètement relâchée à l'aide de la clé de relâchement de force et les ressorts tirent les pistons vers le bas en vue du chargement du prochain lot de matériau de briquetage. Et le cycle recommence.

#### **II.1.1.5. Préparation des différentes composantes de briquettes**

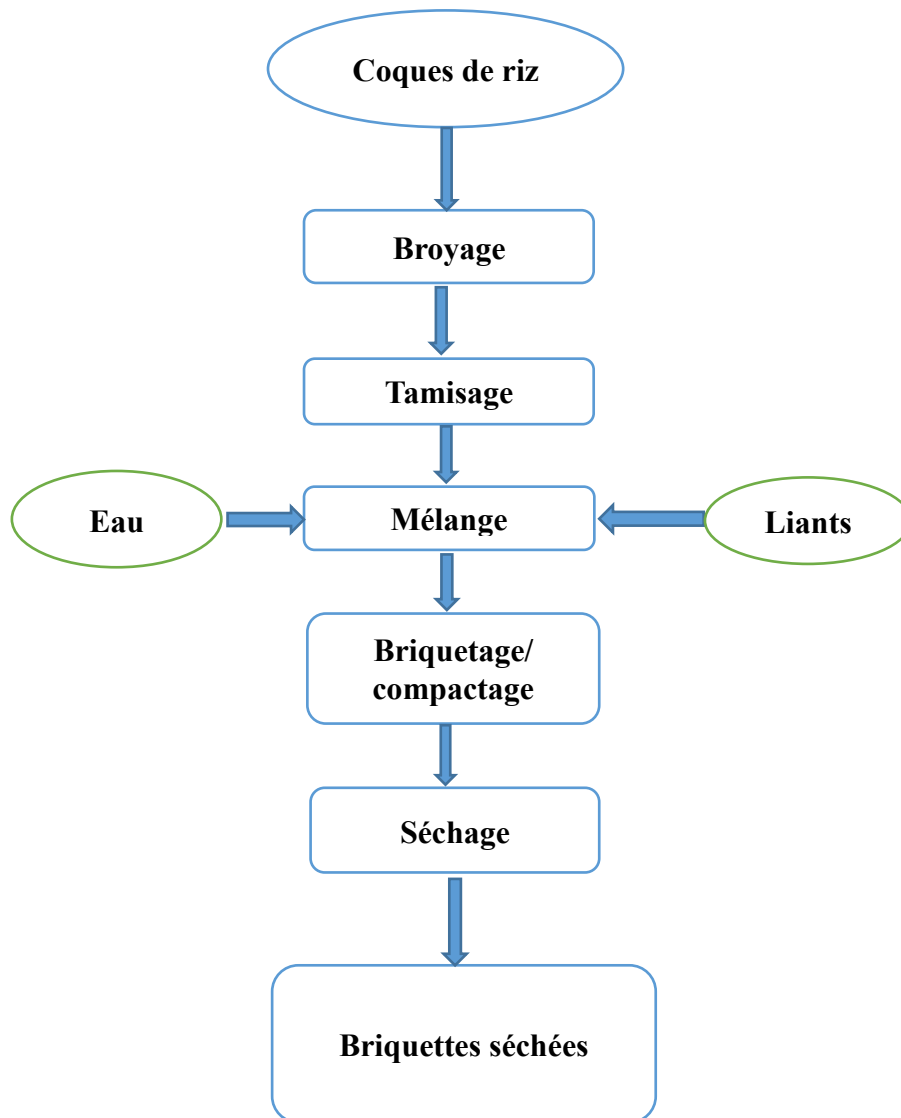
La coque, le mélange coque -son de riz et tous les liants ont été broyés et tamisés séparément à l'aide d'un broyeur à marteaux commercial afin de réduire la taille des particules. Chaque échantillon a été séparé en trois tailles de particules (particules de tailles larges avec  $P \geq 1$  mm ; moyennes avec  $P = 0,301$  à  $0,99$  mm ; fines avec  $P \leq 0,300$  mm) en utilisant des tamis de maillage  $M_1 < 1$ mm et le maillage  $M_2 < 0,3$ mm. Les échantillons ont d'abord été tamisés avec le maillage  $M_1 < 1$ mm, puis avec le maillage  $M_2 < 0,3$ mm. Les particules restant dans le tamis de maillage  $M_1$  étaient larges, alors que celles qui restaient dans le tamis de maillage  $M_2$  étaient de taille moyenne et celles qui passaient à travers le tamis  $M_2$  étaient les particules fines.

#### **II.1.1.6. Les étapes de fabrication des différents échantillons de briquettes**

Après le broyage et tamisage de toutes les composantes, le mélange biomasse a été constitué en ajoutant de l'eau à la biomasse dans un rapport pondéral de 3 : 5 (eau : biomasse) et en respectant certains paramètres présentés dans le Tableau VIII.

Pour les briquettes CSF et CSB et CCA, les facteurs optimisés étaient utilisés à savoir la taille des particules fine, l'eau bouillie, le séchage au soleil. Pour les briquettes CSF et CSB, 0,5 kg (donc 10%) de fibres ou de boues issues de la noix de palme ont été ajoutés Coque-Son (4,5 kg) de granulométrie fine ( $\leq 0,99$  mm), puis homogénéisés. Les briquettes de CCA ont été produites en ajoutant 0,5 kg (donc 10%) d'argile fine à 4,5 kg de charbon de riz issu de la gazéification, puis la même quantité d'eau chaude a été ajoutée et mélangée soigneusement. Le mélange a été ensuite homogénéisé à la main.

La Figure 10 est le diagramme schématique du processus de production des briquettes. Cinquante (50) grammes de chaque mélange ont été introduits dans chaque cylindre d'alimentation et la pression de 7,74 MPa est appliquée pour comprimer la biomasse. Les briquettes ont été ensuite éjectées après un temps de maintien de 30 s. Les briquettes obtenues sont alors transférées sur des plateaux et séchées jusqu'à une teneur en humidité de 20%.



**Figure 10** : Diagramme schématique du processus de production des briquettes

### II.1.1.7. Optimisation de la dureté des briquettes

Le processus d'optimisation visait à obtenir des briquettes suffisamment dures pour supporter le transport et la manutention. Plusieurs expériences ont été réalisées pour déterminer quelle combinaison des quatre paramètres à savoir le ratio coque – son (RCS) (1 :1, 1 :2, 1 :0, 0 :1, 2 :1), la méthode de séchage (MS) (au soleil ou au four), la taille des particules (TP) (Fine, Moyenne, large) et la température de l'eau (TE) (97 °C pour l'eau bouillie, 28 °C pour l'eau température ambiante) donnerait la briquette de meilleure dureté. Pour chacune de ces expériences, des classes variables et des facteurs fixes ont été sélectionnés (Tableau VIII).

**Tableau VIII:** Optimisation Sequentielle de la dureté des briquettes à base de coque de riz

Facteur à optimiser	Classe de variables	Paramètres fixes		
		Taille de particule	Température de l'eau	Méthode de séchage
<b>Ratio Coque–Son</b>	Ratio Coque–Son	Taille de particule	Température de l'eau	Méthode de séchage
	1 :1	Fine	97°C	Soleil
	1 :2	Fine	97°C	Soleil
	1 :0	Fine	97°C	Soleil
	0 :1	Fine	97°C	Soleil
<b>Méthode de séchage</b>	Méthode de séchage	Taille de particule	Température de l'eau	Ratio Coque–Son
	Four	Fine	97 °C	1 :1
	Soleil	Fine	97 °C	1 :1
	Soleil et Four	Fine	97 °C	1 :1
<b>Taille de particule</b>	Taille de particule	Température de l'eau	Ratio Coque–Son	Méthode de séchage
	Fine	97 °C	1 :1	Soleil
	Moyenne	97 °C	1 :1	Soleil
	Large	97 °C	1 :1	Soleil
<b>Température de l'eau</b>	Température de l'eau	Ratio	Méthode de séchage	Taille de particule
	97 °C	1 :1	Soleil	Fine
	28 °C	1 :1	Soleil	Fine

Légende : les Ratio Coque–Son 1 :1 ; 1 :2 ; 1 :0 ; 0 :1 ; 2 :1 correspondent aux proportions de coque et de son de riz respectivement dans le mélange.

### II.1.2. Caractérisation des briquettes

La performance des briquettes a été déterminée à partir des paramètres physiques, physico-chimiques et du pouvoir calorifique.

### II.1.2.1. Paramètres physiques et physicochimiques

#### II.1.2.1.1. Détermination de la dureté des briquettes

La dureté des briquettes a été déterminée l'aide d'un texturomètre Kiyatesteur (Fujirara Seisakusho, Ltd., Tokyo, Japon). La dureté d'une briquette est la force nécessaire pour casser une briquette de 20 mm d'épaisseur à l'aide d'un piston de 5 mm de diamètre (Ndindeng *et al.*, 2015). La dureté des briquettes a été déterminée à une teneur en humidité de 20%, généralement après 7 jours pour les échantillons séchés au four et 21 jours pour les échantillons séchés dans les conditions ambiantes.

#### II.1.2.1.2. Détermination du facteur de densification

Ce paramètre a été déterminé selon la méthode décrite par Oyelaran *et al.*, (2014). Un poids égal de coque ou charbon de coque de riz a été placé dans une éprouvette graduée, puis agité pour éliminer les vides et le volume a été mesuré. La longueur, le diamètre (r) et la hauteur (h) de la briquette ont été mesurés à l'aide d'un pied à coulisse. Les densités de la briquette ( $D_b$ ) et de la coque de riz ( $D_c$ ) ont été déterminées à partir des équations d'équivalence (5) et (6), respectivement.

$$Densité\ de\ la\ briquette\ (D_b) = \frac{M_b}{\pi h(r_1^2 - r_2^2)} \quad (5)$$

$$Densité\ de\ la\ coque\ (D_c) = \frac{M_c}{V_c} \quad (6)$$

Où  $M_b$ ,  $M_c$  et  $V_c$  sont les masses des briquettes, de coque de riz et volume de coque de riz respectivement.

#### II.1.2.1.3. Détermination de la teneur en eau

##### - Principe de la méthode

Le taux d'humidité d'une briquette combustible représente sa teneur en eau par rapport à sa masse humide. Il est à noter que le séchage des briquettes ne peut pas éliminer toute la quantité d'eau contenue dans une briquette. D'où l'humidité obtenue ici est la quantité d'eau restante après séchage des briquettes. C'est un paramètre déterminant pour la combustion des briquettes : s'il est élevé, la combustion est quasi-impossible.

La teneur en eau a été déterminée par la méthode décrite par **A.O.A.C. (2002)**. Elle est basée sur la perte en masse des échantillons après étuvage à 105 °C, jusqu'à obtention d'une masse constante.

#### **- Mode opératoire**

Le poids des briquettes a été enregistré quotidiennement pendant 7 jours pour les échantillons séchés à l'étuve (70° C) et pendant 21 jours pour les échantillons séchés à l'air ambiant (température = 16°C à 34 ° C ; humidité relative = 41% à 100%).

Précisément 42 à 45 g de briquettes fraîches ont été pesés ( $M_0$ ) à l'aide d'une balance de marque « Precisa » (sensibilité 1/10 000). Elles ont été mises à sécher dans une étuve de marque « Memmert » à une température de 105 °C. Les pesées ont été régulièrement faites jusqu'à obtention d'un poids constant. Les briquettes ont été refroidies dans l'atmosphère d'un (7) dessiccateur contenant le  $P_2O_5$  comme desséchant pendant 1 h et pesé ( $M_t$ ). Trois essais sont faits à chaque fois et la teneur en eau est la moyenne des teneurs déterminées selon la formule suivant l'équation (7) :

$$M_b = \frac{M_0 - M_t}{M_0} \times 100$$

Où  $M_b$  est le pourcentage d'humidité,  $M_0$  la masse immédiatement après l'éjection de la briquette de la machine et  $M_t$  la masse de la briquette après séchage pendant un temps  $t$ .

#### **II.1.2.1.4. Détermination de la teneur en lipides totaux**

##### **- Principe**

Les lipides totaux ont été déterminés par la méthode décrite par **A.O.A.C. (2002)**. Cette méthode repose sur la solubilité différentielle qu'ont les lipides dans certains solvants organiques comme l'hexane ou l'éther de pétrole. Les lipides sont extraits à chaud dans de l'hexane par reflux continu pendant 8h de temps. Après évaporation du solvant, les lipides extraits sont récupérés et pesés.

##### **- Mode opératoire**

Précisément 5 g de matière sèche ( $P_0$ ) ont été soigneusement emballés dans une cartouche de cellulose. L'ensemble a été introduit dans l'extracteur de l'appareil de Soxhlet monté sur un



ballon taré et contenant 3 billes de verre. Le solvant (hexane) a été mis dans l'extracteur jusqu'au siphonage. Une quantité supplémentaire de solvant a été ajoutée dans l'extracteur jusqu'à la moitié du niveau de siphon. Le réfrigérant a été monté sur (8) l'extracteur et le ballon a été chauffé pendant 8 h. Son contenu a été concentré sur un évaporateur rotatif, puis il a été mis à sécher à l'étuve à 65 °C pendant 24 h. Soient  $P_1$  le poids du ballon + billes de verre avant extraction et  $P_2$  le poids du ballon + billes de verre + lipides après extraction. La teneur en lipides est donnée par la relation qui suit :

$$\textit{Teneur en lipides (g par 100g de MS)} = \frac{P_2 - P_1}{P_0} \times 100$$

#### II.1.2.1.5. Détermination de la teneur en cendres par incinération au four

##### - Principe de la méthode

Le taux de cendres représente la quantité des matières minérales contenues dans un combustible. Il est important pour l'appréciabilité du combustible du fait que quand il est très élevé, ces cendres deviennent obstacle à la progression de la combustion. La teneur en cendres a été déterminée par la méthode décrite par **A.O.A.C. (2002)**. Il s'agit d'une incinération de la matière lyophilisée à 550 °C jusqu'à l'obtention de cendres au bout de 24 h. La teneur en cendres est obtenue par la différence entre les poids avant et après incinération.

##### - Mode opératoire

Une capsule en aluminium est marquée et sa masse ( $P_1$ ) est déterminée, environ 100g de matière ( $P_0$ ) de la briquette est déposé dans la capsule puis l'ensemble est déposé au four à 550 °C pendant 24 h. A la sortie du four, la capsule contenant la cendre est refroidie dans un dessiccateur pendant 30 min et son poids  $P_2$  est noté après refroidissement. La teneur en cendres est donnée par la formule suivante :

$$\textit{Teneur en cendres (g par 100g de MS)} = \frac{P_2 - P_1}{P_0} \times 100 \quad (9)$$

#### II.1.2.2. Tests de combustion des différents échantillons de briquettes

L'objectif était d'apprécier la combustion des briquettes produites. Il s'agissait de comparer le temps mis par ces briquettes pour bouillir une même quantité d'eau. Il s'agissait notamment du rendement thermique qui a trait à l'efficacité du foyer et à la quantité réelle de combustible

consommée, la puissance du feu, la durée du mijotage et le temps d'ébullition spécifique. Le foyer utilisé est celui à briquettes et à charbon SALMAR (Figure 11). Le charbon de bois a été utilisé comme combustible de référence. La quantité de combustible (briquettes et charbon) utilisée pour chaque test est de 4 kg et chaque test a été réalisé en triple.



**Figure 11** : Combustion des briquettes dans le foyer SALMAR

### **II.1.2.3. Paramètres de combustion des différents échantillons de briquettes**

Les paramètres suivants : pouvoir calorifique inférieur (PCI), La vitesse de combustion et la consommation de combustible spécifique ont été déterminées au cours de la phase de démarrage à froid haute puissance du protocole test d'ébullition de l'eau (TEE) version 4.2.2 (**Bailis et al., 2003**) avec de légères modifications. La modification portait sur le volume d'eau utilisé (10 L) et le point d'ébullition local (99 ° C).

#### **II.1.2.3. 1. Pouvoir calorifique**

##### **- Principe**

Le pouvoir calorifique d'un combustible représente la quantité d'énergie contenue dans une unité de masse de ce combustible. Elle s'exprime en termes d'énergie par unité de masse (pour les solides : MJ/Kg) et par unité de volume (pour les gaz : MJ/m<sup>3</sup>).

On parle de « pouvoir calorifique inférieur (PCI) », lorsque la combustion s'effectue à une pression constante c'est-à-dire à l'air libre. C'est à dire que la chaleur latente (qui est difficilement récupérable) de la vapeur d'eau n'est pas récupérée à ce moment (**ADEME, et al., 2001**). C'est cette valeur du PC qui est récupérable comme énergie par l'utilisateur.

## - Mode opératoire

Le PCI est déterminé à l'aide d'une bombe calorimétrique (Parr 1341 EB, thermomètre calorimètre 6772, IL, USA) en présence d'oxygène et un suivi de température à chaque 30 secondes doit être assuré jusqu'à la stabilisation. Sa détermination suit la norme D5865-11a (ASTM, 2010) de la « American Society for Testing and Materials » (ASTM).

### II.1.2.3.2. Temps de démarrage et température de la flamme

Le temps de démarrage est le temps qui s'est écoulé avant que la température de la flamme n'atteigne 400 ° C après l'allumage.

Pour chaque type de combustible, la température de la flamme a été déterminée en brûlant 4 kg de combustible dans le foyer à briquettes SALMAR. La température de la flamme a été enregistrée toutes les 5 min pendant 55 min à l'aide d'un double thermomètre traçable (VWR-USA) équipé de sondes thermiques (Figure 12) qui peut résister à 1200 ° C.



**Figure 12** : Double thermomètre traçable (VWR-USA) équipé de sondes thermiques

### II.1.2.3.3. Le test d'ébullition de l'eau

#### 1) Définition

Le Test d'Ébullition de l'Eau (TEE) est une simulation simplifiée du processus de cuisson. Il vise à mesurer l'efficacité avec laquelle un foyer utilise du combustible pour chauffer de l'eau dans une marmite et mesurer la quantité des émissions de fumées produites pendant la cuisson. Ce test comporte trois phases :

- **Phase 1** : première phase dite de haute puissance (démarrage à froid) : les tests commencent avec un fourneau à température ambiante et en utilisant une quantité prédéfinie de combustible pour porter une quantité déterminée d'eau à ébullition le plus rapidement possible à partir de l'allumage des briquettes ;
- **Phase 2** : phase dite aussi de haute puissance (démarrage à chaud) : exécutée immédiatement après la première phase avec de l'eau froide pendant que le fourneau est complètement chauffé. Cette phase permet de montrer les différences de performances entre un fourneau en régime de mise en route et en exploitation (fourneau froid et chaud) ;
- **Phase 3** : phase de basse puissance, dite de mijotage. Elle suit immédiatement la seconde. On détermine au préalable une quantité de combustible requise pour amener une quantité d'eau mesurée tout juste au point d'ébullition et maintenir la température de l'eau entre le point d'ébullition et 100°C pendant 45 minutes. Cette phase permet de simuler la cuisson longue des aliments afin de déterminer la quantité de combustible consommée.

## 2) Procédure du test d'ébullition de l'eau

Elle a été menée selon la méthode décrite par **Bailis et al., 2009**. Une fiche a été établie pour noter les différentes données. Pour chaque phase du test, on a procédé de la façon suivante : quatre (4) kg de briquettes ont été pesés pour la durée du test (fci). La marmite vide (P), la marmite contenant dix litres (10 L) d'eau (Pci) devant servir à l'expérience ont également été pesés. A la fin de l'expérience, la quantité de briquettes restantes (fcr), la marmite contenant l'eau (Pcr) et les cendres ont été pesés. Les paramètres de température (T) à chaque cinq minutes, jusqu'à atteindre la température limite correspondant au point d'ébullition, les températures initiales (Tci) et finale de l'eau (Tcr), le temps initial (tei) et le temps final (tcr) du test ont été relevés.

Pendant le test à haute puissance, on peut déterminer les quantités de briquettes à base de balles de riz consommées, d'eau vaporisée, d'eau restante, la durée du test, l'efficacité thermique, le taux brûlant, la consommation spécifique et la puissance du feu.

### a. Temps d'ébullition

C'est la différence entre les temps de début et de fin d'ébullition. Il est exprimé en minutes.

$$\Delta t_c = t_{cf} - t_{ci}$$

Où  $\Delta t_c$  : la différence entre les temps de début et de fin d'ébullition ;  $t_{cf}$  temps de fin d'ébullition et  $t_{ci}$  de début d'ébullition.

#### b. Efficacité thermique :

Il s'agit du rapport entre le travail effectué en chauffant ( $\Delta E_{H_2O,heat}$ ) et en évaporant ( $\Delta E_{H_2O,evap}$ ) de l'eau et l'énergie consommée en brûlant ( $E_{consom}$ ) du combustible. C'est une estimation de l'énergie totale produite par le feu qui sert à chauffer l'eau dans la marmite. Il est calculé de la manière suivante :

$$h_c = \frac{\Delta E_{H_2O,heat} + \Delta E_{H_2O,evap}}{E_{consom}} \quad (11)$$

Où  $h_c$  : Efficacité thermique.

#### c. Quantité de briquettes à base coques de riz consommée

La quantité de briquettes à base de combustible consommée est donnée par la différence des masses de briquettes pesées avant et après le test. Elle correspond à la masse de briquettes qui ont été utilisées pour faire bouillir l'eau et la maintenir en ébullition.

$$f_{cm} = f_{ci} - f_{cf} \quad (12)$$

Avec  $f_{cm}$  : poids de combustible consommé,  $f_{ci}$  : poids initial de combustible et  $f_{cf}$  : poids final de combustible.

#### d. Vitesse de combustion

Le taux de combustion est une mesure du taux de consommation de combustible pour faire bouillir de l'eau. Il est calculé en divisant l'équivalent de combustible sec consommé par le temps de l'essai.

$$R_{cb} = \frac{f_{cm}}{\Delta t_c} \quad (13)$$

Où  $R_{cb}$  : Le taux de combustion ;  $f_{cm}$  : poids de combustible consommé ;  $\Delta t_c$  : la différence entre les temps de début et de fin d'ébullition

#### e. Consommation spécifique de combustible

Elle détermine la quantité de combustible exigé par le fourneau pour porter un litre d'eau à ébullition. Elle est égale à la quantité de combustible équivalent- sec utilisée moins l'énergie du charbon de bois restant, divisée par le nombre de litres d'eau restant à la fin de l'essai. De cette façon, le (14) combustible utilisé pour produire un litre utile de « nourriture » et le temps pour le faire est calculé. La consommation spécifique de combustible est mesurée lors de phase de basse- puissance, et est rapportée en (g de combustible/ Litre d'eau). Elle est donnée par l'expression suivante :

$$SC_c = \frac{f_{cm}}{w_{cr}}$$

Avec  $SC_c$ : La consommation spécifique de combustible ;  $f_{cm}$  : poids de combustible consommé ;  $w_{cr}$  - La masse effective d'eau bouillie restante à la fin de l'essai.

#### f. Puissance de feu (Firepower)

Il s'agit de l'énergie consommée pour faire bouillir l'eau divisée par le temps qu'il faut pour la faire bouillir. Il indique la puissance moyenne du foyer (en watts) lors du test de puissance élevée :

$$FP_c = \frac{f_{cm} \times LHV}{\Delta t_c \times 60} \quad (15)$$

Avec  $FP_c$ : la puissance de feu ;  $f_{cm}$  : poids de combustible consommé ; LHV : Valeur de chauffage la plus basse ;  $\Delta t_c$  : la différence entre les temps de début et de fin d'ébullition

#### g. Le taux de rabattement (Turndown Ratio)

Le taux de rabattement (TDR) est le rapport entre la puissance de feu à la phase de haute puissance et la puissance de feu à la phase de mijotage. Il représente le degré de contrôle de la puissance de feu du foyer par l'utilisateur.

$$TDR = \frac{FP_c}{FP_m} \quad (16)$$

Avec TDR : taux de rabattement ;  $FP_c$  : la puissance de feu à la phase de haute puissance et  $FP_m$  : puissance de feu à la phase de mijotage

## II.2. Comparaison entre des propriétés de combustion des briquettes à base de coque de riz, les gazéificateurs à coque de riz pure et les combustibles traditionnels

### II.2.1. Les foyers utilisés

Cinq (5) types de gazéificateurs à lit fixe et à contre-courant [Rua (R), Viet (V), Paul Olivier 150 (PO150), Paul Olivier 250 (PO250) et Mayon (M)], dont les technologies sont acquises de l'Asie du Sud-Est (Figure 13). Les gazéificateurs, R, V, PO150 et PO250, sont des gazéificateurs de deuxième génération qui n'avaient pas encore été introduits en Afrique, alors que le gazéificateur M a été introduit en Afrique de l'Ouest et de l'Est. Ils ont été reproduits par le Centre Africain



pour le Riz (AfricaRice Center).

**Figure 13 :** Gazéificateurs à coques de riz

Légende : R : Rua ; V : Viet ; PO150 : Paul Olivier 150 ; PO250 : Paul Olivier 250 ; M : Mayon.

Les gazéificateurs R, V et PO fonctionnent sur un système à ventilation forcée, tandis que M fonctionne sur un système à ventilation naturel. Les caractéristiques de chaque gazéificateur sont indiquées dans le Tableau IX et la Figure 13.

- **Le foyer Rua (R) :** Il s'agit d'un foyer à gazéification cylindrique assisté par ventilateur qui utilise un ventilateur de suralimentation d'incendie 12 V BBQ-Dragon (BBQ Dragon, Chine). Le lit de gazéification et la chambre d'isolation sont en acier inoxydable, le matériau isolant étant de la fibre de verre. La chambre d'alimentation en air primaire a une hauteur de 9 cm et est séparée du lit de gazéification par une plaque perforée de 6 mm de diamètre. L'apport d'air secondaire entre par une seule rangée de pores à la partie supérieure de la chambre de gazéification. Le brûleur est une plaque semblable à un évent avec un orifice de 12 cm à travers lequel la flamme passe et entre en contact avec la marmite. Cette plaque possède également des supports qui maintiennent la marmite en équilibre.
- **Le foyer Viet (V) :** C'est d'un foyer à gazéification cylindrique assisté par ventilateur qui utilise un ventilateur de suralimentation 12 V BBQ-Dragon (BBQ Dragon, Chine). Il a une chambre d'isolation et un support pour améliorer la stabilité. Le lit de gazéification et la chambre d'isolation sont en fonte, le matériau isolant étant de l'air. Le lit de gazéification a une hauteur de 9 cm avec un seul trou de 10 mm au milieu de la plaque inférieure du lit cylindrique qui sert à l'alimentation en air primaire. L'apport d'air secondaire passe par une seule rangée de pores de 6 mm de diamètre qui sont situés à 10 cm du fond du lit de gazéification cylindrique. Le lit de gazéification est amovible et se trouve à l'intérieur d'une chambre à air située entre le lit de gazéification et la chambre d'isolation. Le brûleur est un évent avec un orifice de 19 cm à travers lequel la flamme passe et entre en contact avec la marmite. Cette plaque a également des supports qui maintiennent la marmite en place.
- **Paul Olivier 250 (PO250) :** Il s'agit d'un foyer à gazéification cylindrique assisté par ventilateur qui utilise un ventilateur de suralimentation 12 V SanAce40 (Sanyo Denki, Philippines). Le foyer n'a qu'un lit de gazéification en acier inoxydable sans chambre d'isolation. La chambre d'alimentation en air primaire a une hauteur de 9 cm et est séparée du lit de gazéification par une plaque perforée de 7 mm de diamètre. Le brûleur est une plaque avec deux rangées de pores de 6 mm à la partie la plus externe de la



plaque qui scelle le haut de la chambre de gazéification. Cette plaque est maintenue par un cylindre court qui s'adapte sur la chambre de gazéification et contient des espaces qui permettent au passage de l'air secondaire de rencontrer les gaz s'échappant à travers des pores de la plaque. Ce cylindre court possède également des supports qui maintiennent la marmite en place.

- **Paul Olivier 250 (PO250)** : C'est le plus grand modèle de PO150, il fait deux fois la taille de PO150.
- **Le foyer Mayon (M)** : C'est un foyer à gazéification utilisant la ventilation naturelle de l'air ambiant. Le foyer a un lit de gazéification cylindrique et une chambre de rétention de combustible en forme de cône inversé, tous deux en fonte. Le brûleur est semblable à un évent avec des supports qui soutiennent la marmite.

**Tableau IX:** Description des différents gazéificateurs à coques de riz

Type gazéificateurs	Volume du lit (m <sup>3</sup> )	Quantité Maximum de coque de riz (kg)	Mode de remplissage	Temps total consommation CR (min)	Vitesse optimale de l'air (m <sup>2</sup> /s)
<b>R</b>	0,0154	1,500	Intermittent	85	1,81
<b>V</b>	0,0092	0,976	Intermittent	28	2,05
<b>PO150</b>	0,0065	0,776	Intermittent	30	3,22
<b>PO250</b>	0,0211	2,224	Intermittent	25	4,69
<b>M</b>	0,0085	4,000	Continu	30	Naturel

Légende: R: Rua; V: Viet; PO150: Paul Olivier 150; PO250: Paul Olivier 250; M: Mayon

En plus des cinq (5) précédents, quatre (4) autres foyers (Figure 14) fonctionnant en mode de remplissage en continu à combustible traditionnel (charbon, bois, coques de noix de palme) ont été utilisés comme témoins. Ces foyers sont : Salmar (SBC), Nansu (NAC), Trépied (TCN) et Trois Pierres (TPB) utilisant les briquettes, le charbon, les coques de noix de palme et le bois



respectivement.

### **Figure 14 : Foyers à combustibles traditionnels**

Légende : Salmar -Briquelette (SAB), Nansu -Charbon (NAC), Trépied -Coques de Noix de palme (TCN) et Trois Pierres -Bois (TPB).

## **II.2.2. Métrique thermique**

La version 4.2.2 du protocole TEE (**Bailis et al., 2009**) a été utilisée pour évaluer de manière comparative les performances thermiques des cinq gazéificateurs de balle de riz avec de légères modifications. En résumé, le volume d'eau utilisé était de 5 litres et le point d'ébullition local était de 99 ° C. Le temps d'allumage de chaque foyer était de 50 secondes et le comburant était de 30 ml de kérosène. Les trois phases du test TEE [(test de puissance élevée (démarrage à froid), test de puissance élevée (démarrage à chaud) et test de puissance réduite (mijotage)] ont été réalisées sur tous les foyers utilisant de la balle de riz comme combustible. Les données ont été entrées dans la feuille de calcul du TEE, version 4.2.2 (**Aprovecho Research Center, 2013**). La vitesse de combustion, la puissance de feu, le taux de retournement, le temps d'ébullition, la consommation spécifique de combustible et l'efficacité thermique de chaque gazéificateur de balle de riz ont été générés (voir sous-section II.1.2.4.). La valeur calorifique supérieure (PCI) pour la balle de riz et le charbon utilisés pour les calculs de mesures thermiques étaient respectivement de 16 100 et 9 660 kJ / kg. La teneur en humidité de la balle de riz utilisée était de 12,6%.

## **II.2.3. Détermination de la température de la flamme**

La température de la flamme a été déterminée pour les foyers à coques de riz pures (R, V, PO150, PO250, M) et les briquettes de type CS brûlées dans le foyer SALMAR. Cette analyse s'est faite en utilisant la méthode décrite dans la sous-section II.1.2.4. 2.

## **II.2.4. Évaluation des foyers par l'utilisateur final**

Un total de neuf (9) foyers ont été utilisés pour cette évaluation ; R, V, PO150, PO250, M, SAB, NAC, TCN et TPB. Chaque foyer fonctionne à combustible correspondant. Précisément, les cinq premiers R, V, PO150, PO250, M fonctionnent aux coques de riz, SAB aux briquettes, NAC au charbon, TCN à la coque de noix palme et TPB au bois. Neuf (9) groupes de femmes, avec deux

femmes par groupe, ont été créés et attribués au hasard aux différents foyers. Chaque foyer a été utilisé trois fois lors de différentes sessions par différents groupes de femmes.

Le protocole de test de cuisson contrôlée (TCC) (**Bailis, 2009**) a été utilisé pour cette évaluation. Un kilogramme (1kg) de riz blanc a été cuit sur chaque foyer dans les mêmes conditions afin de les évaluer. Le Tableau X présente les critères d'évaluation des foyers, les échelles et les descripteurs correspondants. Ces critères incluent le fonctionnement, la portabilité, la vitesse de cuisson, les émissions de fumée, la sécurité, la hauteur du foyer, l'intensité de la flamme, le temps de démarrage, l'odeur de fumée, la qualité du matériau du foyer, la stabilité, remplissage de combustible et l'acceptabilité globale du foyer. Une échelle de 5 points a été utilisée pour noter chaque critère.

**Tableau X:** Les critères d'évaluation des foyers et leurs descripteurs

N°	Critères d'évaluation	Echelle				
		1	2	3	4	5
1	<b>Fonctionnement</b>	Très difficile	Difficile	ND/NF	Facile	Très facile
2	<b>Portabilité</b>	Très difficile	Difficile	ND/NF	Facile	Très facile
3	<b>Hauteur du foyer</b>	Trop haut	Haut	Hauteur parfaite	Bas	Trop bas
4	<b>Vitesse de cuisson</b>	Très lent	Lent	Ok	Rapide	Très rapide
5	<b>Intensité de la flamme</b>	Très pauvre	pauvre	Ok	bonne	Très bonne
6	<b>Sécurité</b>	Très dangereux	Dangereux	Ok	Sûr	Très sûr
7	<b>Stabilité</b>	Très instable	Instable	Ok	Stable	Très stable
8	<b>Emission de fumée</b>	Beaucoup trop de fumée	Trop de fumée	Un peu de fumée	Très peu de fumée	Pas de fumée
9	<b>Qualité du matériau du foyer</b>	Très pauvre	pauvre	Ok	bonne	Très bonne
10	<b>Temps de démarrage</b>	Très court	Court	Ok	Long	Très long
11	<b>Odeur de fumée</b>	Extrêmement mauvais	Très mauvais	Mauvais	Légèrement mauvais	Aucune
12	<b>Remplissage</b>	Intermittent	-	-	-	Continu
13	<b>Acceptabilité globale du foyer</b>	N'aime pas du tout	N'aime pas	ND/NA	Aime	Aime beaucoup

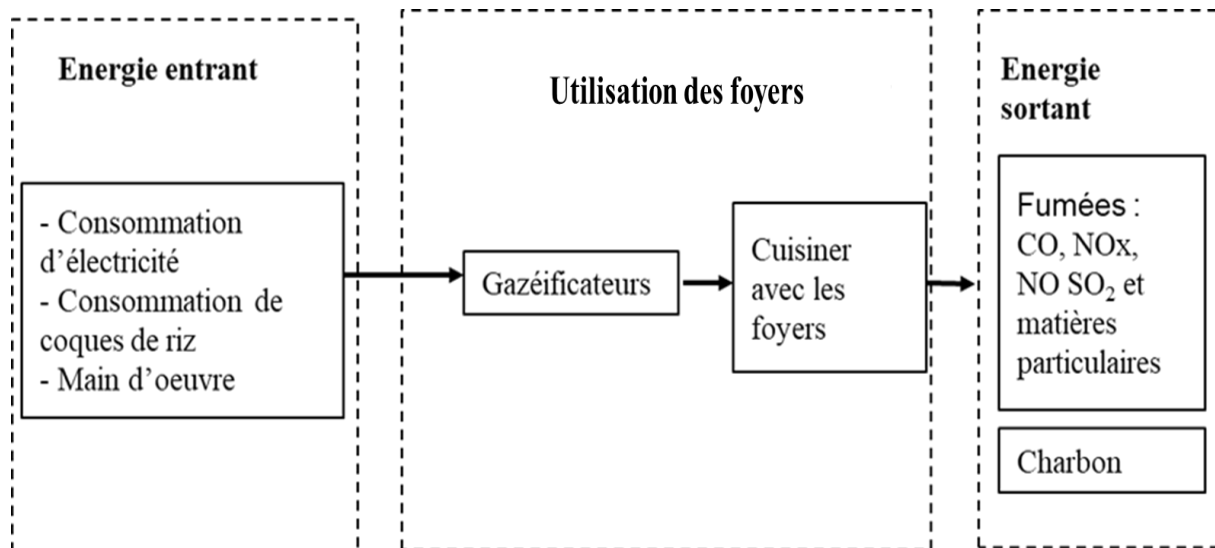
Légende : ND/NF- ni difficile, ni facile ; ND/NA- ni déteste, ni aime

### II.3. Analyse du Cycle de Vie (ACV) des gazéificateurs à coques de riz

Une analyse physique et chimique des cinq (5) gazéificateurs a été menée afin de démontrer lequel des foyers de cuisson à gazéification utilisant les coques de riz pures sont écologiquement durables en termes de demande d'énergie cumulée et d'impact sur la santé humaine et l'environnement par le logiciel SimaPro 8. Cette analyse a été faite en se basant sur la méthode décrite par (Mark Jacob *et al.*, 2016). Dans un premier temps, certains paramètres de construction ont été évalués tels que le travail manuel (temps passé pour le soudage par un artisan) et la quantité de matériau que nécessitaient chacun des foyers. Les paramètres d'utilisation des foyers pour la cuisson du riz et la sauce ont aussi été évalués, notamment la quantité de coque de riz, le temps passé pour la cuisson et l'énergie utilisée pour la cuisson. Dans un second temps, nous avons caractérisé et mesuré la composition des fumées (CO, NO<sub>x</sub>, NO et SO<sub>2</sub>) émises et charbons générés pendant et à la fin de l'utilisation des foyers. Enfin, ces données de construction et utilisation de chacun des foyers ont été introduites dans le logiciel SimaPro 8.5.2.0 pour la modélisation de leur impact.

### **II.3.1. Caractérisation des paramètres de construction et d'utilisation des gazéificateurs**

Pour chacun des 5 foyers (R, V, PO150, PO250, M), les dimensions et les matériaux ont été enregistrés et saisis dans AutoCAD 2020. Ces informations ont été utilisées pour produire des dessins techniques et générer la liste des matériaux et quantités nécessaires à la construction. Pour la phase d'utilisation des foyers pour préparer le 1 kg de riz et la sauce tomate, les éléments d'entrée des différents types de foyers étaient la quantité de coque de riz, le travail humain pour la cuisson (ceci était basé sur le temps total passé par la cuisinière à cuire le riz et la sauce tomate). Et comme élément de sortie de ce système, il y'avait la fumée (CO, NO<sub>x</sub>, NO, SO<sub>2</sub> et matières particulaires) et le charbon généré au cours de l'utilisation des foyers (Figure 15).



**Figure 15** : Schéma représentatif des éléments entrants et sortants du système d'utilisation des gazéificateurs

### II.3.2. Analyse des flux gazeux (FG) et des matières particulaires (MP) issus des gazéificateurs à coques de riz purs

Le flux gazeux (FG) et les matières particulaires (MP) ont été analysés pour les cinq gazéificateurs en trois répétitions. Le (FG) est constitué de monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NOx), le monoxyde d'azote (NO), et de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) alors que les matières particulaires analysés sont MP<sub>1</sub> et MP<sub>2,5</sub> (matières particulaires de diamètres aérodynamiques  $\leq 1$  et  $\leq 2,5$   $\mu\text{m}$  respectivement). Les protocoles de l'analyseur d'émissions portable Testo350® (Testo, Inc., NJ, USA) et DustMate® (Turnkey Instruments Ltd., Cheshire, UK) représentés sur la Figure 16 ont été utilisés pour les analyses de FG et la MP, respectivement. Les gazéificateurs ont été placés dans une pièce de 40,5 m<sup>3</sup> avec fenêtre (1,16 m<sup>2</sup>) et porte (1,7 m<sup>2</sup>) fermées (vitesse de circulation d'air =  $11,5 \times 10^4$  m<sup>3</sup> / s) ou avec fenêtre et porte ouvertes (vitesse de circulation d'air =  $52,9 \times 10^4$  m<sup>3</sup> / s) et FG et la PM ont été analysés dans la pièce après 10 min de gazéification.



Testo 350®



DustMate®

**Figure 16** : Analyseur d'émissions portable Testo350® et DustMate® pour évaluer la composition des fumées en flux gazeux et matière particulaire respectivement

### **II.3.3. Méthodologie d'évaluation de l'Analyse Cycle de Vie (ACV)**

La méthode d'analyse du cycle de vie attributionnelle, qui est la méthode classique d'ACV, a été utilisée pour mesurer et quantifier les impacts environnementaux des gazéificateurs à coques de riz. En effet, l'analyse du cycle de vie permet de se focaliser sur les impacts environnementaux du produit étudié.

#### **II.3.3.1. Définition des objectifs**

L'objectif de l'Analyse Cycle de Vie (ACV) est de quantifier les impacts environnementaux des gazéificateurs à coques de riz, depuis leur production jusqu'à leur utilisation, afin d'apercevoir les problèmes éventuels et de proposer des recommandations pour limiter les impacts et améliorer la performance.

#### **II.3.3.2. Demande d'énergie Cumulative**

L'analyse des besoins énergétiques cumulatifs a pour objectif d'étudier la consommation d'énergie tout au long du cycle de vie d'un bien ou d'un service. Cela inclut les utilisations directes ainsi que la consommation d'énergie indirecte ou grise due à l'utilisation de matériaux de construction ou de matières premières, par exemple. Selon **VDI (1997)**, "les données sur la demande d'énergie cumulée constituent une base importante pour indiquer les priorités des

potentiels d'économie d'énergie dans leur relation complexe entre conception, production, utilisation et élimination".

### **II.3.3.3. Facteurs de caractérisation de l'impact**

Suite au recensement des données de la réalisation de l'inventaire du cycle de vie des différents foyers et à l'introduction de celles-ci dans le logiciel SimaPro, l'analyse du logiciel génère des données représentant l'impact de la production et de l'utilisation des gazéificateurs sur la santé humaine et l'environnement.

En tenant compte des facteurs de caractérisation, la charge environnementale de l'utilisation du foyer de cuisson a été traduite en impacts environnementaux et humains spécifiques. Notre évaluation d'impact repose sur un calcul général des facteurs de caractérisation utilisant les 18 catégories Midpoint ReCiPe: 1) réchauffement climatique, 2) appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique, 3) rayonnements ionisants 4) formation d'ozone (santé humaine), 5) formation de fines particules, 6) formation d'ozone (écosystème terrestre), 7) Acidification terrestre 8) Eutrophisation des eaux douces, 9) Eutrophisation des zones marines, 10) Écotoxicité terrestre, 11) Ecotoxicité des eaux douces, 12) Écotoxicité en milieu marin, 13) Toxicité cancérogène pour l'homme, 14) Toxicité non cancérogène pour l'homme, 15) Pénurie d'utilisation des sols, 16) Pénurie de ressources minérales, 17) Ressource fossile, 18 ) Consommation d'eau.

## **II.4. Evaluation de la toxicité *in vivo* des gazéificateurs à coques de riz**

Au terme des sections II.1, II.2 et II.3, les résultats ont démontré par modélisation que le foyer Paul Olivier 150 (PO150) utilisant la coque de riz pure comme combustible était le moins dangereux non seulement pour la santé de l'utilisateur, mais aussi pour l'environnement. Dans la suite de cette étude, nous allons vérifier si les aliments cuits avec ce gazéificateur (PO150) sont sains pour le consommateur.

### **II .4.1. Traitement des rats dans l'animalerie**

#### **II .4.1.1. Réception et acclimatation des rats**

Pour l'évaluation de la toxicité liée à l'utilisation des coques de riz, 48 rats albinos (dont 20 mâles et 28 femelles non gravides) de race *Wistar* âgés de 4 à 6 semaines, et de poids corporel

compris entre 70 et 110 g au début de la manipulation, ont été utilisés pour l'expérimentation. Ces animaux ont été élevés à température ambiante et acclimatés dans l'animalerie du laboratoire de Physiologie Animale de l'Université de Yaoundé I. Une période d'adaptation de sept (7) jours selon un cycle jour/nuit naturel a été observée avant l'expérience. Ils ont été gardés dans leurs cages en plastique où ils ont reçu le régime alimentaire standard et de l'eau *ad libitum*. La litière utilisée était de la sciure, renouvelée deux fois par semaine pour assurer un bon état d'hygiène des animaux. L'autorisation d'utiliser des animaux de laboratoire dans cette étude a été obtenue du Comité national d'éthique du Cameroun (Règl. N°. FWA-IRD 0001954).

Ces animaux étaient aléatoirement divisés en 6 groupes de 8 animaux, un groupe constitué de huit (8) femelles et les autres groupes comptant un nombre égal de mâles et femelles (4 femelles et 4 mâles). Le groupe de femelles servant à l'évaluation de la toxicité aiguë et les cinq (5) autres groupes pour la toxicité sub-chronique.

#### **II.4.1.2. Alimentation des rats**

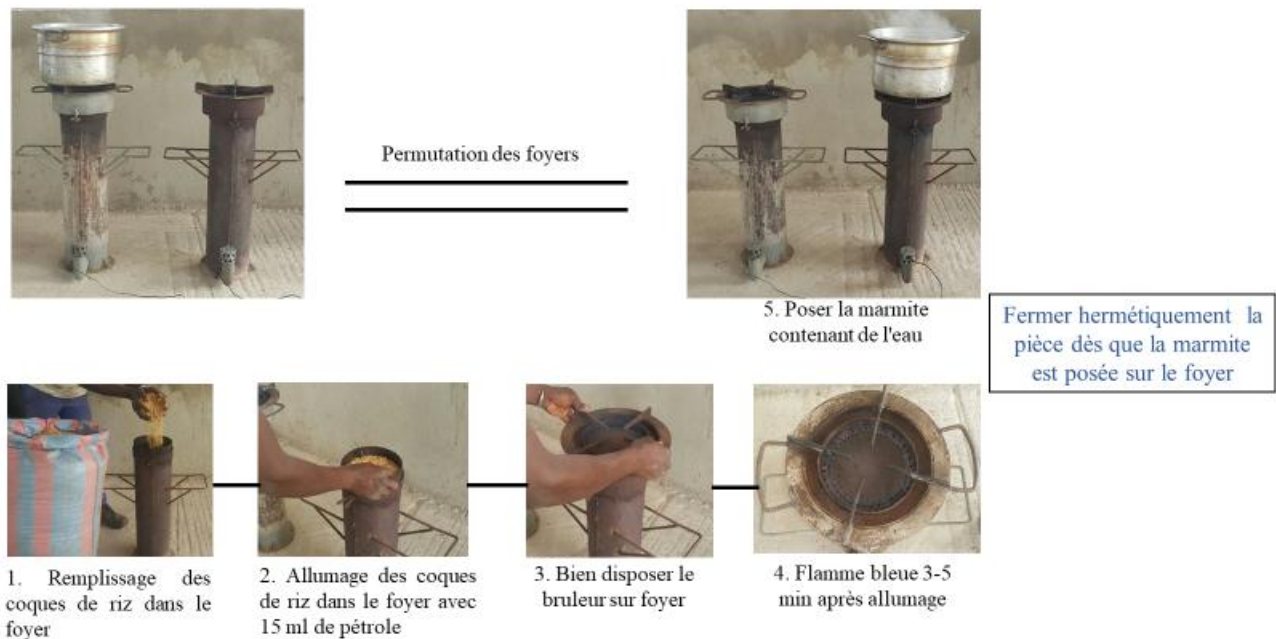
La nourriture des rats a été achetée dans une provenderie du marché de Mokolo, à Yaoundé- Cameroun. La composition alimentaire était faite de 60 % de farine de maïs, 7 % de son de blé, 13 % de farine de poisson, 7 % de tourteau de palmiste, 7 % de farine d'arachides, 3 % de tourteau de coton, 2 % de farine d'os, et 1 % de complexe vitaminique. Cette nourriture était mélangée avec de l'eau du robinet à raison de 1 kg de la nourriture en poudre pour 500 ml d'eau. La pâte obtenue était conditionnée en petites boules avant d'être servi aux rats dans les cages. Des biberons d'eau étaient aussi déposés au-dessus des cages sur les grilles, où les rats avaient un accès libre.

#### **II.4.2. Préparation de l'échantillon d'eau**

Le gazéificateur PO150 se remplit de façon intermittente en utilisant un ventilateur. PO150 a une capacité de remplissage de 0,78 kg de coque de riz qui se consomme pendant une durée de 30 min. Au bout de 30 min, lorsque les coques de riz dans le gazéificateur étaient complètement épuisées, le charbon a été jeté avant que de nouveaux combustibles ne soient mis dans le gazéificateur pour lancer un autre processus de génération d'énergie. Afin de réduire le temps de remplissage du combustible et d'assurer une cuisson en douceur des plats dont le temps de cuisson est supérieur au temps de combustion maximal pour les gazéificateurs de type intermittent, la commutation du foyer a été utilisée comme décrit précédemment par **Ndindeng**



*et al.*, 2019. En bref, deux gazéificateurs PO150, A1 et A2 ont été produits et utilisés pour l'étude. Lorsque A1 était en marche, A2 était rempli de coques de riz et placé à proximité. Le gazéificateur A2 était allumé lorsque le temps de combustion dans A1 était à 5 min du temps d'arrêt. Lorsque A1 s'arrêtait, la marmite était transférée sur A2 et le charbon du foyer A1 jeté, du nouveau combustible était rempli et placé à proximité.



**Figure 17 :** Présentation schématique de la configuration de l'eau bouillante avec le foyer PO150.

De l'eau distillée a été bouillie tous les jours pendant la période de l'expérience (28 jours). Comme illustré sur la Figure 17, le gazéificateur assisté par ventilateur PO150 était placé dans une pièce avec fenêtre et porte fermées. Cinq litres (5 L) d'eau distillée était placés dans une marmite ouverte (10 L de volume) et laissés à bouillir pendant environ 1 heure à partir du point d'ébullition en utilisant la balle de riz comme combustible. Étant donné que le temps de cuisson des aliments varie (10 min à 2 h), le temps pendant lequel l'eau continue à bouillir sur le foyer est critique et le plus long est le mieux pour permettre aux éventuelles toxines des émissions du foyer de se dissoudre dans l'eau. Cette eau a ensuite été refroidie à température ambiante avant d'être administrée aux rats.

### II.4.3. Evaluation de la toxicité

#### ➤ Toxicité aiguë : détermination de la dose létale 50 (DL50) par voie orale.

L'étude a été conduite suivant la ligne directrice 423 de l'OCDE (OCDE, 2001) sur 8 rats femelles. Le lot témoin était constitué 4 rats femelles alimentés à de l'eau distillée normale. Après un jeûne de 18h, un lot de quatre (4) rats femelles ont été gavés avec l'échantillon d'eau distillée bouillie à une dose unique de 2ml/ 100 g de poids corporel du rat. Ces différents échantillons d'eau (eau distillée bouillie et eau distillée normale) sont administrés le premier jour de l'expérience en une seule dose en utilisant une sonde gastrique. Les animaux ont été mis en observation pendant les trois (3) premières heures, pour noter les morts immédiats. L'expérience a duré 14 jours, et les animaux ont été pesés tous les 2 jours. Une hydratation et une alimentation ont été effectuées de façon quotidienne pendant 14 jours. Pendant cette période, les signes de toxicité notamment la modification du pelage, les tremblements, la masse, le toilettage, la sensibilité au bruit après un choc métallique, l'aspect des selles, la mobilité ainsi que les décès ont été notés.

#### ➤ Toxicité sub-chronique

L'étude a été conduite suivant la ligne directrice 407 de l'OCDE (OCDE, 2008) sur 40 rats (dont 20 mâles et 20 femelles) repartis en 5 groupes. Les différents lots d'animaux traités étaient :

- Lot 1 : Témoin : Eau distillée 2 ml/ 100g de poids corporel (pc) du rat par jour ;
- Lot 2 : 0,5 ml /100g de pc/ jour de la substance d'essai,
- Lot 3 : 1 ml /100g de pc / jour de la substance d'essai,
- Lot 4 : 2 ml /100g de pc / jour de la substance d'essai,
- Lot 5 : Satellite : 2 ml /100g de pc / jour de la substance d'essai et observé pendant 14 jours après l'arrêt du traitement.

Après un jeun de 12 h, la solution (eau bouillie aux coques de riz) a été administrée aux différentes doses par gavage, chaque matin à 10 heures. Le traitement a duré 28 jours. Les rats ont été alimentés et hydratés à volonté. Au cours des 28 jours de test, les poids corporels des rats étaient quotidiennement relevés et exprimés en pourcentage sur le poids initial selon l'équation :

$$\text{GPC (\%)} = \frac{P_f - P_i}{P_i} \times 100 \quad (17)$$

Où GPC : Gain de poids corporel ; Pf : poids final de l'animal (g) et Pi : poids initial de l'animal (g).

Les comportements dans les cages, la mortalité, la chute de poils, l'anorexie, la présence de diarrhée ainsi que la mobilité (présence de torticolis) ont aussi été enregistrés. Le groupe 5 était traité à l'eau bouillie pendant 28 jours mais ceux-ci ont été sacrifiés 14 jours après l'arrêt du traitement, ceci pour vérifier la réversibilité des effets du traitement. A la fin du traitement, les rats ont été sacrifiés et certains organes prélevés et pesés. Les organes prélevés étaient le foie, les reins, la rate, les poumons et le cœur. Le poids relatif de chaque organe a été calculé suivant la formule :

$$P_r = \frac{P_o}{P_a} \times 100 \quad (18)$$

Où Pr : poids relatif de l'organe (g/100 g) ; Po : poids de l'organe (g) et Pa : poids corporel du rat (g).

A la fin du traitement, les rats ont été mis à jeun pendant 24 h, puis un prélèvement sanguin a été effectué par décapitation et le sang artérioveineux obtenu a été utilisé pour les analyses hématologiques et biochimiques, suivi d'une dissection après administration de la kétamine, à raison de 50 mg/kg. Les organes prélevés étaient le foie, les reins, et le cœur. Ces derniers ont été rincés avec une solution salée à 0,9 %, pesés et ont servi pour l'analyse histopathologique.

## **II.4.4. Dosage des paramètres hématologiques, biochimiques et histopathologique**

### **II.4.4.1. Analyses hématologiques et biochimiques**

A partir du sang contenu dans le tube EDTA, la numération globulaire et les constantes érythrocytaires ont été déterminés. Les paramètres hématologiques des animaux ont été évalués à l'aide d'un hématomètre de type « Hospitex Diagnostics Hema Screen 18 » du laboratoire d'hématologie du Centre Hospitalier Universitaire de Yaoundé (CHU). Cet automate fonctionne en aspirant du sang contenu dans un tube EDTA et effectue la numération de différentes lignées cellulaires. Une lyse différentielle des globules rouges est effectuée et le décompte des

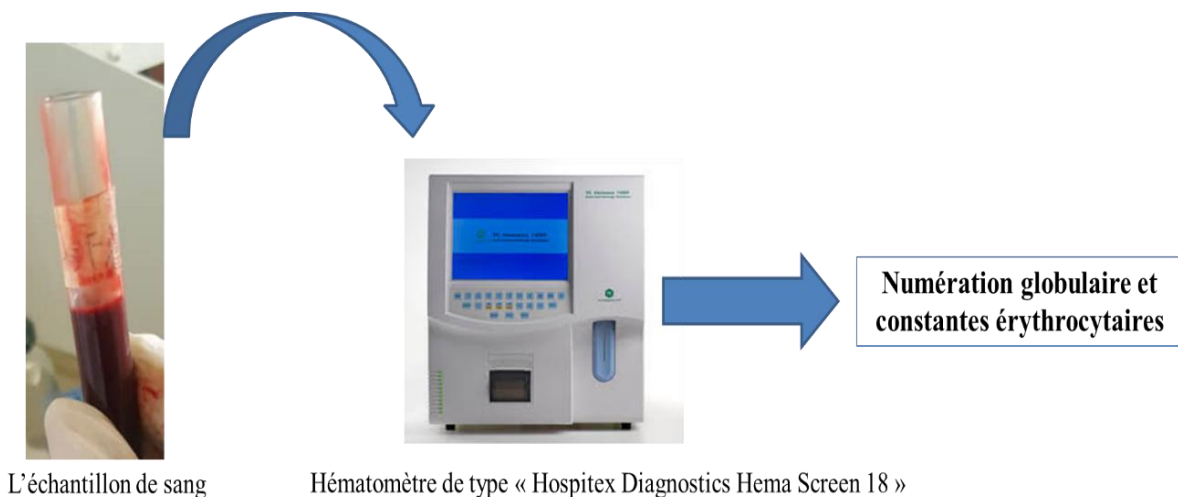
leucocytes et de différentes populations leucocytaires est réalisé grâce à une activité enzymatique qui leur est spécifique.

Le sang des tubes secs a été centrifugé à 3000 trs/mn pendant 5 min. Les paramètres biochimiques ont été dosés sur le sérum obtenu grâce à l'automate.

#### a) Protocole d'évaluation des paramètres hématologiques

Les effets de l'eau bouillie aux coques de riz sur les paramètres hématologiques des animaux ont été évalués à l'aide d'un Analyseur Automate de marque « Hospitex Diagnostics Hema Screen 18 » (Figure 18) du laboratoire d'hématologie de l'Hôpital Central de Yaoundé. Cet automate fonctionne en aspirant du sang contenu dans un tube EDTA et effectue la numération des globules rouges, des globules blancs et des plaquettes.

**Principe :** Il est basé sur une lyse différentielle des globules rouges et le décompte des leucocytes et des différentes populations leucocytaires qui est réalisé grâce à une activité enzymatique qui leur est spécifique. Les différents paramètres mesurés et calculés sont transcrits sur un graphique puis imprimé.

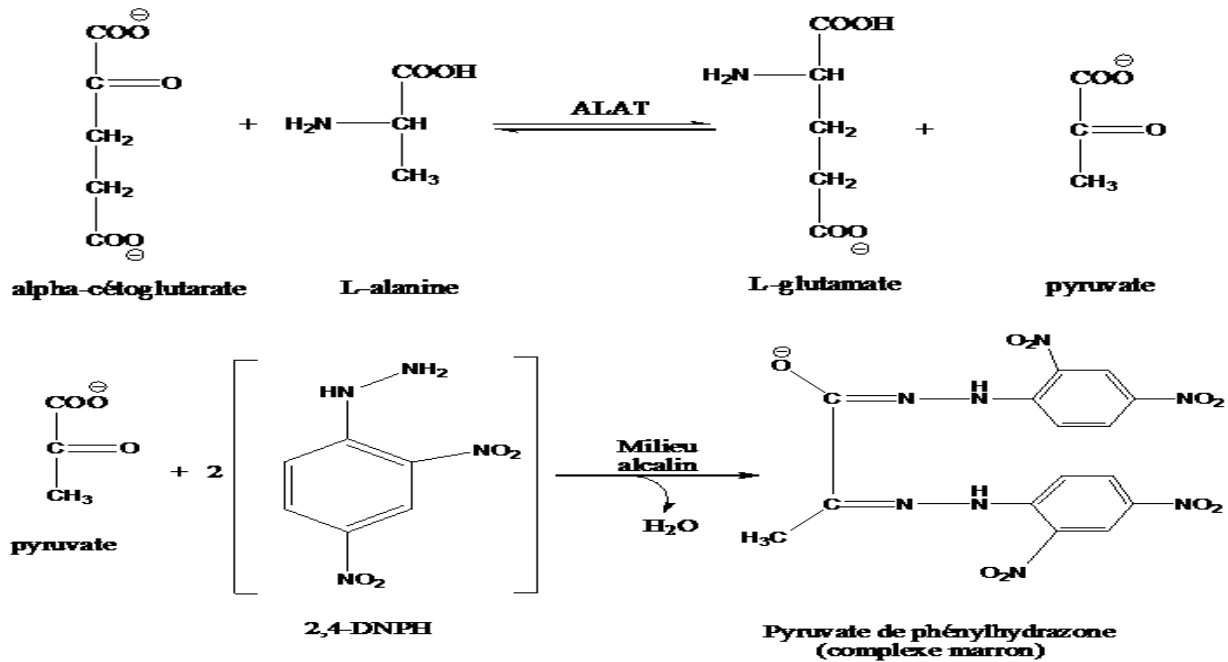


**Figure 18 :** Représentation de l'essai utilisant l'appareillage l'hématomètre

#### b) Dosage de l'Alanine Amino-Transférase (ALAT)

##### - Principe

L'alanine aminotransférase catalyse le transfert du groupement aminé de l'alanine sur l' $\alpha$ -cétooglutarate pour former le pyruvate et le glutamate. Le pyruvate ainsi formé réagit avec le 2,4-Dinitrophényl hydrazine (2,4-DNPH) pour former le dérivé hydrazone de couleur marron qui absorbe à 505 nm (Reitman et Frankel, 1957).



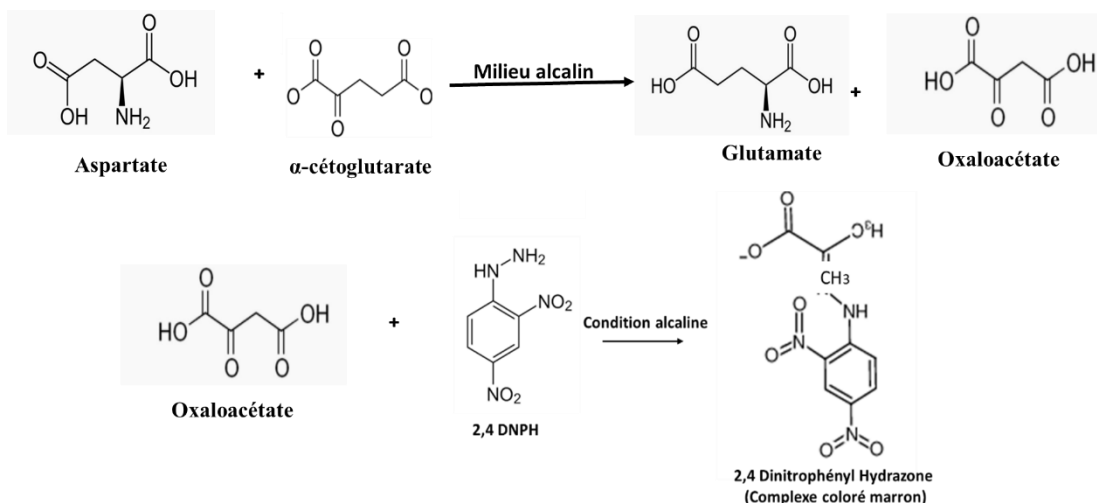
### - Mode opératoire

Dans 5 tubes à essai étalon numérotés de 1 à 5 ont été introduit 0, 40, 80, 120 et 160  $\mu$ l de solution étalon pyruvate 2 mM. Parallèlement, 40  $\mu$ l de sérum ont été introduits dans les tubes tests. Le substrat d'ALAT (alanine 0,2 M,  $\alpha$ -cétooglutarate 2 mM dans le tampon phosphate 0,1 M pH 7,4), préalablement incubé à 37 °C au bain-marie pendant 5 min, a été par la suite ajouté dans tous les tubes (aux volumes respectifs de 400, 360, 320, 280, 240  $\mu$ l pour les tubes étalons et 360  $\mu$ l pour les tubes tests). Après 30 min d'incubation à 37°C, les produits formés ont été révélés par ajout de 200  $\mu$ l de 2,4-DNPH 1 mM dans tous les tubes. Après 20 min de réaction à température ambiante, 2 ml de NaOH 0,4 M ont été ajoutés dans tous les tubes et la densité optique a été lue après 30 min à 505 nm contre le blanc constitué des solutions de KCl 0,9 %, 2,4-DNPH 1 mM, NaOH 0,4 M et de substrat d'ALAT. L'activité de l'ALAT des échantillons a été calculée à partir de l'équation de droite de la courbe d'étalonnage en Annexe 2.

### c) Dosage de l'Aspartate Amino-Transférase (ASAT)

#### - Principe

L'aspartate aminotransférase (EC 2.6.1.2) catalyse le transfert du groupement aminé de l'aspartate sur l' $\alpha$ -cétoglutarate pour former l'oxaloacétate et le glutamate. L'oxaloacétate ainsi formé réagit avec le 2,4-Dinitrophénylhydrazine (2,4-DNPH) pour former le dérivé hydrazone de couleur marron qui absorbe à 505 nm (**Reitman et Frankel, 1957**).



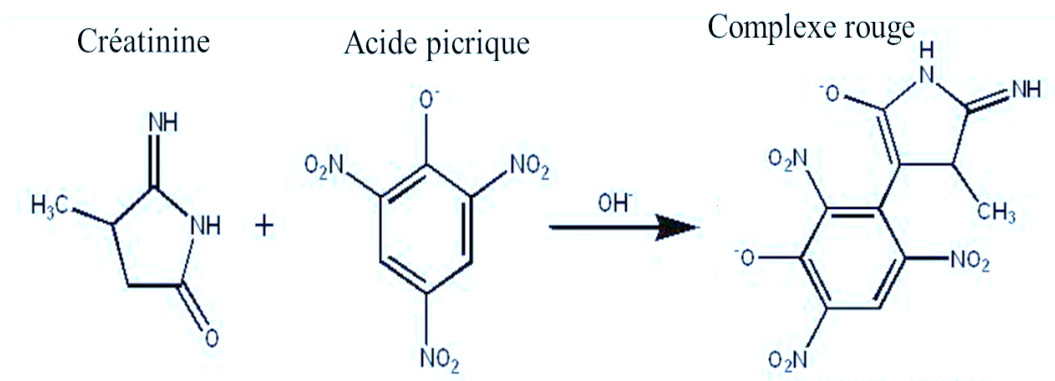
#### - Mode opératoire

Dans 5 tubes à essai étalon numérotés de 1 à 5 on introduit 0, 40, 80, 120 et 160  $\mu$ l de la solution étalon pyruvate (2 mM). Parallèlement, 40  $\mu$ l de sérum sont introduits dans les tubes tests. Le substrat ASAT (aspartate 0,2 M,  $\alpha$ -cétoglutarate 2 mM dans le tampon phosphate 0,1 M de pH 7,4) préalablement incubé pendant 5 min et à 37 °C au bain-marie est par la suite ajouté dans tous les tubes (aux volumes respectifs de 400, 360, 320, 280, 240  $\mu$ l pour les tubes étalons et 360  $\mu$ l pour les tubes tests). Après 1h d'incubation à 37 °C, les produits formés sont révélés par ajout de 200  $\mu$ l de 2,4-DNPH 1 mM dans tous les tubes. Après 20 min de réaction à température ambiante, 2 ml de NaOH 0,4 M sont ajoutés dans tous les tubes et la densité optique est lue après 30 min à 505 nm contre le blanc constitué des solutions de KCl 0,9 %, 2,4-DNPH 1 mM, NaOH 0,4 M et de substrat ASAT. L'activité de l'ASAT des échantillons a été calculée à partir de l'équation de droite de la courbe d'étalonnage en Annexe 2.

#### d) Dosage de la créatinine

##### - Principe

La créatinine est un produit du métabolisme endogène musculaire : elle est issue de l'utilisation cyclique de la phospho-créatine, réserve d'énergie musculaire. En milieu alcalin, la créatinine forme avec l'acide picrique un complexe rouge qui absorbe à 505 nm. L'augmentation de l'absorbance optique est proportionnelle à la concentration de créatinine présente dans le milieu réactionnel.



##### - Mode opératoire

Le dosage a été réalisé selon le protocole décrit par le producteur du kit Fortress produit par (Fortress Diagnostics Limited). Le réactif de dosage est obtenu en mélangeant à volume égal, l'acide picrique et la soude en fonction du nombre d'échantillon à doser. Les différentes substances sont mélangées, incubées pendant 1 mn à 37 °C et les absorbances de l'échantillon et du standard lues à 30 secondes et 120 secondes.

Le taux de créatinine sérique est ensuite déterminé par la formule :

$$\text{Créatinine } (\mu\text{mol/L}) = (\Delta\text{absorbance échantillon} / \Delta\text{absorbance standard}) \times 177$$

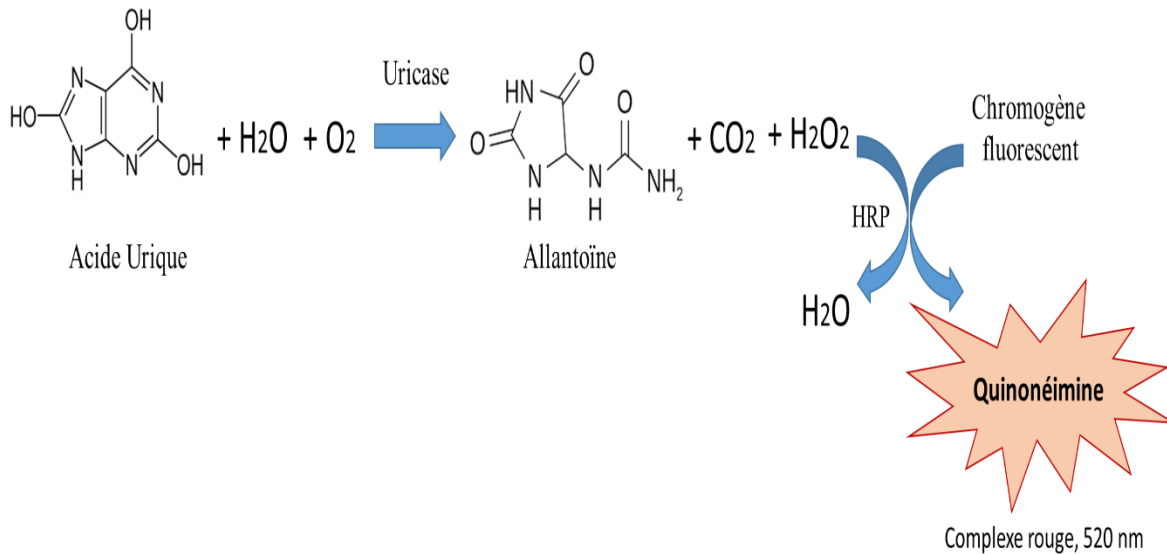
$\mu\text{mol/L}$  : micromole par litre ;  $\Delta\text{absorbance}$  : différence entre l'absorbance lue à 30 secondes et 120 secondes ; 177 : facteur multiplicateur donné par le Kit.

#### e) Dosage de l'acide urique

Chez l'humain, l'acide urique est le produit principal du catabolisme des nucléosides puriques, adénosine et guanosine. Les principales causes d'hyperuricémie sont la goutte primaire (hyperproduction métabolique des purines ou trouble de l'urico-élimination rénale), ou la goutte secondaire dont la cause peut être une maladie rénale ou l'administration de médicaments (diurétiques, chimiothérapie...). L'hyperuricémie peut aussi être attribuée à une défectuosité d'une des enzymes impliquées dans le métabolisme de purines ou à une hémopathie.

- **Principe**

L'uricase agit sur l'acide urique pour produire de l'allantoïne, du dioxyde de carbone et du peroxyde d'hydrogène. En présence de peroxydase, le peroxyde d'hydrogène réagit avec un chromogène (dichloro-hydroxybenzène sulfonate et amino-antipyrine) pour former une quinonéimine, complexe de couleur rouge. L'absorbance mesurée à 520 nm (490-530), est proportionnelle à la quantité de quinoneimine dans le spécimen.



- **Mode opératoire**

Le tableau XI suivant résume la méthode manuelle de dosage de l'acide urique par spectrophotomètre :

Les réactifs et l'échantillon sont placés à une température ambiante. Pour chaque animal, on prépare trois (3) tubes (blanc, étalon et échantillon) et on pipette dans chaque tube comme dans le Tableau XI.



Le taux de l'acide urique est ensuite déterminé par la formule :

$$C = \frac{A \text{ échantillon}}{A \text{ étalon}} * n \text{ (mg/l)} \quad (20)$$

Ou **n** correspond à la concentration du standard n = 100 mg/L

**Tableau XI:** Mode opératoire du dosage de l'acide urique

Tubes	Blanc	Etalon	Test
Etalon de l'acide urique (µl)	-	25	-
Eau distillée (µl)	-	-	25
Echantillon (µl)	25	-	-
Réactif de travail (ml)	1	1	1

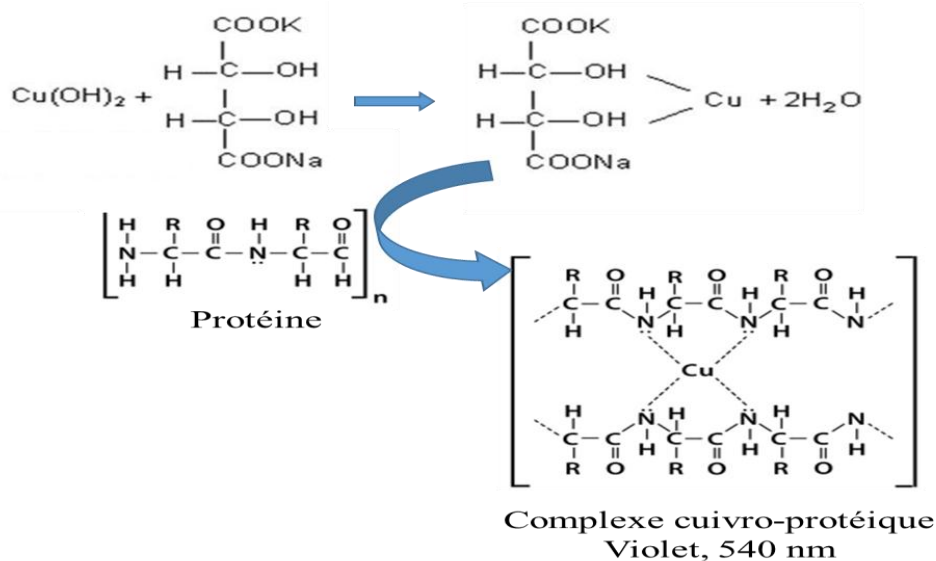
On mélange bien les tubes et laisse reposer 5 min à 25 °C. Après incubation, on observe l'apparition d'une couleur rouge indiquant la production de quinoneimine, ensuite on ajuste le zéro (0) du spectrophotomètre sur le blanc réactif et on lit les absorbances (A) à 520 nm (490-530 nm). La couleur est stable pendant 30 min.

### f) Dosage des Protéines Totales

Elles comprennent surtout l'albumine, les globulines (alpha 1, alpha 2, bêta, gamma) et le fibrinogène. L'albumine et le fibrinogène sont synthétisés par le foie, et les globulines par les plasmocytes. Le dosage des protéines par la méthode de **Bradford (1976)** permet de déterminer des concentrations de protéines.

#### - Principe de dosage

En milieu basique, le tartrate de sodium et de potassium forme avec les ions cuivriques un



complexe soluble. L'addition d'une protéine déplace le cuivre lié au tartrate pour former un complexe cuivro-protéique de couleur violette. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la quantité de protéines présente dans la solution (**Gornall et al., 1949**).

- **Mode opératoire**

Le dosage des protéines totales a été fait selon la méthode de Biuret. Pour se faire une courbe d'étalonnage a été au préalable réalisé à partir du Sérum Albumine Bovin (3 mg/ ml). Les tubes ont été complétés comme l'indique le tableau XII.

**Tableau XII:** Protocole de dosage des protéines

	Blanc	Etalons							Echantillons	
Tubes	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>X<sub>1</sub> .....</b>	<b>X<sub>n</sub></b>
SAB (µL)	0	50	100	150	200	250	300	600	-	-
Eau distillée (µL)	600	550	500	450	400	350	300	0	590	590
Réactif de Biuret (µL)	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
Echantillons (µL)	-	-	-	-	-	-	-		10	10
Quantité de protéines (mg)	0	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,8	-	-
Le contenu de chaque tube a été homogénéisé et incubé pendant 10 minutes à température ambiante. L'absorbance a été lue contre le blanc à 540 nm.										
Absorbances obtenues	0	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,20		

**SAB** = Sérum Albumine Bovin ; **0** = Tube blanc ; **1-6** = Tubes étalons ; **X<sub>1</sub>-X<sub>n</sub>** = Tubes échantillons.

La quantité de protéine a été déterminée à partir de la droite d'équation **y=0,1007x**, avec **y** la densité optique ; **x** la concentration en protéines en mg/mL calculée à partir de l'équation de droite de la courbe d'étalonnage en Annexe 2.

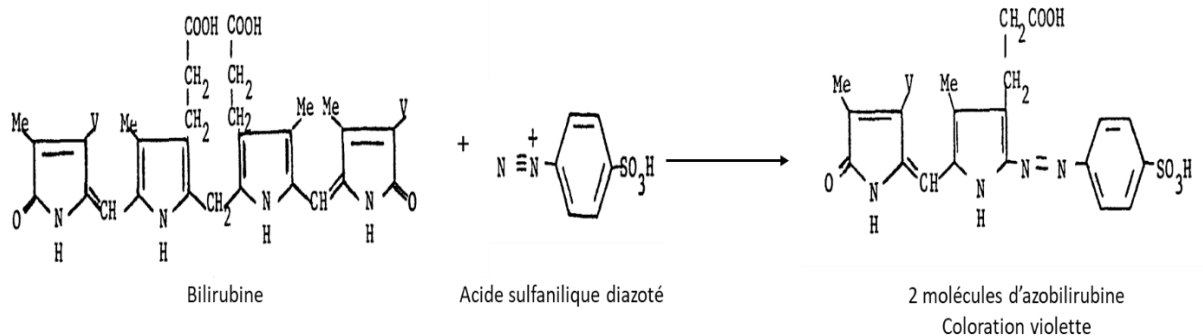
**g) Bilirubine totale**

La bilirubine est un pigment biliaire de couleur jaune-rouge. La dégradation des groupements tetra-pyrroliques de l'hémoglobine, de la myoglobine, des cytochromes et des autres chromoprotéines produit de la bilirubine non conjuguée (BNC) ou libre ou indirecte.

➤ **Principe**

La réaction entre la bilirubine et l'acide sulfanilique diazoté conduit à la formation d'un composé, l'azo-bilirubine, coloré en milieu très acide ; l'absorbance de l'azo-bilirubine ainsi

produite est proportionnelle à la concentration en bilirubine dans le milieu et est mesurée à 546nm.



### ➤ Mode opératoire

Le dosage de la bilirubine totale a été réalisé à l'aide d'un kit de marque Inmesco comme décrit dans le tableau XIII.

**Tableau XIII:** Protocole de dosage de la bilirubine totale

	Echantillon	Blanc échantillon
Acide sulfanilique (µL)	100	100
Nitrite de sodium (µL)	20	-
Caféine (µL)	800	800
Eau distillée (µL)	-	20
Echantillon	200	200

Les tubes ont été homogénéisés et incubé pendant 5 minutes à 37 °C. les absorbances des échantillons ont ensuite été lues à 546 nm contre le blanc échantillon ( $\Delta A$ ).

La concentration de bilirubine totale dans chaque échantillon a été déterminée par la formule suivante :

$$[\text{Bilirubine totale}] = \Delta A \times 9$$

**[Bilirubine total]** = Concentration de la bilirubine totale (mg/dL) ; **9** = Coefficient donné par le kit ;  **$\Delta A$**  = Variation de l'absorbance.

#### II.4.4.2. Analyses histologiques

La technique histologique est la technique de préparation des tissus et/ou organes en vue de leur observation au microscope. L'analyse histologique (Figure 19) avec inclusion en

paraffine comprend différentes étapes lesquelles sont dans l'ordre : la fixation, la recoupe ou « trimming », la déshydratation, l'inclusion, la coupe, la coloration, le montage microscopie et enfin photographie. Les organes (foie, reins et cœur) prélevés après sacrifice des animaux ont été fixés dans du formol tamponné à 10 %. La préparation des coupes d'organe a été faite suivant le protocole ci-après :

➤ **Fixation** : L'objectif de la fixation est de préserver les cellules et les constituants tissulaires dans un état aussi proche que possible de celui du vivant. Ainsi, durant le sacrifice des animaux, des fragments de foie, de reins, de cerveau, et de testicules, prélevés, ont été conservés dans la formaline 10 % tamponnée sur une période d'environ deux semaines avant manipulation. Les organes (foie et rein) prélevés après sacrifice des animaux ont été fixés dans du formol tamponné à 10 %. La préparation des coupes d'organe a été faite suivant le protocole ci-après :

➤ **Etape 1 : « Trimming »**

Une recoupe en tranches fines et régulières de chaque organe fixé a été réalisée à l'aide d'un bistouri. Les coupes obtenues ont été rangées dans des cassettes en matière plastique.

➤ **Etape 2 : Déshydratation**

La déshydratation a été faite en trois étapes : la déshydratation proprement dite, l'éclaircissement et l'imprégnation.

✓ **Déshydratation proprement dite** : Les cassettes ont séjourné successivement dans des bains d'éthanol de concentration croissante : éthanol 50° (1h) → éthanol 70° (1h) → éthanol 95° n°1 (1h) → éthanol 95° n°2 (1h 30 mn) → éthanol 100° n°1 (1h) → éthanol 100° n°2 (1h 30 mn) → éthanol 100° n°3 (2 h).

✓ **Eclaircissement** : Les cassettes ont séjourné successivement dans deux bains de xylène respectivement pendant 1 heure et 1 heure 30 minutes.

✓ **Imprégnation** : Les organes ont été infiltrés de paraffine par passage dans trois bains de paraffine à 60°C pendant respectivement 1 heure, 1 heure 30 minutes et 2 heures.

➤ **Etape 3 : Inclusion**

Les tissus ont été placés dans des moules remplis de paraffine en fusion qui ont été placés sur des plaques réfrigérantes pour solidification.

➤ **Etape 4 : Les coupes**

Les coupes de 5  $\mu\text{m}$  d'épaisseur ont été réalisées au microtome. Les sections obtenues ont été dépliées dans un bain marie à 40°C, puis les meilleures coupes ont été récupérées sur des lames porte-objets et placées à l'étuve (45°C) pour séchage pendant 24 heures.

➤ **Etape 5 : Coloration**

La technique de coloration à l'hématoxyline-éosine (HE) a été utilisée. L'hématoxyline basophile colore en bleu noir les composants nucléaires et l'éosine acidophile colore les composants cytoplasmiques en rose-rouge.

✓ **Déparaffinage et réhydratation** : Les coupes ont été déparaffinées et réhydratées par passage successif dans une série de bains selon la séquence résumée dans le tableau XIV suivant :

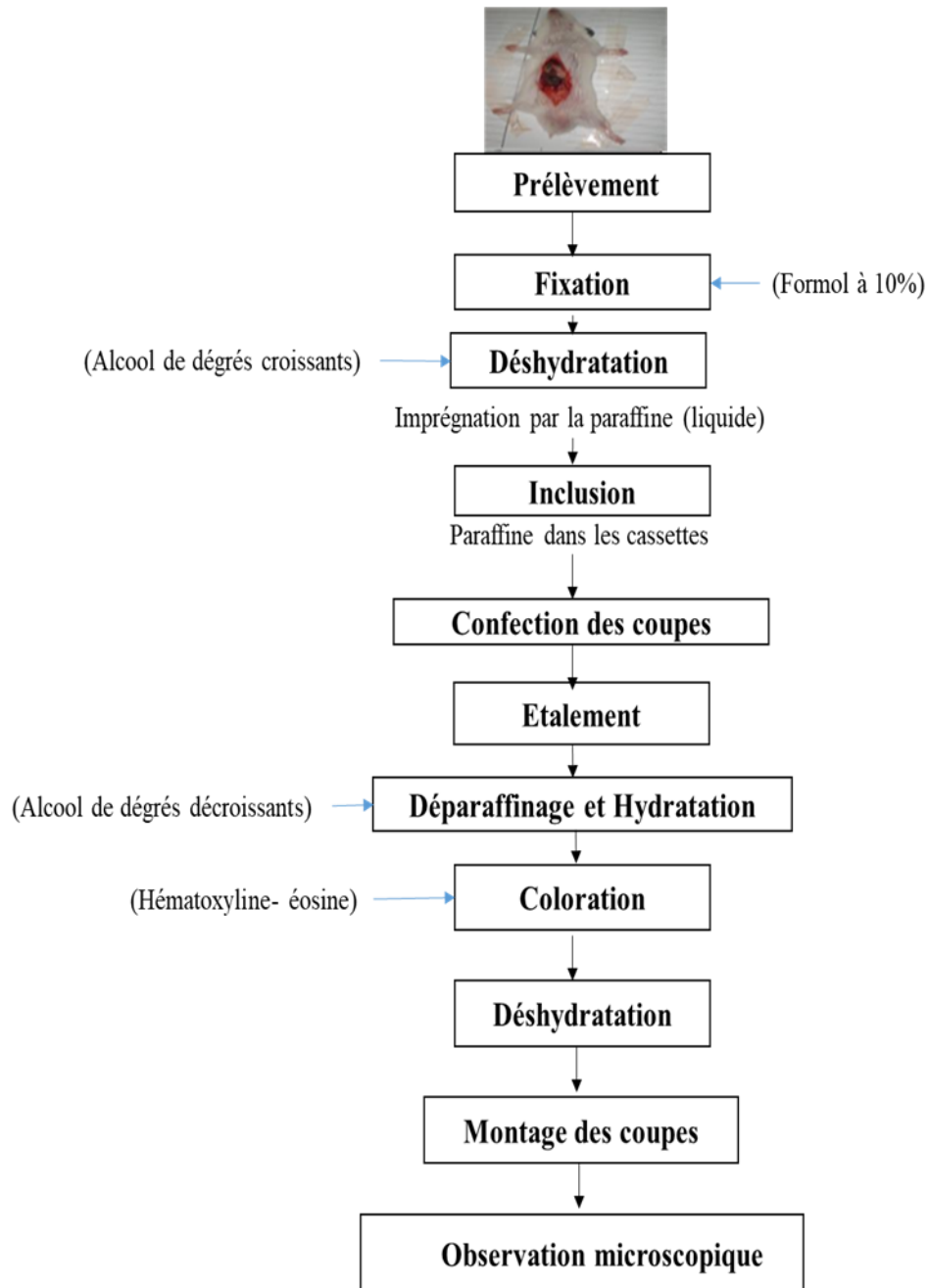
**Tableau XIV**: Protocole d'une batterie de déparaffinage

N° du bain	Solution	Temps de séjour	N° du bain	Solution	Temps de séjour
1	Histoclear	2 bacs / 2 x 10 minutes	4	Ethanol 100°	10 minutes
2	Histoclear	5 minutes	5	Ethanol 95°	10 minutes
3	Ethanol 100%	3 bacs / 3 x 10 minutes	6	Eau distillée	10 minutes

✓ **Coloration proprement dite** : Immédiatement après l'étape de déparaffinage, les lames portant les coupes de tissus ont été colorées à l'hématoxyline et à l'éosine. Les étapes de cette coloration sont résumées dans le Tableau XV. Les coupes ont été immergées pendant 10 min dans un bac contenant de l'hématoxyline de Mayer, puis rincées à l'eau courante du robinet. Elles ont ensuite été passées dans un bain d'éthanol 95° pendant 5 min, puis ont été immergées pendant 5 min dans de l'éosine alcoolique 0,5% et dans 40 µL d'acide acétique par 100 ml de

solution. Les coupes ont ensuite été déshydratées dans 3 bains d'éthanol 100° (5 min) chacun et éclaircies dans 3 bains de xylène (5 min) chacun.

**Figure 19** : Schéma des différentes étapes pour la réalisation des coupes histologiques.



**Tableau XV**: Protocole de coloration à l'hématoxyline et à l'éosine



N° de bain	Solution	Temps de séjour	N° de bain	Solution	Temps de séjour
7	Hématoxyline de Mayer	10 minutes	11	Eosine alcoolique 0,5%	5 minutes
8	Rinçage à l'eau courante du robinet	1 - 4 minutes	12	Ethanol 100%	4 bacs / 4 x 1 minute
9	Carbonate de sodium 0.5%	15 secondes	13	Xylène	3 bacs / 3 x 5 minutes
10	Rinçage à l'eau distillée	1 - 2 minutes	14	Montage de la lamelle sur la résine	

### ➤ Etape 6 : Montage, microscopie et photographie

L'étape de montage entre lame et lamelle s'enchaîne directement à la suite de la coloration. Pour ce faire, quelques gouttes de résine synthétique, de marque eukit, ont été déposées sur la lame portant la coupe colorée avant apposition d'une lamelle. Les coupes de tissus sur les lames ont ainsi été protégées et conservées. L'observation des coupes colorées aux grossissements de 200 x et 100x, a été faite au microscope photonique de marque Olympus relié à un ordinateur. Les microphotographies ont été réalisées à l'aide d'un logiciel de prise d'image Minisee version 1.0. Une analyse qualitative des différentes coupes a été réalisée.

## II.5. Analyse statistique des données

Les données obtenues ont été analysées à l'aide du logiciel statistique pour les sciences sociales, version 10.1.4 (SPSS, 2002) à un seuil de 5 %. L'analyse par modèle linéaire généralisé uni-varié (MLG-Univarié) a été utilisée pour étudier l'effet de combinaison des paramètres ratios coque-son, de la méthode de séchage, de la taille des particules et de la température de l'eau pour la fabrication de briquettes sur la dureté des briquettes. Les moyennes et les écarts types des résultats de la dureté des briquettes, le TEE pour chaque foyer sont rapportés. Toutes les moyennes ont ensuite été comparées à l'aide des tests de comparaison multiple (LSD). La corrélation de Pearson a été utilisée pour déterminer la relation entre les caractéristiques de différentes briquettes et entre les attributs du foyer et son acceptabilité. Une analyse de la variance a été effectuée sur les scores des attributs de foyers évalués par l'utilisateur final. En outre, l'effet de la consommation de combustible sur le score des attributs a également été

évalué. Des graphiques pour la température de la flamme en fonction du temps de combustion pour chaque gazéificateur et pour chaque type de combustible testé ont été produits. Des diagrammes à barres de CO, NO<sub>x</sub>, NO, SO<sub>2</sub>, MP<sub>1</sub> et MP<sub>2.5</sub> moyens ont été tracés pour chaque gazéificateur.

Les données relatives aux processus de production et d'utilisation des foyers de cuisson ont été entrées dans le logiciel SimaPro 8.5.2.0, où l'analyse a été effectuée. La Demande d'Energie Cumulée (DEC) est basée sur la méthode publiée parecoinvent version 2.0 et développée par PRé Consultants pour les matières premières disponibles dans la base de données SimaPro 8. La méthode est basée sur des valeurs de chauffage les plus élevées (HHV). Le ReCiPe 2016 Midpoint (I) V1.02 a été utilisé pour étudier l'impact de la production et d'utilisation des foyers de cuisson sur la santé humaine et l'environnement. Les résultats sont exprimés par MJ d'énergie utilisée pour la cuisson du riz et de la sauce tomate.

Pour l'évaluation de la toxicité *in vivo*, les résultats ont été exprimés sous forme de moyenne  $\pm$  erreur standard de la moyenne (ESM). Les moyennes ont été comparées par le test de l'analyse de la variante (ANOVA), suivi du post test de Tukey en utilisant le logiciel statistique Graph pad Prism version 8.0. Les valeurs de  $p < 0,05$ ,  $p < 0,01$  et  $p < 0,001$  ont été considérées comme statistiquement significatives à des intervalles de confiance respectifs de 95 %, 99 %, 99,9 %. Les lettres a, b et c représentent les différences significatives observées à des probabilités respectives de  $p < 0,05$ ,  $p < 0,01$  et  $p < 0,001$  en comparaison au témoin Normal. Les lettres  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  représentent les différences significatives observées à des probabilités respectives de  $p < 0,05$ ,  $p < 0,01$  et  $p < 0,001$  en comparaison au témoin satellite.

## CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

### III.1. RESULTATS

#### III.1.1. Caractérisation de briquettes

##### III.1.1.1. Vitesse de production et densités des briquettes

La Figure 20 représente une briquette produite à base de coque et de son de riz. Elle est de forme cylindrique avec un trou central. La vitesse de production de briquettes dans la briqueteuse dépend du temps nécessaire pour charger la biomasse et la compresser complètement. La briqueteuse ayant neuf cylindres d'alimentation, le temps moyen de fabrication de neuf briquettes (chargement, compression, éjection et transfert sur un plateau de séchage) était de 3,6 min (150 briquettes / h). Le temps de compression et d'éjection était 55 s pour une production de 47,12 kg de briquettes / jour (589 briquettes à 11,4 % d'humidité). Les briquettes produites étaient de forme cylindrique avec un trou central. La densité moyenne de briquettes à coque de riz était de  $600 \text{ kg} / \text{m}^3$  lorsque le temps de rétention était de 30 secondes.



Figure 20 : Briquette à base de coque et de son de riz

##### III.1.1.2. Influence de quelques paramètres sur la dureté des briquettes

La taille des particules (TP), le ratio coque-son (RCS), la méthode de séchage (MS) et la température de l'eau (TE) ont tous eu une influence sur la dureté des briquettes de coque de riz (Tableau XVI). Les briquettes ont été fabriquées à partir de particules fines et moyennes.

Les grosses particules s'émettant lorsqu'elles ont été éjectées de la machine en raison de la nature élastique de la coque. La taille des particules est un facteur important affectant la durabilité des briquettes. En règle générale, plus la taille des particules est fine, plus la durabilité est grande.

**Tableau XVI:** Effet principal et interaction des facteurs qui affectent la dureté des briquettes de balle de riz à pression constante.

<b>Facteurs</b>	<b>F-value</b>	<b>P-value</b>
<b>Modèle</b>	<b>106,3***</b>	0,000
<b>Ratio coque-son (RCS)</b>	<b>66,0***</b>	0,000
<b>Taille de particule (TP)</b>	<b>40,6***</b>	0,000
<b>Température de l'eau (TE)</b>	<b>12,1**</b>	0,004
<b>Méthode de séchage (MS)</b>	<b>6,3**</b>	0,005
RCS × TP	0,5	0,087
RCS × TE	3,3*	0,014
RCS × MS	2,8*	0,030
TP × TE	9,1*	0,015
TP × MS	4,3*	0,012
TE × MS	4,4*	0,047
RCS × TP × TE	ns	0,619
TP × TE × MS	ns	0,080
RCS × TP × MS	ns	0,087
RCS × TP × MS × TE	ns	0,072
<b>R-square</b>	<b>0,87</b>	

Légende: \*, \*\* et \*\*\*significativement différents ( $p < 0,05$  ;  $P < 0,01$  et  $p < 0,001$  respectivement), ns : non significatif. TP =taille des particules, RCS = ratio coque-son, MS = méthode de séchage et TE = température de l'eau

De façon générale, les briquettes fabriquées à partir de particules fines ( $TP < 0,3$  mm), de l'eau chaude ( $TE = 97$  ° C), séchées au soleil pendant 21 jours et indépendamment du RCS ont eu des valeurs de dureté moyenne plus élevées que celles produites avec la fraction de particules moyennes. Dans cette étude, les briquettes fabriquées à partir de son seulement (0 : 1) étaient les plus dures (132 N), tandis que celles produites avec un RCS de 1 :0, avec la fraction moyenne, de l'eau chaude ( $TE = 97$  ° C) et le séchage à l'étuve étaient les plus fragiles (1 N) (Tableau XVII).

Dans cette étude, les briquettes séchées dans des conditions ambiantes sous le soleil étaient plus dures que celles séchées à 70 ° C seulement (four) ou d'abord séchées à 70 ° C, puis dans des conditions ambiantes.

**Tableau XVII:** Effet de combinaisons des facteurs sur la dureté des briquettes à base des coques et son de riz.

<b>Ratio coque-son</b>	<b>Taille des particules</b>	<b>Température de l'eau (°C)</b>	<b>Méthode de séchage</b>	<b>Dureté moyenne (N)</b>	
<b>2:1</b>	Fine	97	Etuve + soleil	24	
			Soleil	31	
	Moyenne		Etuve	4	
	Fine	27	Etuve + soleil	8	
			Soleil	16	
	Moyenne		Etuve	4	
<b>1:2</b>	Fine	97	Etuve	55	
			Etuve + soleil	86	
			Soleil	89	
	Moyenne		Etuve	31	
	Fine	27	Etuve	30	
			Etuve + soleil	63	
<b>1:1</b>	Fine	97	Etuve	42	
			Etuve + soleil	64	
			Soleil	76	
	Moyenne	97	Etuve	09	
			Etuve + soleil	03	
			Soleil	34	
	Fine	27	Etuve	41	
			Etuve + soleil	14	
			Soleil	23	
	Moyenne	27	Etuve	35	
	<b>1:0</b>	Fine	97	soleil	62
		Moyenne	97	Etuve	01
<b>0:1</b>	<b>Fine</b>	<b>97</b>	<b>Soleil</b>	<b>132</b>	
	Moyenne	97	Etuve	38	

### **III.1.1.3. Caractéristiques des briquettes fabriquées à partir de mélanges de coque et de son et additionnées aux liants**

La Figure 21 montre les quatre types de briquettes CSF (Coque–Son de riz et Fibre de noix palme), CSB (Coque–Son de riz et Boue de noix de palme), CS (Coque–Son de riz), CCA (Charbon de Coque de riz issu de la gazéification et Argile) produites dans cette étude. Les briquettes produites étaient de forme cylindrique avec un trou central. Elles ont été produites en utilisant de l'eau à température ambiante (27° C), les fractions fines et le séchage au soleil.



**Figure 21** : Echantillons de briquettes (coque–son) consolidées par différents liants.

Légende : CSF : Coque–Son de riz et Fibre de noix palme, CSB : Coque–Son de riz et Boue de noix palme, CS : Coque–Son de riz, CCA : Charbon de Coque de riz et Argile

Les briquettes fabriquées à partir de mélanges Coque–Son collectés dans des usines avec une décortiqueuse de type Engelberg et mélangées à différents déchets de la presse de noix de palme et d’argile ont montré des différences significatives de dureté (Tableau XVIII). Les briquettes CSF étaient les plus dures (170 N), suivies de CS (101 N), tandis que les CSB et les CCA étaient les plus fragiles (20 et 21 N, respectivement).

Les briquettes CSF ont présentés la teneur en lipide la plus élevée, CCA ont également enregistré la plus grande teneur en cendres et le plus bas pouvoir calorifique. Les valeurs calorifiques des briquettes CSF, CSB et CS étaient respectivement de 18,47, 19,23 et 16,87 MJ/kg.

Les briquettes CSF, CSB, et CS avaient des temps de démarrage les plus courts ( $T < 5$  min) que celui du charbon de bois (10 min). Les briquettes CSF, CSB et CS brûlaient avec une flamme jaune, tandis que CCA brûlait avec un mélange de flammes bleues et rouges, tout comme le charbon de bois.

Les briquettes CS avaient la vitesse de combustion la plus élevée (145 g / min), tandis que les briquettes CCA présentaient la vitesse de combustion la plus faible (67 g / min). Le charbon de bois, les briquettes de CSB et de CSF avaient des vitesses de combustion similaires : 120, 109 et 126 g / min, respectivement.

Les briquettes CCA avaient la consommation spécifique de combustible la plus élevée (701g/l), tandis que les briquettes CSB avaient la plus faible.

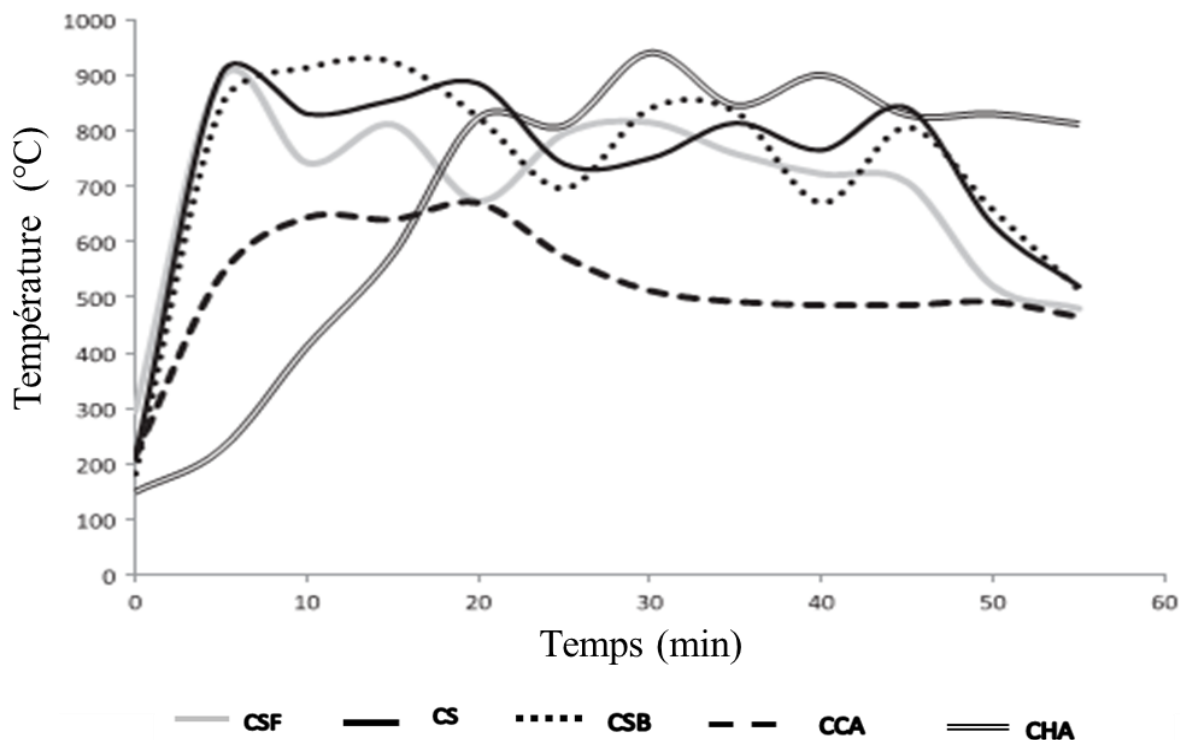
Les briquettes CSF, CSB, et CS avaient des températures de flamme supérieures à 800 °C après environ 4-5 min de combustion dans le foyer à briquettes Salmar (Figure 22). Cette température est restée supérieure à 700 °C entre 18 et 48 min de combustion et a ensuite commencé à baisser. Cette baisse de la température de la flamme a coïncidé avec l'épuisement de la biomasse de combustible et l'augmentation de la quantité de cendre produite. Pour les briquettes de CCA, la température de flamme maximale (650 °C) a été enregistrée après 20 min de combustion, mais elle s'est stabilisée et est restée au-dessus de 490 °C jusqu'au bout de 55 min. La température de la flamme pour le charbon de bois a commencé très basse, mais a atteint un pic à 930 °C après 30 minutes, restant supérieure à 800 °C même après 55 minutes. La température moyenne de la flamme sur la durée de combustion de 55 minutes ne différait pas significativement entre les différents types de combustible testés ( $P < 0,05$  ; Tableau XVIII). Après avoir chargé 4 kg de combustible dans le foyer, il a fallu 9 minutes pour que les briquettes à base de mélanges coque-son fassent bouillir 10 L d'eau, tandis que le charbon de bois prenait 14,2 minutes. Les mêmes quantités de briquettes CCA ont bouilli 5 L d'eau, mais n'ont pas réussi à faire bouillir 10 L d'eau même après 1 heure.

**Tableau XVIII:** Variation des caractéristiques des types de briquettes brûlés dans un foyer à briquettes Salmar par rapport au charbon de bois.

Type de briquettes	Dureté (N)	Lipide (g/100 g)	Pouvoir calorifique (MJ/kg)	Cendres (g/100 g)	Le temps de démarrage (min)	Vitesse de combustion à basse puissance (g/min)	Consommation spécifique de combustible à haute puissance (g/L)	Température de la flamme pendant 55 min (°C)	Temps d'ébullition (min)
<b>CSF</b>	<b>170,00 ± 3,00<sup>a</sup></b>	4,11 ± 0,13 <sup>b</sup>	18,47 ± 0,04 <sup>b</sup>	19,79 ± 0,25 <sup>c</sup>	2 <sup>b</sup>	126 ± 8 <sup>b</sup>	121 ± 7 <sup>d</sup>	684,3 ± 16,4 <sup>a</sup>	9
<b>CSB</b>	20,00 ± 0,30 <sup>c</sup>	<b>10,58 ± 0,01<sup>a</sup></b>	19,23 ± 1,67 <sup>b</sup>	17,64 ± 0,00 <sup>e</sup>	3 <sup>b</sup>	109 ± 6 <sup>c</sup>	107 ± 6 <sup>e</sup>	725,5 ± 199,5 <sup>a</sup>	9
<b>CS</b>	101,00 ± 2,00 <sup>b</sup>	2,27 ± 0,04 <sup>b</sup>	16,87 ± 1,63 <sup>b</sup>	21,33 ± 0,06 <sup>b</sup>	3 <sup>b</sup>	<b>145 ± 8<sup>a</sup></b>	136 ± 9 <sup>c</sup>	728,5 ± 188,1 <sup>a</sup>	9
<b>CCA</b>	21,00 ± 0,90 <sup>c</sup>	0,250 ± 0,02 <sup>c</sup>	<b>09,66 ± 1,02<sup>c</sup></b>	<b>68,80 ± 1,17<sup>a</sup></b>	4 <sup>b</sup>	67 ± 8 <sup>d</sup>	<b>701 ± 7<sup>a</sup></b>	518,0 ± 113,5 <sup>a</sup>	65
<b>Charbon</b>	ND	ND	31,14 ± 2,14 <sup>a</sup>	03,51 ± 0,91 <sup>d</sup>	10 <sup>a</sup>	120 ± 6 <sup>bc</sup>	195 ± 15 <sup>b</sup>	679,5 ± 260,1 <sup>a</sup>	14,2
<b>P-value</b>	0.000	0.006	0.002	0.001	0.038	0.06	0.001	0.001	0.002

Légende : Pour un caractère de briquette donnée, les valeurs de la même colonne affectées de la même lettre en exposant ne sont pas significativement différents entre les types de briquettes au seuil de probabilité indiqué. CSF : Coque–Son de riz et Fibre de noix palme, CSB : Coque–Son de riz et Boue de noix palme, CS : Coque–Son de riz, CCA : Charbon de Coque de riz et Argile. ND : non déterminé.





**Figure 22:** Température de la flamme de différents types de briquettes et de charbon de bois lors de la combustion dans un foyer à briquettes Salmar pendant une période de 55 min.

Légende : CSF : Coque–Son de riz et Fibre de noix palme, CSB : Coque–Son de riz et Boue de noix palme, CS : Coque–Son de riz, CCA : Charbon de Coque de riz et Argile. CHA : charbon de bois

### III.1.2. Comparaison entre des propriétés de combustion des briquettes à base de coque de riz, les coques de riz pures et les combustibles traditionnels

#### III.1.2.1. Métriques thermiques des différents gazéificateurs

Les données thermiques de chacun des gazéificateurs pour chacune des trois (3) phases du TEE sont enregistrées dans le Tableau XIX. Pendant les deux premières phases, es gazéificateurs PO ont mis le plus court temps à faire bouillir 5 litres d'eau (6,5 à 10,8 min), R et V ont pris 15 à 18.8 min, tandis que le foyer Mayon a pris le plus long temps (23,8 à 31,6 min). Les résultats ci-dessous indique que PO cuit plus vite, alors que M cuit lentement. Le foyer R avait la vitesse de combustion la plus basse (25,36 g / min) et le PO250, la vitesse de combustion la plus élevée (72,05 g / min). Le foyer R consommait lentement du combustible tandis que le PO250 en consommait rapidement. Le foyer Mayon avait la consommation spécifique de combustible la

plus élevée (414 g / l), tandis que le PO150 affichait la plus faible (100 g / l). La puissance de feu était maximale pour PO250 (17755 watts) suivi de M (12979 watts) et le minimum pour R (6248 watts). A la troisième phase, Le gazéificateur PO a une puissance de feu supérieure à celle des gazéificateurs R et V de la même taille. Les taux de rabattement de tous les gazéificateurs étaient bas (1–1,37), la valeur la plus basse étant enregistrée pour M. Même si le gazéificateur M brûlait rapidement, l'efficacité thermique était la plus faible (10%), alors que le PO150 affichait l'efficacité thermique la plus élevée (28%).

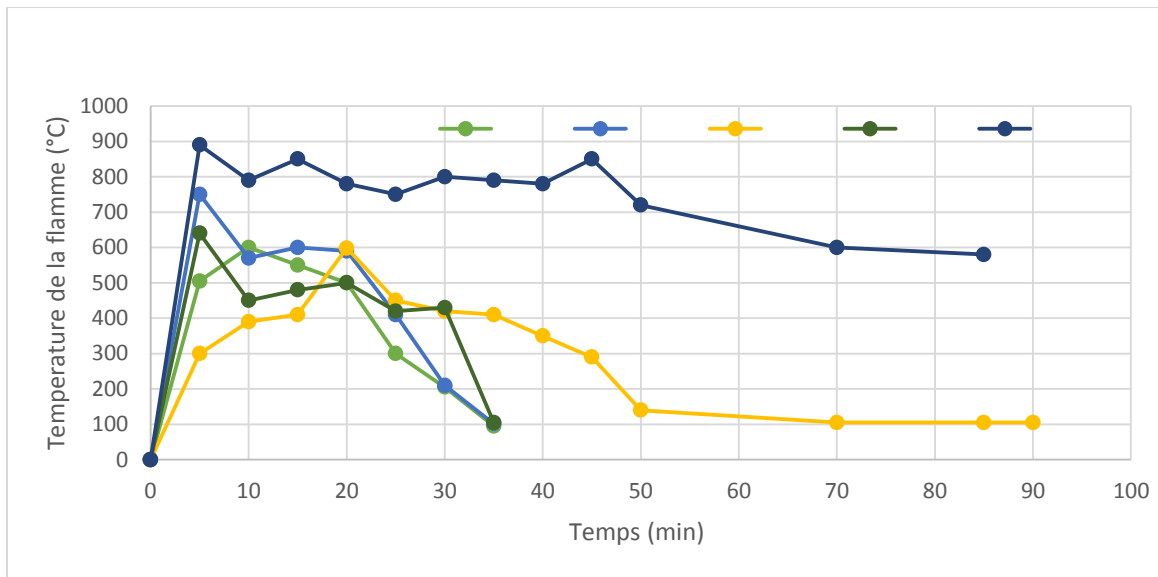
**Tableau XIX:** Les métriques thermiques des différents gazéificateurs

Type de foyer	Temps d'ébullition (min)	Vitesse de combustion (g/min)	Consommation spécifique de combustible (g/l)	Puissance de feu (Watts)	Le taux de rabattement	Efficacité thermique (%)
<i>Phase de haute puissance (démarrage à froid)</i>						
R	17,0±0,9 <sup>b</sup>	26,5±0,8 <sup>d</sup>	92,4±2,1 <sup>c</sup>	6518±202 <sup>d</sup>	-	26,3±0,0 <sup>a</sup>
V	18,8±0,9 <sup>b</sup>	28,9±1,5 <sup>d</sup>	112,2±7,4 <sup>b</sup>	7127±359 <sup>d</sup>	-	32,2±0,0 <sup>a</sup>
PO150	10,8±0,3 <sup>c</sup>	38,8±3,7 <sup>c</sup>	85,3±8,9 <sup>c</sup>	9552±916 <sup>c</sup>	-	28,6±3,0 <sup>a</sup>
PO250	7,2±0,6 <sup>c</sup>	76,2±3,6 <sup>a</sup>	113,5±11,7 <sup>b</sup>	18762±883 <sup>a</sup>	-	21,2±1,0 <sup>b</sup>
M	31,6±4,6 <sup>a</sup>	49,8±5,9 <sup>b</sup>	339,0±14,6 <sup>a</sup>	12277±1449 <sup>b</sup>	-	9,0±0,0 <sup>c</sup>
<i>Phase de haute puissance (démarrage à chaud)</i>						
R	15,5±1,6 <sup>b</sup>	29,4±4,5 <sup>d</sup>	92,2±6,6 <sup>c</sup>	7236±1109 <sup>d</sup>	-	26,4±2,0 <sup>a</sup>
V	17,4±0,5 <sup>b</sup>	29,8±0,9 <sup>d</sup>	107,2±5,6 <sup>b</sup>	7337±212 <sup>d</sup>	-	23,9±1,0 <sup>a</sup>
PO150	9,6±0,6 <sup>c</sup>	41,2±3,0 <sup>c</sup>	81,1±8,3 <sup>c</sup>	10150±732 <sup>c</sup>	-	30,2±2,0 <sup>a</sup>
PO250	6,5±0,4 <sup>c</sup>	82,8±1,8 <sup>a</sup>	110,7±7,3 <sup>b</sup>	20389±449 <sup>a</sup>	-	20,8±1,0 <sup>b</sup>
M	23,8±8,9 <sup>a</sup>	59,1±11,8 <sup>b</sup>	289,8±7,6 <sup>a</sup>	14549±291,4 <sup>b</sup>	-	10,0±2,0 <sup>c</sup>
<i>Phase de basse puissance (mijotage)</i>						
R	-	20,3±0,9 <sup>d</sup>	329,7±11,7 <sup>c</sup>	4992±220 <sup>d</sup>	1,30±0,0 <sup>b</sup>	26,6±1,0 <sup>a</sup>
V	-	31,4±14,5 <sup>d</sup>	181,1±3,7 <sup>b</sup>	5540±200 <sup>d</sup>	1,23±0,3 <sup>b</sup>	21,3±1,0 <sup>a</sup>
PO150	-	34,2±12,7 <sup>c</sup>	136,6±2,1 <sup>c</sup>	6500±700 <sup>c</sup>	1,37±0,3 <sup>c</sup>	27,7±1,0 <sup>a</sup>
PO250	-	57,3±3,0 <sup>a</sup>	481,3±11,5 <sup>b</sup>	14114±749 <sup>a</sup>	1,33±0,1 <sup>c</sup>	21,5±0,0 <sup>b</sup>
M	-	49,2±2,1 <sup>b</sup>	613,8±41,0 <sup>a</sup>	12110±522 <sup>b</sup>	1,01±0,1 <sup>a</sup>	13,0±0,0 <sup>c</sup>

**Légende :** Pour un caractère de briquette donnée, les valeurs de la même colonne affectées de la même lettre en exposant ne sont pas significativement différents entre les types de briquettes au seuil de probabilité  $p < 0,05$ . R : Rua ; V : Viet ; PO150 : Paul Olivier 150 ; PO250 : Paul Olivier 250 ; M : Mayon.

### III.1.2.2. Température de la flamme

La température de la flamme a été déterminée pour les foyers à coques de riz pures (R, V, PO150, PO250, M) et les briquettes de type CS (Figure 23). Ces résultats ont montré que la température de la flamme des briquettes de CS était la plus élevée, comparée à celle des balles de riz pures utilisées dans les gazéificateurs. La température de la flamme des briquettes de CS était supérieure à 800 °C après environ 4-5 min de combustion dans le foyer à briquettes Salmar. Cette température est restée supérieure à 700 °C entre 18 et 48 min de combustion et a ensuite commencé à baisser. En ce qui concerne les gazéificateurs, la température de flamme de PO était très élevée et atteignait 750 °C, suivie de V (640 °C), R (580 °C) et M (598 °C). Les gazéificateurs de type PO ont produit un mélange de flammes jaune clair et bleuâtre pendant toute la durée de combustion. Les foyers R et V ont produit une flamme jaune qui a provoqué le noircissement de la marmite au cours des cinq (5) premières minutes de démarrage du feu, puis la flamme a viré au bleu pendant le reste de la durée de combustion.



**Figure 23:** Température de la flamme de différents types de gazéificateurs et des briquettes CS du foyer SALMAR

Légende : chaque point représente la température à un temps T pour chaque type de foyer. Les lignes de couleur bleu foncé= Température de la flamme du foyer aux briquettes coque- son de riz (CS) ; bleu clair= Température de la flamme du foyer Paul Olivier (PO) ; verte claire= Température de la flamme du foyer Mayon (M) ; verte foncée= Température de la flamme du foyer Viet (V) et jaune= Température de la flamme du foyer Rua (R)

### **III.1.2.3. Evaluation des foyers par l'utilisateur final**

Selon les résultats du Tableau XX, l'évaluation des 9 foyers par les femmes a mis en évidence une variation ( $p < 0,05$ ) entre les foyers. Parmi les quatorze (14) attributs, les plus importants étaient les suivants : le fonctionnement, la vitesse de cuisson, l'émission de fumée, la qualité du matériau du foyer, l'odeur de fumée, le remplissage du combustible et acceptabilité du foyer. Les femmes ont trouvé que PO150, R, SAB, NAC et TPB étaient « très facile » à utiliser ; les autres gazéificateurs étaient « faciles » à utiliser et M était considéré comme « difficile » à « très difficile ». La plupart des foyers à coque riz cuisaient rapidement à l'exception de M, SAB, NAC, TCN et TPB. Les foyers PO150, R, V, SAB et NAC étaient considérés comme produisant « très peu » de fumée, PO250 et M comme produisant « un peu » de fumée, tandis que TCN et TPB étaient considérés comme produisant « trop de fumée ». De la même façon, l'odeur de fumée de PO150, R, V, SAB et NAC étaient considérés comme produisant « très faible », pour PO250 et M comme « faible », tandis que TCN et TPB avaient une odeur « trop forte ». À la vue de ce qui précède, le foyer le plus apprécié était le foyer R suivi du NAC.

**Tableau XX:** Critères d'évaluation des foyers par les utilisateurs finaux.

Attributs		PO150	PO250	R	V	M	SAB	NAC	TCN	TPB	p-value
1.	Fonctionnement	4,4 <sup>a</sup>	4,0 <sup>b</sup>	4,8 <sup>a</sup>	4,5 <sup>a</sup>	2,0 <sup>c</sup>	4,5 <sup>a</sup>	4,4 <sup>a</sup>	4,3 <sup>b</sup>	4,6 <sup>a</sup>	0,005 **
2.	Portabilité	4,6 <sup>a</sup>	4,4 <sup>a</sup>	4,8 <sup>a</sup>	3,9 <sup>b</sup>	3,1 <sup>b</sup>	2,1 <sup>c</sup>	4,3 <sup>b</sup>	3,5 <sup>b</sup>	3,5 <sup>b</sup>	0,619 ns
3.	Vitesse de cuisson	4,9 <sup>a</sup>	4,8 <sup>a</sup>	4,7 <sup>a</sup>	4,9 <sup>a</sup>	4,3 <sup>b</sup>	4,0 <sup>b</sup>	3,9 <sup>b</sup>	2,9 <sup>c</sup>	4,2 <sup>b</sup>	0,047 *
4.	Emission de fumée	4,5 <sup>a</sup>	3,7 <sup>b</sup>	4,6 <sup>a</sup>	4,6 <sup>a</sup>	3,1 <sup>b</sup>	4,5 <sup>a</sup>	4,4 <sup>a</sup>	2,0 <sup>c</sup>	2,2 <sup>c</sup>	0,012 *
5.	Hauteur du foyer	3,0 <sup>b</sup>	1,9 <sup>c</sup>	3,5 <sup>a</sup>	2,8 <sup>b</sup>	2,6 <sup>b</sup>	2,8 <sup>b</sup>	4,4 <sup>a</sup>	2,8 <sup>b</sup>	3,9 <sup>a</sup>	0,059 ns
6.	intensité de la flamme	4,9 <sup>a</sup>	4,9 <sup>a</sup>	4,8 <sup>a</sup>	4,6 <sup>a</sup>	3,1 <sup>c</sup>	4,7 <sup>a</sup>	4,1 <sup>b</sup>	3,1 <sup>c</sup>	3,5 <sup>c</sup>	0,072 ns
7.	Stabilité	4,8 <sup>a</sup>	4,6 <sup>a</sup>	4,9 <sup>a</sup>	4,8 <sup>a</sup>	4,5 <sup>b</sup>	5,0 <sup>a</sup>	4,4 <sup>b</sup>	5,0 <sup>a</sup>	4,9 <sup>a</sup>	0,78 ns
8.	Sécurité	5,0 <sup>a</sup>	3,7 <sup>b</sup>	4,7 <sup>a</sup>	3,4 <sup>b</sup>	3,6 <sup>b</sup>	2,5 <sup>c</sup>	4,7 <sup>a</sup>	4,0 <sup>b</sup>	2,1 <sup>c</sup>	0,245 ns
9.	Qualité du matériau du foyer	4,1 <sup>b</sup>	3,0 <sup>b</sup>	4,2 <sup>b</sup>	4,8 <sup>a</sup>	2,8 <sup>c</sup>	4,5 <sup>a</sup>	3,2 <sup>c</sup>	5,0 <sup>a</sup>	2,0 <sup>c</sup>	0,015 *
10.	Temps de démarrage de flamme	1,3 <sup>b</sup>	0,8 <sup>b</sup>	0,8 <sup>b</sup>	2,1 <sup>a</sup>	1,9 <sup>a</sup>	2,1 <sup>a</sup>	1,8 <sup>a</sup>	1,2 <sup>b</sup>	1,7 <sup>a</sup>	0,268 ns
11.	Odeur de fumée	4,7 <sup>a</sup>	3,6 <sup>b</sup>	4,5 <sup>a</sup>	4,7 <sup>a</sup>	4,1 <sup>b</sup>	4,5 <sup>a</sup>	4,6 <sup>a</sup>	2,0 <sup>c</sup>	2,2 <sup>c</sup>	0,001 **
12.	Remplissage	1,4 <sup>c</sup>	1,2 <sup>c</sup>	2,2 <sup>c</sup>	3,7 <sup>b</sup>	4,2 <sup>b</sup>	4,8 <sup>a</sup>	3,3 <sup>b</sup>	1,9 <sup>c</sup>	4,9 <sup>a</sup>	0,14 *
13.	Temps de cuisson du riz (min)	34,1 b	26,7 c	30,2 b	39,9 a	34,6 b	29,5 c	44,5 a	42,1 a	29,9 c	0,41 ns
14.	Acceptabilité globale du foyer	4,4 <sup>a</sup>	4,3 <sup>b</sup>	4,8 <sup>a</sup>	4,6 <sup>a</sup>	2,2 <sup>c</sup>	3,8 <sup>b</sup>	4,7 <sup>a</sup>	1,9 <sup>c</sup>	2,5 <sup>c</sup>	0,03 *

Légende : R : Rua ; V : Viet ; PO150 : Paul Olivier 150 ; PO250 : Paul Olivier 250 ; M : Mayon ; Salmar -Briquette (SAB), Nansu -Charbon (NAC), Trépied - Coques de Noix de palme (TCN) et Trois Pierres -Bois (TPB). Significance : \*\*p≤0.001 ; \* p≤0.05 ; ns- non significatif.

### III.1.3. Evaluation de l'ACV des foyers à coques de riz

#### III.1.3.1. Réalisation de l'inventaire du cycle de vie (ICV)

L'inventaire des flux de matière et d'énergie est utilisé pour développer le bilan massique du processus de production. L'objectif principal du bilan massique est de déterminer les consommations spécifiques de la matière première et du procédé pour la production et l'utilisation de chacun des foyers.

##### III.1.3.1.1. Inventaire du flux entrant

Les données du Tableau XXI indiquent les entrants (*input*) et les sortants (*output*) pour la production et l'utilisation des gazéificateurs. En règle générale, la demande de ressources pour la fabrication de PO150 était moindre que pour les autres foyers. Un artisan a consacré moins de temps (20 heures) à la construction du PO150 par rapport aux autres Mayon (40 heures), PO250, Rua et Viet (48 heures). De même, le PO150 utilisait 3,8 kg d'acier, 30 m de baguette de soudage suivi de Viet, Rua et le PO250, tandis que M avait besoin de beaucoup plus soit 14,2 kg d'acier et 60 m de soudage. Le processus de cuisson a démontré que le foyer M était le plus lent à cuire ce plat (environ 58 min), tandis que le PO250 était le plus rapide (environ 42 min), mais utilisait la plus grande quantité de coque de riz (3,2 kg). Les données ont montré que les femmes utilisaient beaucoup plus d'énergie pour cuisiner avec du PO250 (54,4 MJ) suivi du M (47,9 MJ). Concernant les énergies sortant du système d'utilisation des foyers, notamment les émissions atmosphériques et Charbon de coque de riz, PO250 a enregistré la concentration de Monoxyde de carbone (28.933 pg) et de quantité de charbon les plus élevées suivi du foyer M tandis R en a produit le moins. En ce qui concerne l'électricité, tous les foyers ont utilisé presque la même quantité. Le foyer R avait besoin de moins d'énergie (20,6 MJ). Le monoxyde de carbone et les matières particulaires sont les plus produits, tandis que des quantités négligeables de NO<sub>x</sub>, de NO et de SO<sub>2</sub> sont produites au stade de la cuisson. Par conséquent, le PO250 a contribué le plus largement aux émissions atmosphériques (CO, NO<sub>x</sub>, NO, SO<sub>2</sub> et MP) et aux émissions dans le sol. L'évaluation des fumées produites sont mieux décrites à partir des Figures 24 et 25.

**Tableau XXI:** Les intrants (*input*) et sortants (*output*) pour la production et l'utilisation des gazéificateurs.

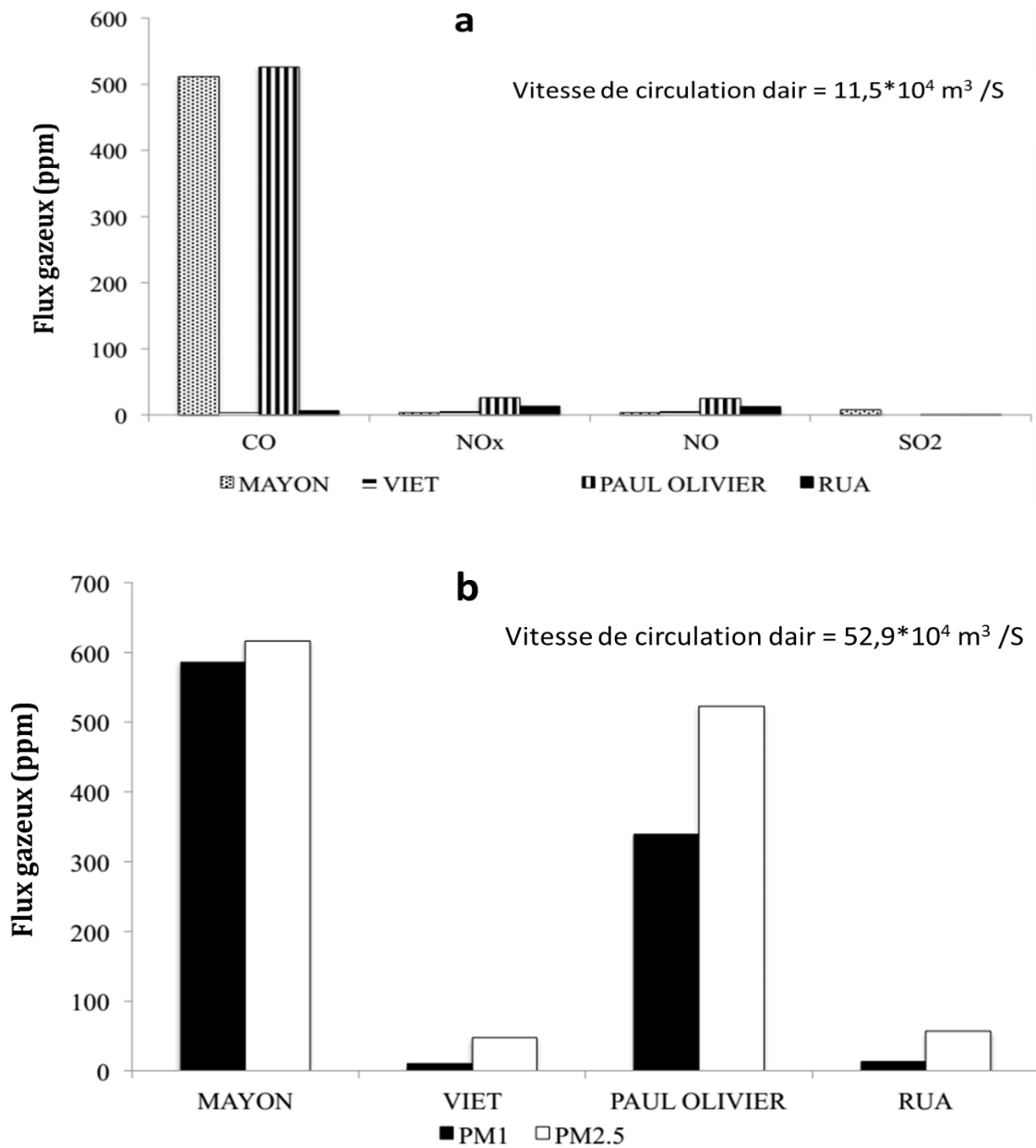
Flux d'énergies entrants et sortants	Unité	Type de foyers				
		M	PO250	PO150	V	R
Le travail manuel (temps passé pour le soudage par un artisan)	hr	40	48	20	48	48
Quantité d'acier utilisé	kg	14,2	6,4	3,8	6	6,2
Baguette de soudage	m	60	60	30	40	60
Temps passé pour la cuisson	min	57,7	42,3	51,3	48	47,7
L'énergie utilisée pour la cuisson du riz et la sauce tomate	MJ	47,9	54,4	33	23,1	20,6
Quantité de coque de riz utilisée	kg	2,9	3,2	2,0	1,4	1,3
Electricité	kWh	14	15	15	15	15
<b>Les émissions atmosphériques</b>						
Monoxyde de carbone	pg	18.512	28.933	24.137	3.288	3.244
Les particules <10 um (mobile)	pg	170.703	5.224	9.952	7.565	1.817
<b>Émissions dans le sol</b>						
Charbon de coque de riz	kg	1,9	2,1	1,3	0,9	0,8

Légende: R: Rua; V: Viet; PO150: Paul Olivier 150; PO250: Paul Olivier 250; M: Mayon; hr: heure; kg: kilogramme; m: mètre; min: minute; MJ: Megajoule; kWh: kilowatts; pg: picogramme.

### III.1.3.1.2. Inventaire du flux sortant de la gazéification des foyers

Le monoxyde de carbone et les matières particulaires sont les plus produits, tandis que des quantités négligeables de NO<sub>x</sub>, de NO et de SO<sub>2</sub> sont produites au stade de la cuisson. Par conséquent, la PO250 ont contribué le plus largement aux émissions atmosphériques (CO, NO<sub>x</sub>, NO, SO<sub>2</sub> et MP) comme l'indique les Figures 24 et 25.

Les foyers PO et M ont produit de grandes quantités de CO (525 et 511 ppm, respectivement) (Figure 24a). Le PO a produit également des quantités légèrement élevées de NO<sub>x</sub> et de NO (26,4 et 24,1 ppm, respectivement). Ces valeurs augmentent rapidement dans une pièce fermée mais diminuent dans une pièce ventilée. Les niveaux de CO, NO<sub>x</sub> et NO dans une pièce ventilée tombent à 32, 3,5 et 4,5 ppm, respectivement (Figure 24b).



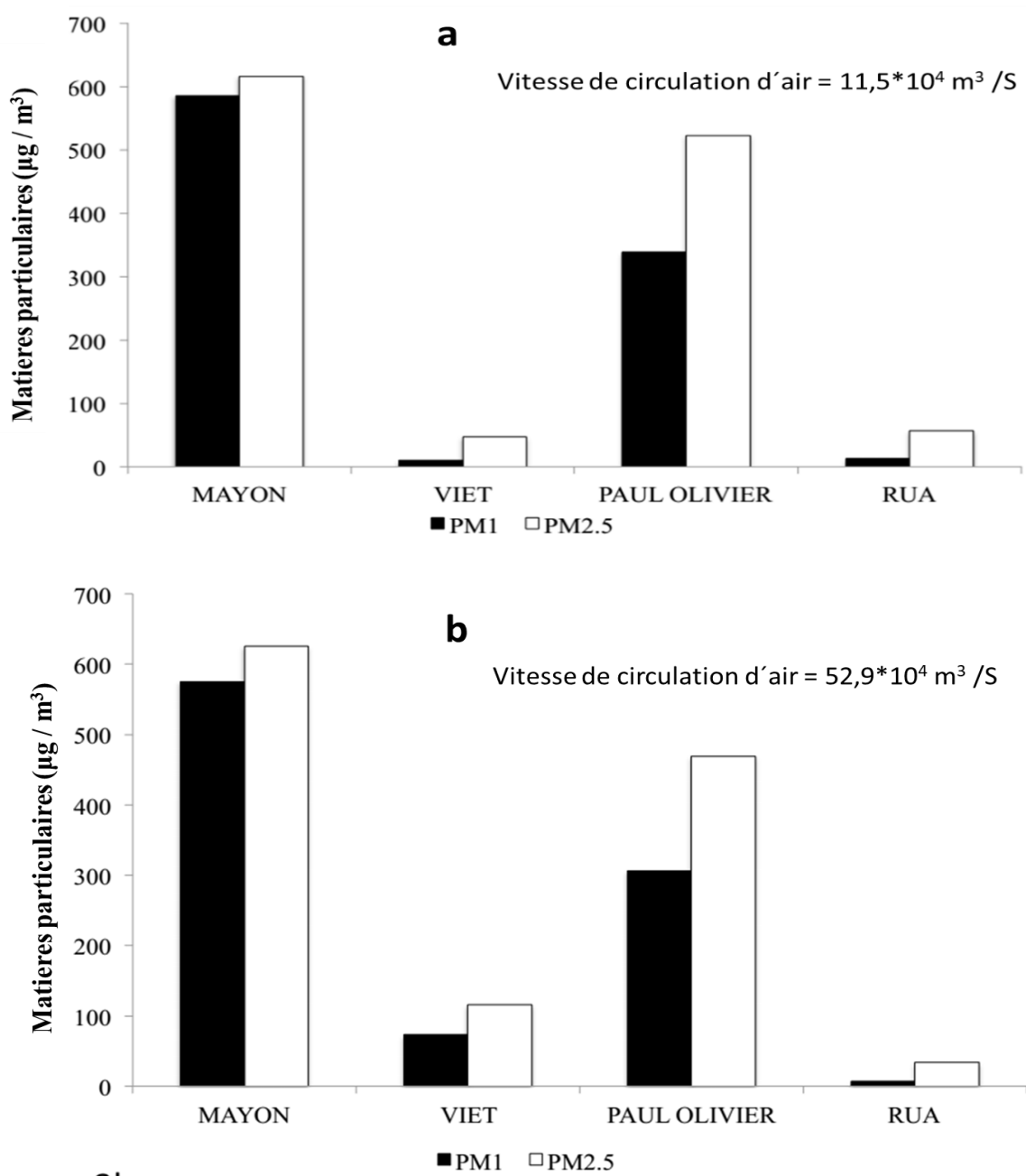
**Figure 24:** Variation des flux gazeux émis par différents gazéificateurs de balles de riz (a) dans une pièce fermée et (b) dans une pièce ouverte.

Légende : chaque barre représente les proportions de CO : Monoxyde de carbone ; NOx : Oxydes d'azote : NO : Monoxyde d'azote et SO<sub>2</sub> : Dioxyde de soufre produits par type de foyer.

Le gazéificateur M a produit la plus grande quantité de particules MP<sub>1</sub> et MP<sub>2.5</sub> (586 et 616 µg / m<sup>3</sup>), suivi de PO (338 et 522 µg / m<sup>3</sup>). Cependant, ces valeurs sont restées inchangées, que la



pièce soit ventilée ou non (Figures 25 a et b). Les quantités les plus faibles de particules  $MP_1$  et  $MP_{2,5}$  ( $7,4$  et  $34 \mu\text{g} / \text{m}^3$ ) ont été enregistrées dans la salle ventilée lorsque R était utilisé.



**Figure 25:** Variation des matières particulaires émises par différents gazéificateurs de balles de riz (a) dans une pièce fermée et (b) dans une pièce ouverte.

Légende : chaque barre représente les proportions  $MP_1$  et  $MP_{2,5}$  : matières particulaires de diamètre inférieur ou égal à 1 et 2,5  $\mu\text{m}$  respectivement produites par type de foyer.

### **III.1.3.2. Evaluation de l'impact des gazéificateurs à coques de riz sur l'environnement et la santé**

#### **III.1.3.2.1. Energie Consommée le long du cycle de vie**

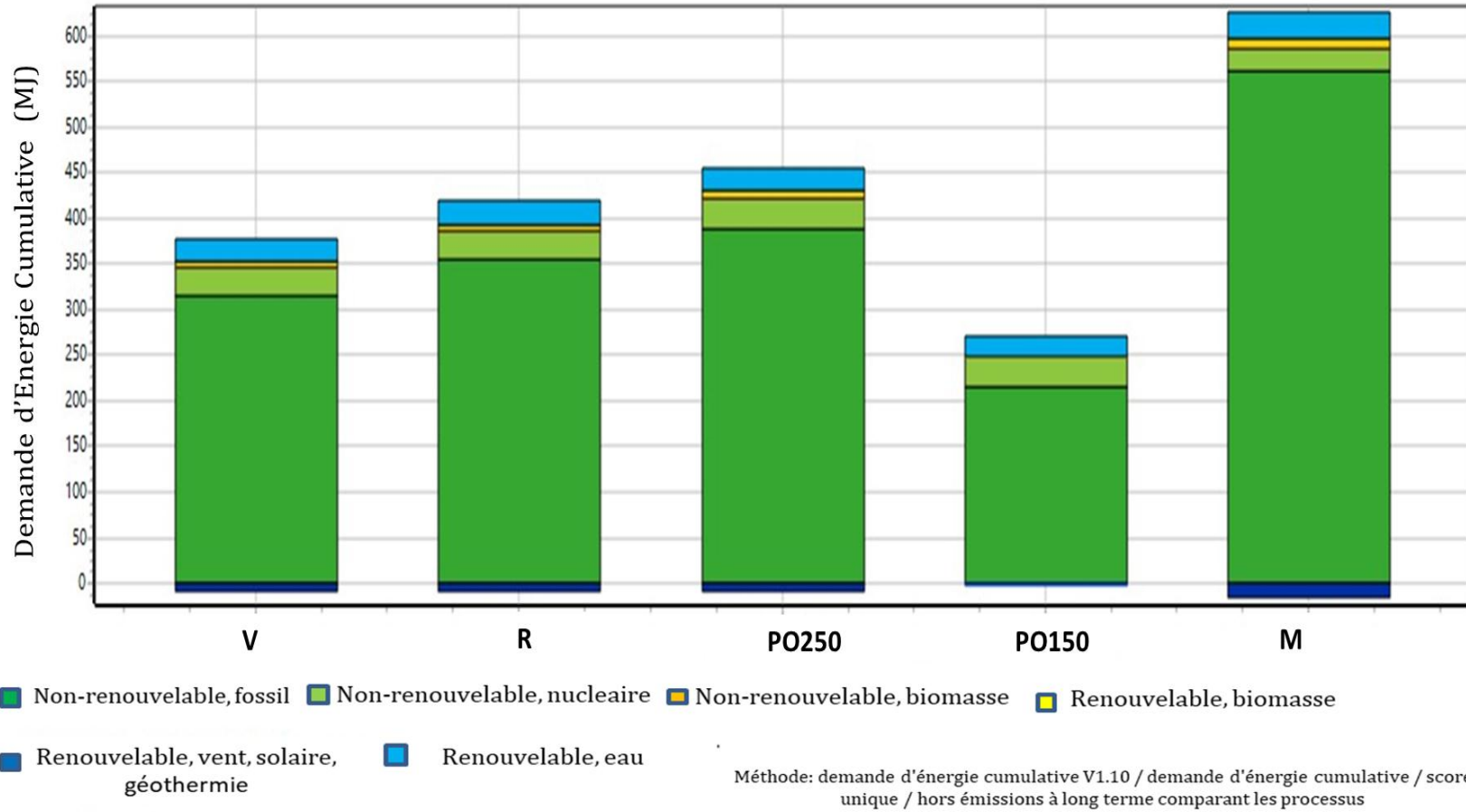
Demande d'énergie cumulative est une méthode de score permettant de calculer l'énergie consommée tout au long du cycle de vie d'un bien en tenant compte des catégories suivantes : énergie non-renouvelable (nucléaire, énergies fossiles) et de l'énergie renouvelable (biomasse, hydraulique et éolienne, solaire et géothermique).

Les résultats présentés sur la Figure 26 indiquent de manière générale que la demande d'énergie cumulative non-renouvelable est dominée dans tous les foyers. Le foyer PO150 a enregistré la DEC la plus faible (268 MJ), suivi de V, R et PO250, tandis que M a enregistré le DEC la plus élevée (610 MJ). Le foyer M est responsable de l'impact le plus important dû au fait qu'il consomme le plus de combustible car fonctionne en mode continu et nécessite plus de ressources pour son fonctionnement.

#### **III.1.3.2.2. Facteurs de caractérisation de l'impact sur l'environnement et la santé**

Suite au recensement des données de la réalisation de l'inventaire du cycle de vie des différents foyers et à l'introduction de celles-ci dans le logiciel SimaPro, l'analyse du logiciel donne le Tableau XXII qui représente l'impact de la production et de l'utilisation des gazéificateurs sur la santé humaine et l'environnement.

En tenant compte des facteurs de caractérisation, la charge environnementale de l'utilisation du foyer de cuisson a été traduite en impacts environnementaux et humains spécifiques. Notre évaluation d'impact repose sur un calcul général des facteurs de caractérisation utilisant les 18 catégories Midpoint ReCiPe: 1) réchauffement climatique, 2) appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique, 3) rayonnements ionisants, 4) formation d'ozone (santé humaine), 5) formation de fines particules, 6) formation d'ozone (écosystème terrestre), 7) Acidification terrestre, 8) Eutrophisation des eaux douces, 9) Eutrophisation des zones marines, 10) Écotoxicité terrestre, 11) Ecotoxicité des eaux douces, 12) Écotoxicité en milieu marin, 13) Toxicité cancérogène pour l'homme, 14) Toxicité non cancérogène pour l'homme, 15) Pénurie d'utilisation des sols, 16) Pénurie de ressources minérales, 17) Ressource fossile, 18 ) Consommation d'eau.



**Figure 26:** Demande d'énergie Cumulative pour différents types de gazéificateurs

Légende : Chaque barre représente les différentes demandes d'énergie cumulative (DEC). La couleur verte : DEC Non-renouvelable, fossile ; vert clair : DEC Non-renouvelable, nucléaire ; orange : DEC Non-renouvelable, biomasse ; jaune : DEC renouvelable, biomasse ; bleu : DEC renouvelable, vent, solaire, géothermie ; bleu clair : DEC renouvelable, eau. R: Rua; V: Viet; PO150: Paul Olivier 150; PO250: Paul Olivier 250; M: Mayon

Les résultats de la caractérisation du niveau d'impact (Tableau XXII) indiquent qu'il existe une différence d'impact entre les foyers. Les principales catégories ayant eu un impact considérable sont l'écotoxicité terrestre, le réchauffement climatique, la consommation d'eau, la rareté des ressources fossiles et l'utilisation des terres. Il est évident que M est le foyer à balle de riz qui a contribué aux principaux impacts environnementaux tout au long du cycle de vie. M est suivi de PO250, tandis que PO150 a fourni les meilleurs indices. Par exemple, en ce qui concerne l'écotoxicité terrestre, M en a enregistré 127 de 1,4-DCB / MJ (1,4-dichlorobenzène / MJ d'énergie produite), tandis que le PO150 était de 18,56 de 1,4-DCB par MJ. En ce qui concerne le réchauffement climatique, le PO150 a enregistré la plus faible valeur (31,8 kg d'équivalent CO<sub>2</sub> par MJ), tandis que M a enregistré la valeur la plus grande (93 kg d'équivalent CO<sub>2</sub> par MJ). De plus, pour la toxicité non cancérogène chez l'homme, le PO150 a enregistré des valeurs inférieures de 1,4-DCB (0,21) par rapport à M (0,41).

### **III.1.4. Evaluation de la toxicité *in vivo* des coques de riz utilisée comme combustibles chez les rats**

#### **III.1.4.1. Toxicité aiguë**

Après administration orale de l'eau distillée (Groupe témoin) et de l'eau distillée bouillie sur le gazéificateur à une dose unique de 2 ml/ 100 g de poids corporel (au groupe test), les rats ont été observés quotidiennement pendant 14 jours. Le taux de mortalité, les paramètres comportementaux et le poids relatif des organes ont été notés.

##### **III.1.4.1.1. Détermination de la DL50**

A l'issue de 14 jours d'observation, aucun décès n'a été constaté chez les rats traités, ce qui n'a pas permis la détermination de la DL50.

**Tableau XXII:** Impact de la production et de l'utilisation des gazéificateurs sur la santé humaine et l'environnement.

Categories d'impact		Unité	V	R	P0250	P0150	M
1.	<b>Le réchauffement climatique</b>	Kg éq CO <sub>2</sub>	46,35	51,51	59,64	<b>31,81</b>	<b>93,02</b>
2.	Appauvrissement de l'ozone stratosphérique	Kg éq CFC <sub>11</sub>	1,30 E-05	1,37 E-05	2,71 E-05	1,62 E-05	2,76 E-05
3.	Rayonnement ionisant	KBq Co-60eq	0,18	0,18	0,21	0,17	0,43
4.	La formation de l'ozone pour la santé humaine	kg éq NO <sub>x</sub>	0,71 E-02	0,87 E-02	1,50 E-02	0,58 E-02	1,17 E-02
5.	La formation de particules fines	Kg éq PM <sub>2,5</sub>	4,65 E-02	5,70 E-02	5,79 E-02	2,04 E-02	9,70 E-02
6.	La formation de l'ozone, les écosystèmes terrestres	kg éq NO <sub>x</sub>	1,04 E-02	1,26 E-02	1,90 E-02	0,74 E-02	1,87 E-02
7.	Acidification terrestre	Kg éq SO <sub>2</sub>	0,11	0,10	0,14	0,14	0,20
8.	Eutrophisation de l'eau douce	kg éq P	0,12 E-02	0,13 E-02	0,18 E-02	0,09 E-02	0,23 E-02
9.	L'eutrophisation marine	eq kg N	0,6 E-02	0,54 E-02	1,37 E-02	0,09 E-02	1,24 E-02
10.	<b>Écotoxicité terrestre</b>	Kg 1,4-DCB	73,99	102,60	107,89	<b>18,56</b>	<b>127,11</b>
11.	Écotoxicité d'eau douce	Kg 1,4-DCB	0,45	0,40	1,01	0,63	0,92
12.	Écotoxicité Marine	Kg 1,4-DCB	0,29	0,27	0,63	0,37	0,58
13.	Toxicité cancérogène humaine	Kg 1,4-DCB	1,76 E-02	2,50 E-02	2,55 E-02	0,36 E-02	2,95 E-02
14.	Toxicité non cancérogène humaine	Kg 1,4-DCB	0,20	0,20	0,35	<b>0,21</b>	<b>0,41</b>
15.	<b>Occupation des terres</b>	eq culture M <sup>2</sup>	2,76	2,62	5,94	3,52	5,62
16.	Rareté des ressources minérales	eq kg Cu	0,82	0,99	1,01	0,34	1,66
17.	<b>Rareté des ressources fossiles</b>	Kg eq huile	5,27	6,10	6,83	3,09	10,30
18.	<b>Consommation d'eau</b>	m <sup>3</sup>	7,63	7,63	8,17	7,68	1,22

**Légende:** R: Rua; V: Viet; PO150: Paul Olivier 150; PO250: Paul Olivier 250; M: Mayon. Avec CO<sub>2</sub>: Dioxyde d'azote; CFC: Chlorfluorocarbure; NO<sub>x</sub>: Oxyde d'azote; PM<sub>2.5</sub>: Matière particulaire dediamètre ≤ 2,5 µm; SO<sub>2</sub>: Dioxyde de soufre; P: Phosphore; N: Azote; 1,4-DCB: 1,4-Dichlorobenzène; Cu: Cuivre.

### III.1.4.1.2. Évaluation des paramètres comportementaux

L'administration par voie orale chez les rats femelles d'une dose unique de 2 ml/ 100 g pc de l'eau distillée bouillie aux coques de riz n'a provoqué chez celles-ci aucun signe apparent de toxicité ni pendant les 30 premières minutes d'observation, ni au bout des 3 premières heures, ni même tout au long de l'étude. Aucun effet sur le comportement des animaux (mobilité, agressivité, sensibilité à la douleur ou au bruit ou à la locomotion) en comparaison au témoin, n'a été observé (Tableau XXIII).

**Tableau XXIII** : Effets de l'eau distillée bouillie à la coque de riz sur quelques paramètres physiologiques chez les rats au cours des 3 heures ainsi que des 14 jours qui suivent l'administration.

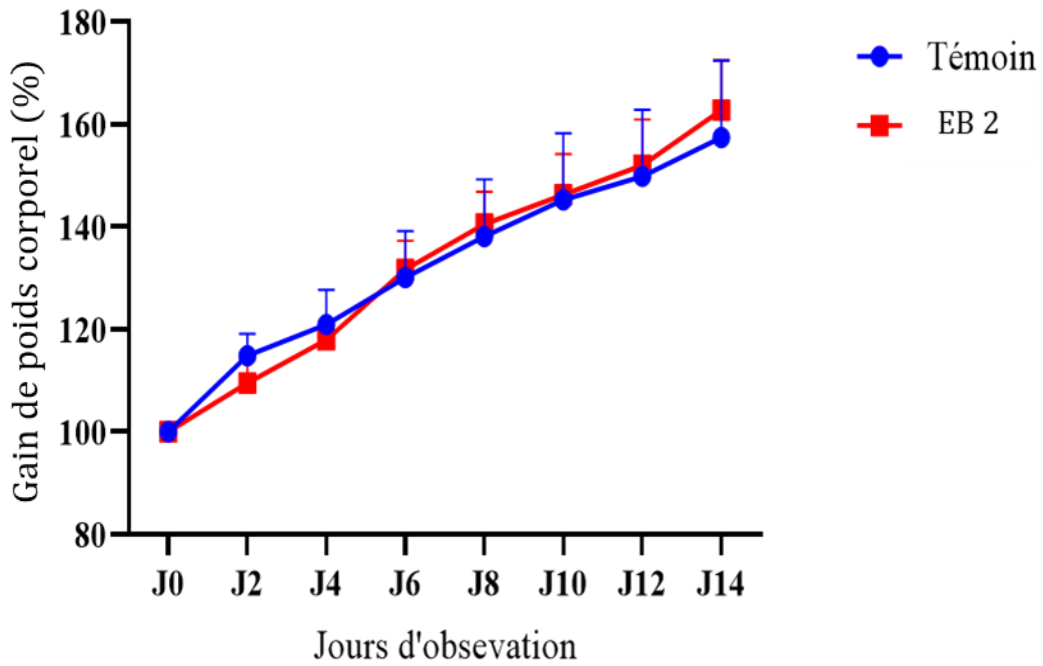
Paramètres	Temps d'observation des rats									
	Témoin					EB 2				
	30 min	4h	J6	J10	J14	30 min	4h	J6	J10	J14
Pelage	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Tremblements	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Toilettage	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Sensibilité au bruit	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Aspect des selles	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Mobilité	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Nombre de morts	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Légende : N= Normale ; EB 2 : rats traités à l'eau bouillie aux coques de riz à 2 ml/ 100g pc.

### III.1.4.1.3. Suivi du poids corporel et du poids relatif des organes

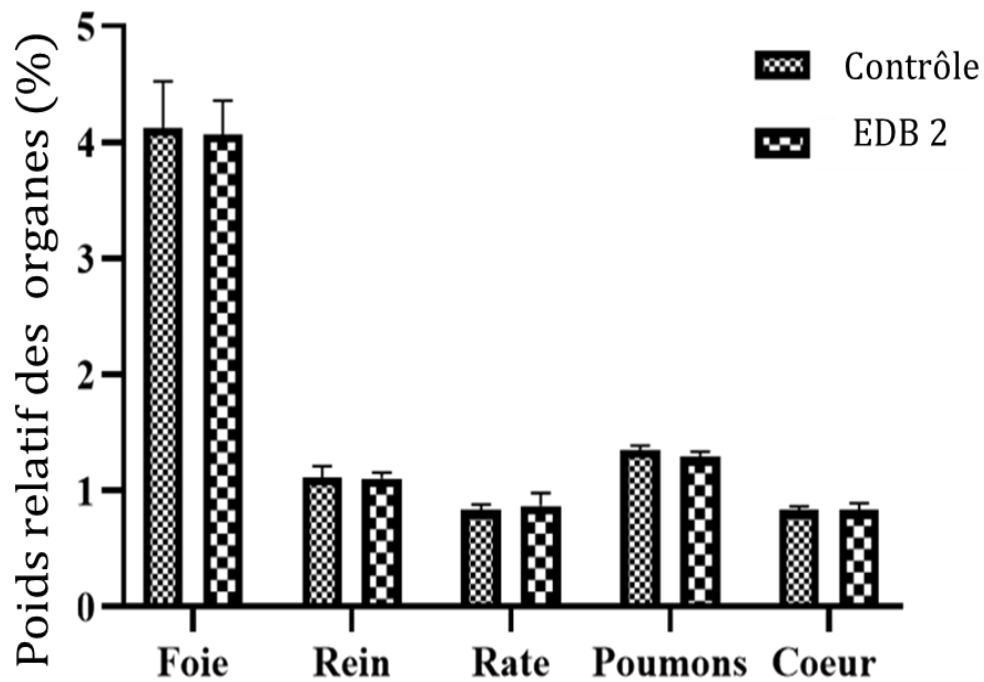
Les augmentations de pourcentage de poids corporel des différents groupes pendant la période expérimentale après administration des échantillons d'eau sont reportées dans la Figure 27 ci-dessous. De façon générale on remarque que les deux (2) groupes ont vu leur poids augmenter sans interruption anormale pendant la phase expérimentale aussi bien chez les femelles du groupe contrôle que chez les femelles du groupe test.

Le poids relatif du foie, des reins, de la rate, des poumons, et du cœur des animaux ayant reçu l'eau bouillie aux coques de riz après un suivi de 14 jours est récapitulé dans la Figure 28. Aucune différence significative n'a été observée sur le poids relatif des organes des animaux traités à la dose unique de 2 ml/ 100g de pc d'eau bouillie aux coques de riz par rapport aux rats témoins.



**Figure 27 :** Evolution pondérale des rats des groupes témoin et test

Légende : n=4 correspondant au nombre de rats par sexe ; Témoin : rats sains traités à l'eau distillée ; EB 2 : rats traités à l'eau bouillie aux coques de riz à 2 ml/ 100g pc.



**Figure 28:** Poids relatif des organes des groupes de rats traités et témoins

Légende : Chaque barre représente la moyenne  $\pm$  ESM ; n=4 correspondant au nombre de rats par sexe ; Témoin : rats sains traités à l'eau distillée ; EB 2 : rats traités à l'eau bouillie aux coques de riz à 2 ml/100g pc.

### III.1.4.2. Toxicité sub-chronique

Les effets liés à l'administration quotidienne par voie orale à des doses répétées des échantillons d'eau ont été appréciés après l'évaluation des paramètres comportementaux et de croissance pondérale, du poids relatif des organes et des paramètres biochimiques, hématologique et histologique.

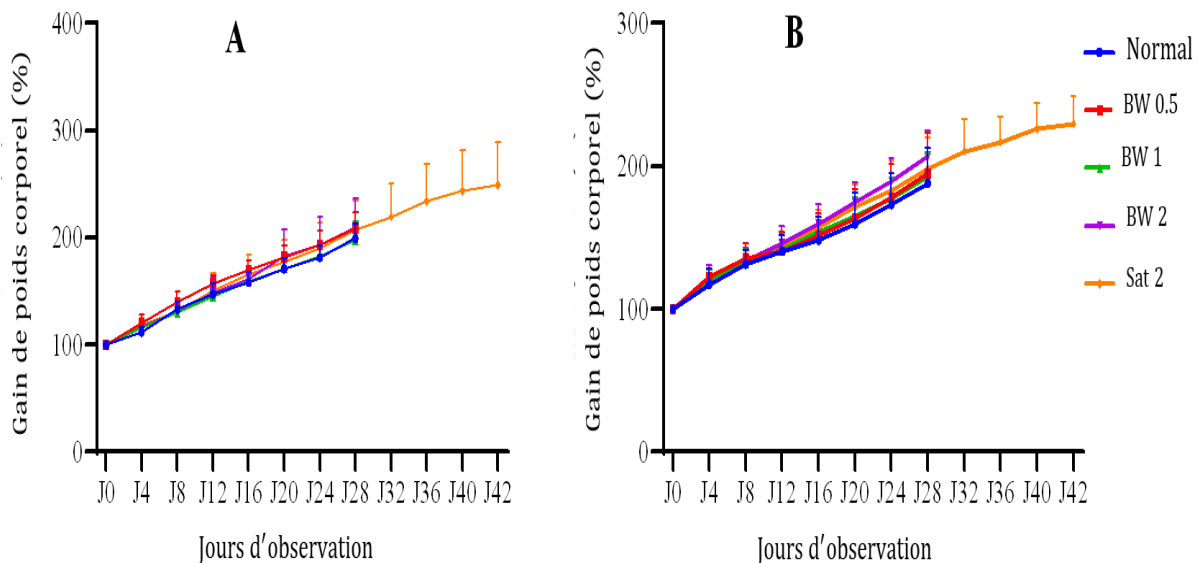
#### III.1.4.2.1. Évaluation des paramètres comportementaux

L'observation du comportement tout au long de la période d'étude a permis de constater que, parmi les doses de la substance administrée, aucun changement comportemental n'est observé pendant 28 jours et même 2 semaines après l'arrêt du traitement.

#### III.1.4.2.2. Evolution de la croissance pondérale et du poids relatif des organes

##### III.1.4.2.2.1. Evolution de la croissance pondérale

Les augmentations de pourcentage de poids corporel des différents groupes pendant la période expérimentale après administration de différentes doses sont reportées dans la Figure 29 A et B ci-dessous.



**Figure 29:** Evolution pondérale des rats mâles (A) et femelles (B) traités à différentes doses d'eau bouillie aux coques de riz

Légende : Chaque valeur est représentée par la moyenne  $\pm$  Ecart Standard Moyen (ESM) ; n=4 correspondant au nombre de rats par sexe ; Normal : rats sains traités à l'eau distillée ; SAT : Lot satellite traité à 2 ml/100g pc d'eau bouillie aux coques puis observé 14 jours après la fin de l'expérimentation, EB 0,5, EB 1, EB 2 : lots de rats traités à l'eau bouillie aux coques de riz aux doses respectives de 0,5, 1, et 2 ml/ 100g de poids corporel.

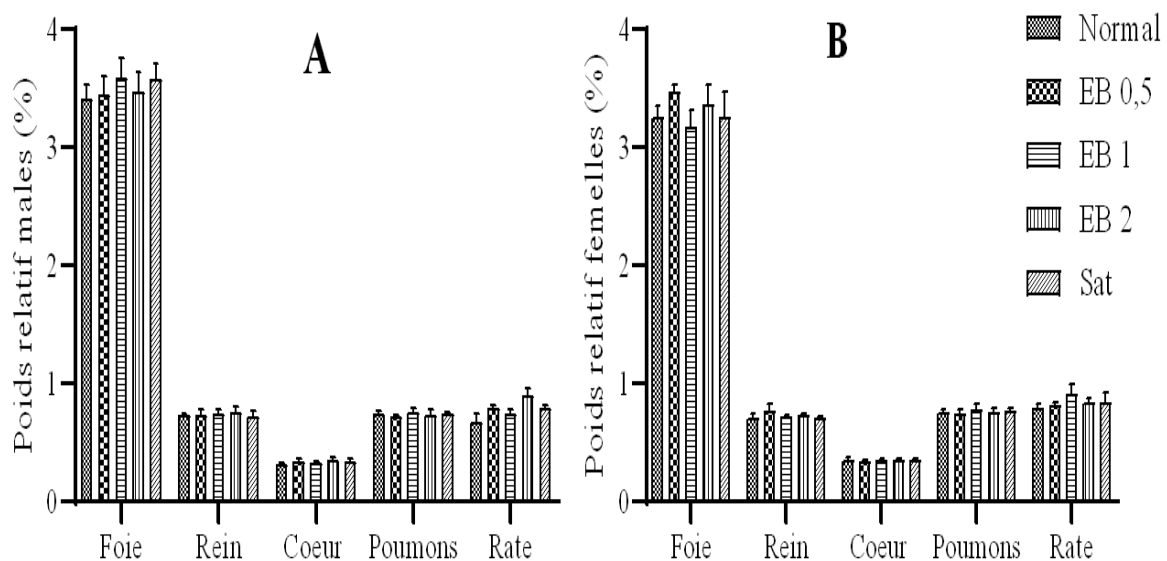
Il ressort de cette figure que l'administration de l'eau bouillie aux coques de riz a entraîné une évolution normale du poids corporel autant chez les rats mâles que chez les rats



femelles. L'eau bouillie aux doses de 5, 10, et 2 ml/ 100g pc n'a provoqué aucune variation significative du poids corporel pendant les 28 jours de traitement en comparaison aux rats normaux. De même, 14 jours après l'arrêt du traitement, aucun signe de réversibilité n'a été observé. De façon générale, on remarque que tous les groupes ont vu leur poids augmenter sans interruption anormale pendant la phase expérimentale aussi bien chez les femelles (A) que chez les mâles (B)

### III.4.2.2.2. Evolution du poids relatif des organes de détoxification

La Figure 30 ci-dessous présente les effets de l'eau bouillie aux coques de riz sur le poids relatif de quelques organes de détoxification. Il en ressort que l'administration de l'eau bouillie aux coques de riz à différentes doses pendant 28 jours n'a entraîné aucune modification significativement remarquable du poids relatif du foie, du rein, de la rate, des poumons et du cœur des groupes test en comparaison au groupe control traité à de l'eau distillée. De même, 14 jours après arrêt du traitement, les organes de ces animaux (Satellite) présentaient un poids relatif normal en comparaison au témoin normal.



**Figure 30:** Effets de l'eau bouillie aux coques de riz sur le poids relatif des organes de détoxification des rats mâles (A) et femelles (B)

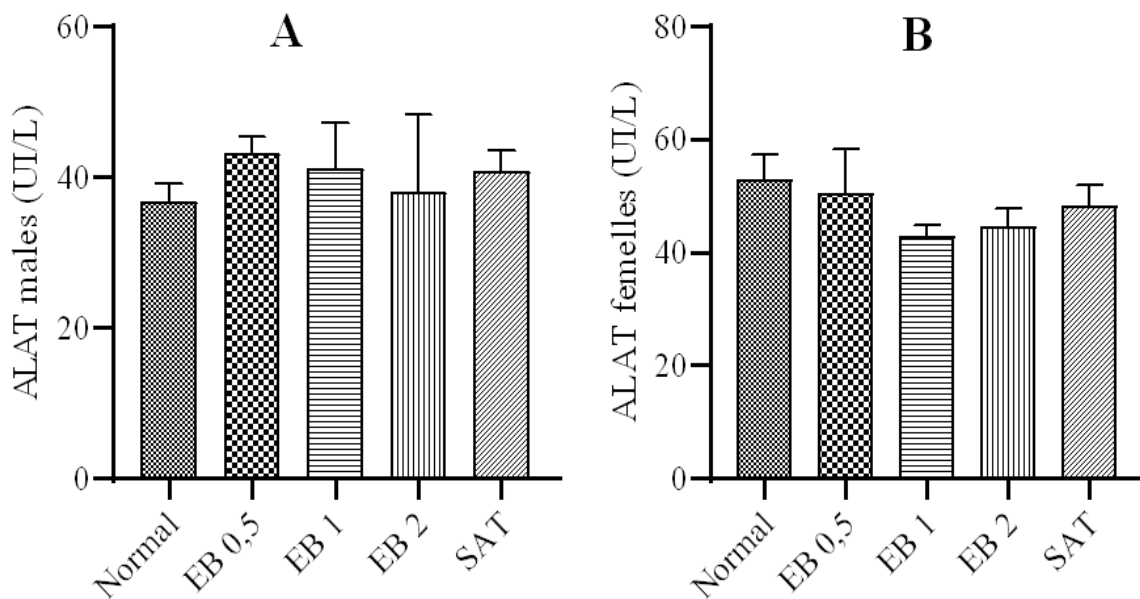
Légende : Chaque barre est représentée par la moyenne  $\pm$  Ecart Standard Moyen (ESM) ; n=4 correspondant au nombre de rats par sexe ; Normal : rats sains traités à l'eau distillée ; SAT : Lot satellite traité à 2 ml/ 100g d'eau bouillie aux coques puis observé 14 jours après la fin de l'expérimentation, EB 0,5, EB 1, EB 2 : lots de rats traités à l'eau bouillie aux coques de riz aux doses respectives de 0,5, 1, et 2 ml/100g de poids corporel.

### III.1.4.2.3. Evaluation des paramètres biochimiques, hématologique et histologique

#### III.1.4.2.3.1. Evaluation des paramètres biochimiques et hématologiques

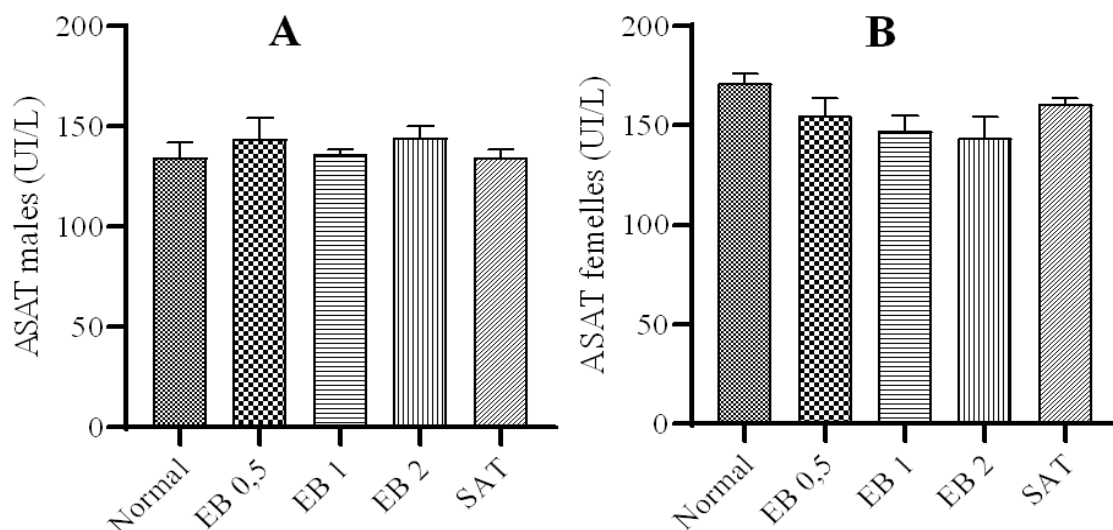
##### a) Effets de l'eau bouillie aux coques de riz sur l'activité des transaminases des animaux

Les transaminases, l'alanine aminotransférase (ALAT) et l'aspartate aminotransférase (ASAT) sont des indicateurs permettant d'évaluer la fonction hépatique. Les effets de l'eau bouillie aux coques de riz en toxicité subaiguë sur l'activité des transaminases chez les mâles et femelles sont illustrés par les Figures 31 et 32 ci-dessous. L'administration de l'eau bouillie aux coques de riz chez les rats aux doses respectives de 0,5, 1 et 2 ml / 100 g pc n'a entraîné aucune variation significative des activités de l'ALAT et de l'ASAT chez les rats mâles et femelles comparativement au témoin normal de même qu'au contrôle satellite.



**Figure 31 :** Effets de l'eau bouillie aux coques de riz sur l'activité de l'enzyme ALAT des rats mâles (A) et femelles (B).

Légende : Chaque barre est représentée par la moyenne  $\pm$  Ecart Standard Moyen (ESM) ; n=4 correspondant au nombre de rats par sexe ; Normal : rats sains traités à l'eau distillée ; SAT : Lot satellite traité à 2 ml/ 100g d'eau bouillie aux coques puis observé 14 jours après la fin de l'expérimentation, EB 0,5, EB 1, EB 2 : lots de rats traités à l'eau bouillie aux coques de riz aux doses respectives de 0,5, 1, et 2 ml/ 100g de poids corporel.



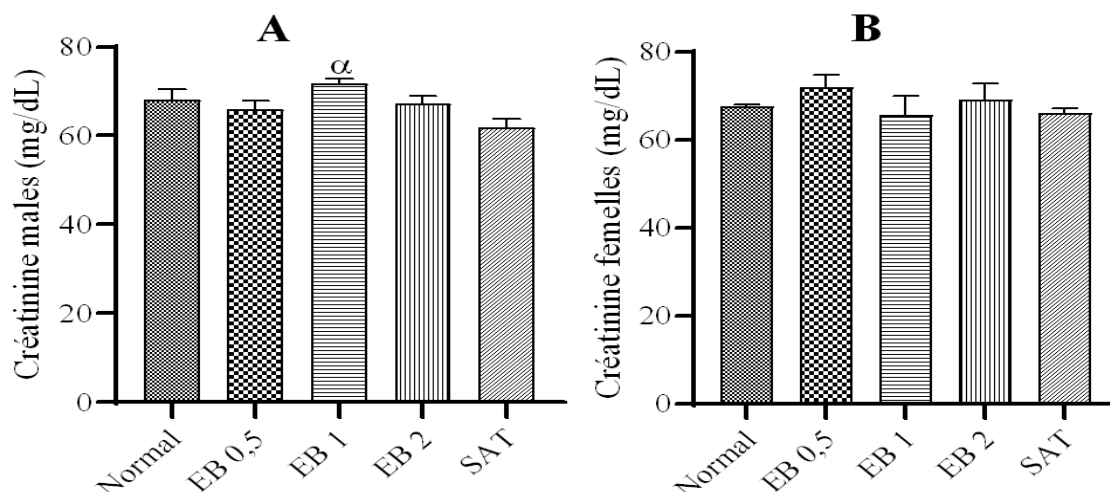
**Figure 32:** Effets de l'eau bouillie aux coques de riz sur l'activité de l'enzyme ASAT des rats mâles (A) et femelles (B).

Légende : Chaque barre est représentée par la moyenne  $\pm$  Ecart Standard Moyen (ESM) ; n=4 correspondant au nombre de rats par sexe ; Normal : rats sains traités à l'eau distillée ; SAT : Lot satellite traité à 2 ml/ 100g d'eau bouillie aux coques puis observé 14 jours après la fin de l'expérimentation, EB 0,5, EB 1, EB 2 : lots de rats traités à l'eau bouillie aux coques de riz aux doses respectives de 0,5, 1, et 2 ml/ 100g de poids corporel.

#### b) Effets de l'eau bouillie aux coques de riz sur le taux de Créatinine sérique et acide urique

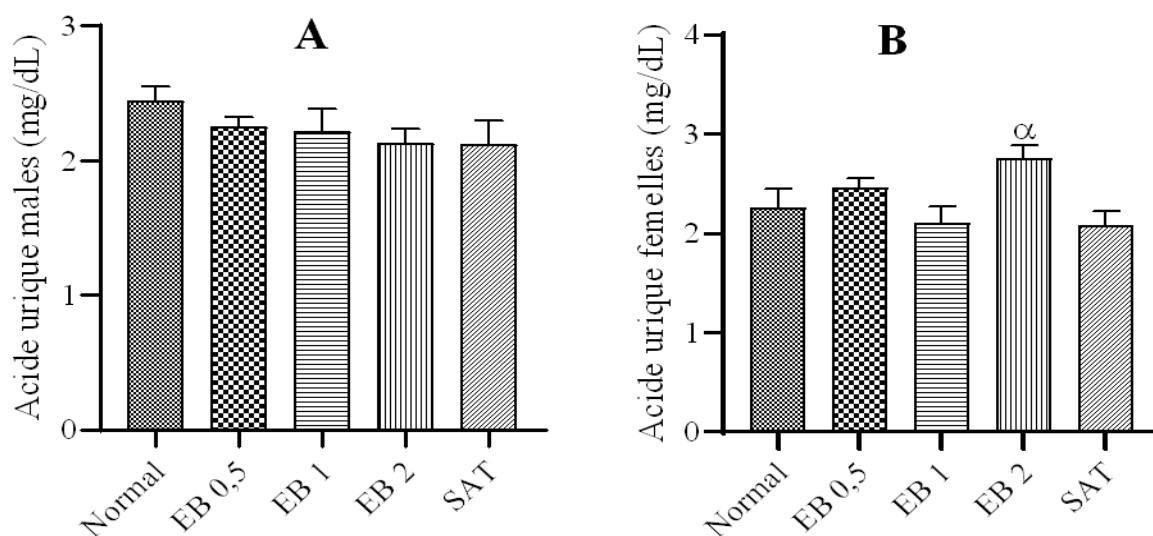
Le taux d'acide urique et de la créatinine sont les indicateurs de la fonction rénale. Les figures 33 et 34 rapportent les résultats des effets de l'eau bouillie aux coques de riz sur le taux sérique de créatinine et acide urique des rats mâles (A) et femelles (B). Pour ce qui est de la créatinine, il en ressort que les échantillons d'eau bouillie aux doses de 0,5, 1 et 2 ml/100 g de poids corporel n'ont entraîné aucune variation significative du taux de créatinine chez les mâles et les femelles en comparaison au témoin normal. Toutefois, l'observation des animaux 14 jours après l'arrêt de l'administration a révélé une augmentation significative ( $P < 0,05$ ) du taux de créatinine sérique chez les rats mâles traités à la dose de 1 ml/100g pc en comparaison aux témoins satellite. Cette augmentation était de 16,02 % en comparaison au témoin satellite.

Concernant le taux de l'acide urique, chez les rats femelles, une augmentation significative ( $P < 0,05$ ) a été observée du taux d'acide urique de 32,64 % chez les animaux traités à l'eau bouillie aux coques de riz à la dose de 2 ml/ 100g pc en comparaison aux rats du lot satellite. Par ailleurs, aucune différence significative chez les mâles et les femelles n'a été enregistrée chez les animaux traités à l'eau bouillie en comparaison à ceux traités à l'eau distillée (témoin normal).



**Figure 33:** Effets de l'eau bouillie aux coques de riz sur le taux sérique de créatinine des rats mâles (A) et femelles (B)

Légende : Chaque barre est représenté par la moyenne  $\pm$  Ecart Standard Moyen (ESM) ; n=4 correspondant au nombre de rats par sexe ; <sup>α</sup> p<0,05 : différence significative par rapport au témoin Satellite ; Normal : rats sains traités à l'eau distillée ; SAT : Lot de rat traités à 2 ml/100g d'eau bouillie aux coques puis observé 14 jours après la fin de l'expérimentation, EB 0,5, EB 1, EB 2 : lots de rats traités à l'eau bouillie aux coques de riz aux doses respectives de 0,5, 1, et 2 ml/100g de poids corporel.



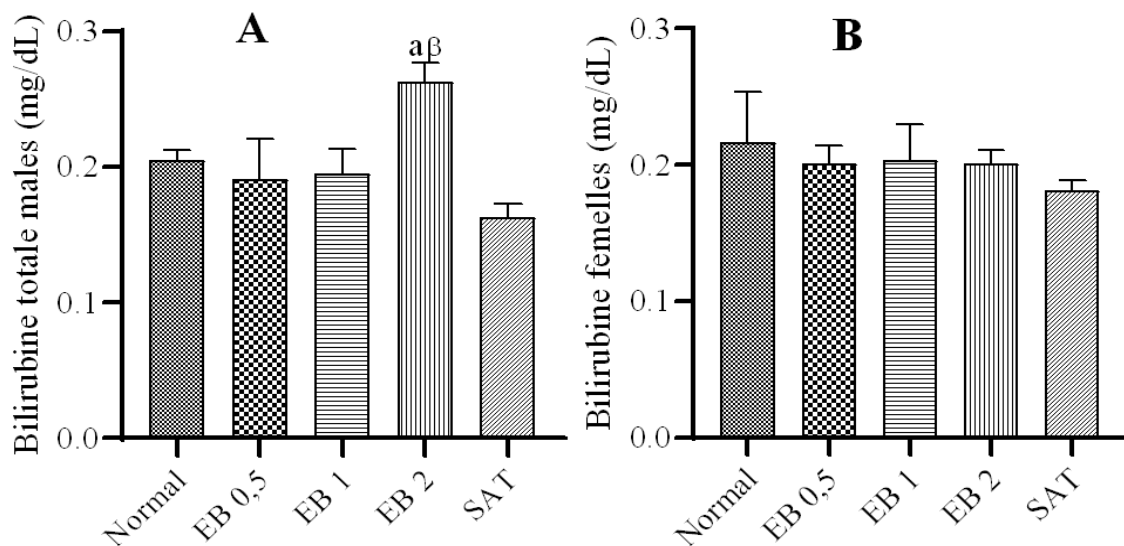
**Figure 34:** Effets de l'eau bouillie aux coques de riz sur l'acide urique des rats mâles (A) et femelles (B)

Légende : Chaque barre est représenté par la moyenne  $\pm$  Ecart Standard Moyen (ESM) ; n=4 correspondant au nombre de rats par sexe ; <sup>α</sup> p<0,05 : différence significative par rapport au témoin Satellite ; Normal : rats sains traités à l'eau distillée ; SAT : Lot de rat traités à 2 ml/100g d'eau bouillie aux coques puis observé 14 jours après la fin de l'expérimentation, EB 0,5, EB 1, EB 2 : lots de rats traités à l'eau bouillie aux coques de riz aux doses respectives de 0,5, 1, et 2 ml/100g de poids corporel.

**c) Effets de l'eau bouillie aux coques de riz sur le taux de bilirubine totale et protéine totale sériques des animaux**

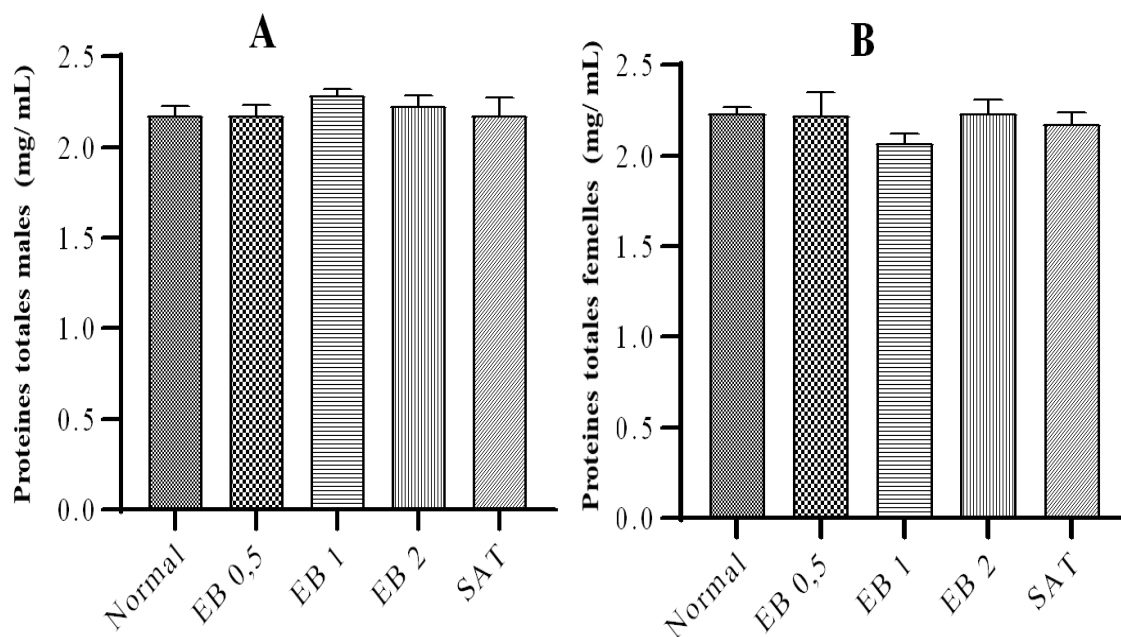
Les figures 35 et 36 présentent les effets de l'eau bouillie aux coques de riz sur le taux sérique de bilirubine et de protéine totales des rats mâles (A) et femelle (B) après 28 jours d'administration. Il ressort de la Figure 35 que l'administration de l'eau bouillie aux coques de riz à la dose de 2 ml/ 100g pc (EB 2) a entraîné une augmentation significative ( $p < 0,05$ ) du taux de bilirubine de 34,33 % chez les rats mâles en comparaison au contrôle normal. L'eau bouillie à la dose de 2 ml/ 100g pc a également entraîné une augmentation significative ( $p < 0,01$ ) du taux de bilirubine de 43,77% en comparaison au lot témoin satellite. Cependant chez les femelles, aucune différence significative sur ce paramètre entre les lots n'a été observée à la fin de l'étude.

Il ressort de la Figure 36 que le taux de protéine totale des animaux traités à l'eau bouillie aux coques de riz n'a présenté aucune différence significative chez les mâles et les femelles, indépendamment des doses, en comparaison aux animaux normaux de chaque sexe. De même, aucune différence significative n'a été observée entre les animaux des lots tests et le témoin satellite.



**Figure 35:** Effets de l'eau bouillie aux coques de riz sur le taux bilirubine sérique des rats mâles (A) et femelles (B) traités

Légende : Chaque barre est représenté par la moyenne  $\pm$  Ecart Standard Moyen (ESM) ;  $n=4$  correspondant au nombre de rats par sexe ; <sup>a</sup> $p < 0,05$  : différence significative par rapport au témoin Satellite ; Normal : rats sains traités à l'eau distillée ; SAT : Lot de rat traités à 2 ml/100g d'eau bouillie aux coques puis observé 14 jours après la fin de l'expérimentation, EB 0,5, EB 1, EB 2 : lots de rats traités à l'eau bouillie aux coques de riz aux doses respectives de 0,5, 1, et 2 ml/100g de poids corporel.



**Figure 36:** Effets de l'eau bouillie aux coques de riz sur le taux de protéines totales des rats mâles (A) et femelles (B) traités

Légende : Chaque barre est représentée par la moyenne  $\pm$  Ecart Standard Moyen (ESM) ; n=4 correspondant au nombre de rats par sexe ; Normal : rats sains traités à l'eau distillée ; SAT : Lot de rat traités à 2 ml/100g d'eau bouillie aux coques puis observé 14 jours après la fin de l'expérimentation, EB 0,5, EB 1, EB 2 : lots de rats traités à l'eau bouillie aux coques de riz aux doses respectives de 0,5, 1, et 2 ml/100g de poids corporel.

#### **d) Effets de l'eau bouillie aux coques de riz à différentes doses sur quelques paramètres hématologiques des animaux**

Le Tableau XXIV présente les variations de quelques paramètres hématologiques des animaux mâles et femelles après l'administration à différentes doses de l'eau bouillie aux coques de riz. Il en ressort que chez les mâles, l'administration des différentes doses d'eau bouillie n'a entraîné aucune variation significative de ces différents paramètres en comparaison au normal. Cependant, chez les femelles, il n'y avait pas de différence significative sur plusieurs paramètres tels que RBC, Hb, HCT, MCV, MCH, MCHC, WBC, LYM et PLT. Par contre, sur le MON ( $P < 0,001$ ), les analyses ont montré une augmentation significative à la dose de traitement de 2 ml / 100g pc. Le nombre de granulocytes a aussi augmenté significativement ( $p < 0,05$ ) à toutes les doses par rapport au contrôle.

**Tableau xxiv:** Variation de quelques paramètres hématologique des animaux mâles et femelles traités à différentes doses d'eau bouillie aux coques de riz

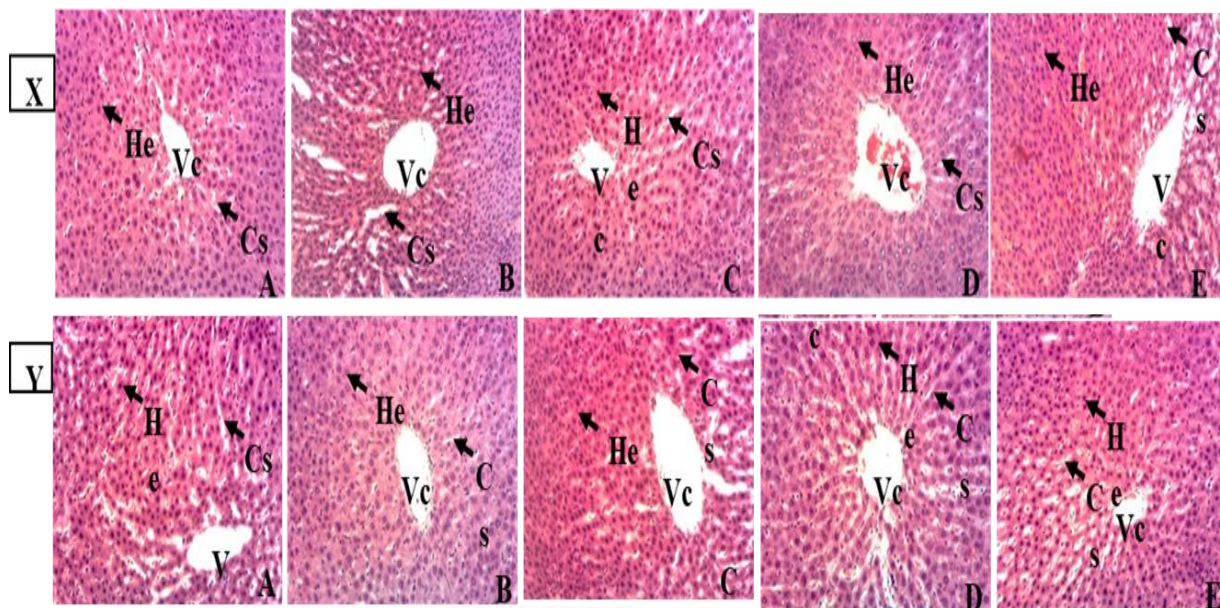
		Normal	EB 0,5	EB 1	EB 2	SAT
Mâles	GR	4,58±0,28	4,66±0,19	4,23±0,42	5,01±0,37	4,57±0,24
	HGB	15,50±0,34	15,53±0,48	15,77±0,34	13,70±0,82	14,67±0,54
	HCT	49,63±1,33	41,30±0,73	49,77±1,56	43,07±1,01	47,03±0,48
	VGM	88,33±0,68	86,67±0,68	88,33±0,26	85,33±2,46	86,00±1,55
	TGMH	31,10±1,70	34,83±0,79	32,13±1,01	27,30±1,22	32,17±0,92
	CCMH	31,87±0,16	33,93±0,61	33,70±1,28	32,70±0,95	32,90±0,99
	GB	7,97±0,14	7,93±0,25	8,30±0,35	8,83±0,96	7,93±0,29
	LYM	2,63±0,36	3,73±0,52	3,57±0,29	4,77±1,12	4,00±0,65
	MON	0,25±0,05	0,37±0,20	0,30±0,18	0,27±1,31	0,37±0,05
	GRA	3,20±0,08	5,47±0,21	4,37±0,72	4,23±0,36	3,30±0,97
	PLT	356,0±19,30	410,7±4,50	362,3±29,4	<b>446,3±3,20 *</b>	368,0±5,05
Femelles	GR	4,48±0,21	4,56±0,39	4,40±0,26	4,25±0,12	4,15±0,11
	HGB	14,80±0,12	15,10±0,28	13,67±0,39	14,17±0,54	12,57±0,38
	HCT	42,87±1,27	43,47±3,45	41,63±0,72	45,70±1,20	40,30±0,13
	VGM	86,00±0,89	86,00±1,18	87,00±1,34	88,00±2,37	87,67±0,68
	TGMH	30,07±0,52	31,33±0,52	33,03±3,07	32,00±1,72	29,90±0,45
	CCMH	31,83±0,68	32,40±1,95	32,23±1,19	31,10±0,85	31,90±0,18
	GB	7,80±0,20	7,77±0,23	7,63±0,09	8,33±0,35	7,95±0,31
	LYM	2,07±0,49	2,87±0,42	3,13±0,63	2,97±0,23	2,50±0,24
	MON	0,37±0,14	0,24±0,08	0,27±0,11	<b>0,49±0,31 *</b>	0,37±0,09
	GRA	1,80±0,29	<b>4,70±0,76 *</b>	<b>4,53±0,07 *</b>	<b>4,47±0,30 *</b>	1,93±0,11
	PLT	393,7±22,76	455,7±21,99	341,3±3,36	436,0±24,19	399,3±56,66

Légendes : Les résultats sont exprimés sous forme de moyenne ± Ecart Standard Moyen (ESM) ; n=4 correspondant au nombre de rats par sexe ; \* et \*\* significativement différents du groupe témoin (p <0,05 et p <0,001 respectivement). Normal : rats sains traités à l'eau distillée ; SAT : Lot de rat traités à 2 ml/100g d'eau bouillie aux coques puis observé 14 jours après la fin de l'expérimentation, EB 0,5, EB 1, EB 2 : lots de rats traités à l'eau bouillie aux coques de riz aux doses respectives de 0,5, 1, et 2 ml/100g de poids corporel. GR : globules rouge ou érythrocytes, HGB : hémoglobine, HCT : hématocrite, CCMH : concentration corpusculaire moyenne en hémoglobine, TGMH : taux globulaire moyen en hémoglobine, PLT : taux de plaquette sanguines ou thrombocytes, LYM : lymphocytes, GB : taux de leucocytes ou globules blanc, GRA : granulocytes, MON : monocytes, VGM : Volume globulaire moyen.

### III.1.4.2.3.2. Evaluation des paramètres histologiques

#### a) Effets sur l'histologie du foie des rats

La Figure 37 présente l'effet du traitement des animaux mâles et femelles à l'eau bouillie aux coques de riz pendant 28 jours sur l'histologie du foie en toxicité subaiguë. La Figure 37 A illustre les microphotographies d'une coupe de foie de rat sain traité à l'eau distillée (témoin normal). Cette coupe présente une veine Centrolobulaire (Vc) (grand espace arrondi qui se retrouve au centre de la microphotographie), un parenchyme hépatique normal dans lequel on distingue des hépatocytes (He) qui sont des petits noyaux violets foncés séparés par des capillaires sinusoides (Cs) (ouvertures blanchâtres qui se retrouvent entre les hépatocytes). L'histologie du foie des rats mâles et femelles traités par l'eau bouillie aux coques de riz à différentes doses de 0,5 (Figure 37 B), 1 (Figure 37 C) et 2 (Figure 37 D) ml/100g pc ainsi que celui du témoin satellite (Figure 37 E) présente un parenchyme hépatique bien organisé proche de celui du témoin normal.



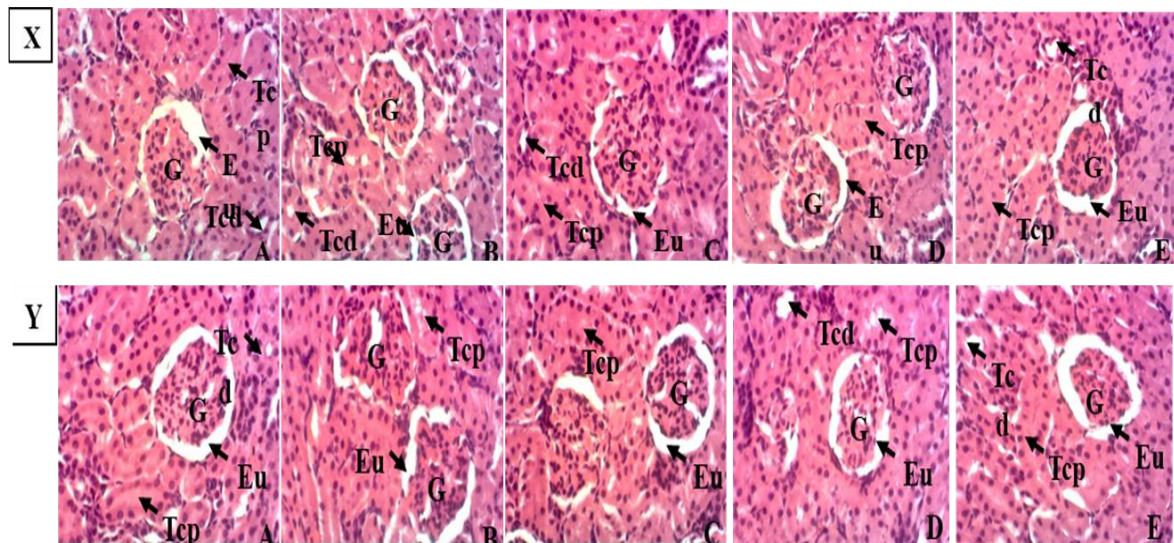
**Figure 37:** Microphotographies du foie des rats (Hématoxyline-éosine X 100). X : mâles et Y : femelles.

**Légende :** Chaque rectangle représente la microphotographie du foie d'un rat représentatif de A : rats sains traités à l'eau distillée ; E : Lot satellite traités à 2 ml/100g d'eau bouillie aux coques de riz puis observé 14 jours après la fin de l'expérimentation, B, C, D : lots de rats traités à l'eau bouillie aux coques de riz aux doses respectives de 0,5, 1, et 2 ml/100g de poids corporel. X : mâles et Y : femelles. Vc = Veine centrolobulaire ; He = Hépatocyte ; Cs = Capillaire sinusoides.



## b) Effets sur l'histologie du rein

La Figure 38 (X et Y) présente les effets de l'eau bouillie aux coques de riz sur l'histologie du rein des rats mâles et femelles respectivement. La coupe du rein d'une souris normale (Figure 38 A) présente un aspect normal du parenchyme rénal dans lequel on observe distinctement le glomérule (G) (gros structure circulaires et visibles), l'espace de Bowman ou espace Urinaire (Eu) (espace blanc qui borde les glomérules), les tubes contournés proximale (T<sub>cp</sub>) (espace diffus et rose situé dans le parenchyme et distal (T<sub>cd</sub>) (petits espaces blancs excentrés des glomérules) normaux et bien différenciés. L'histologie du rein des rats mâles et femelles traités à l'eau bouillie aux différentes doses de 0,5 (Figure 38 B), 1 (Figure 38 C), 2 (Figure 38 D) ml/100g pc montre également une architecture normale du parenchyme rénal. De même, aucun signe de toxicité n'a été observé au niveau tissulaire chez les deux sexes 14 jours après l'arrêt du traitement (Figure 38 E).

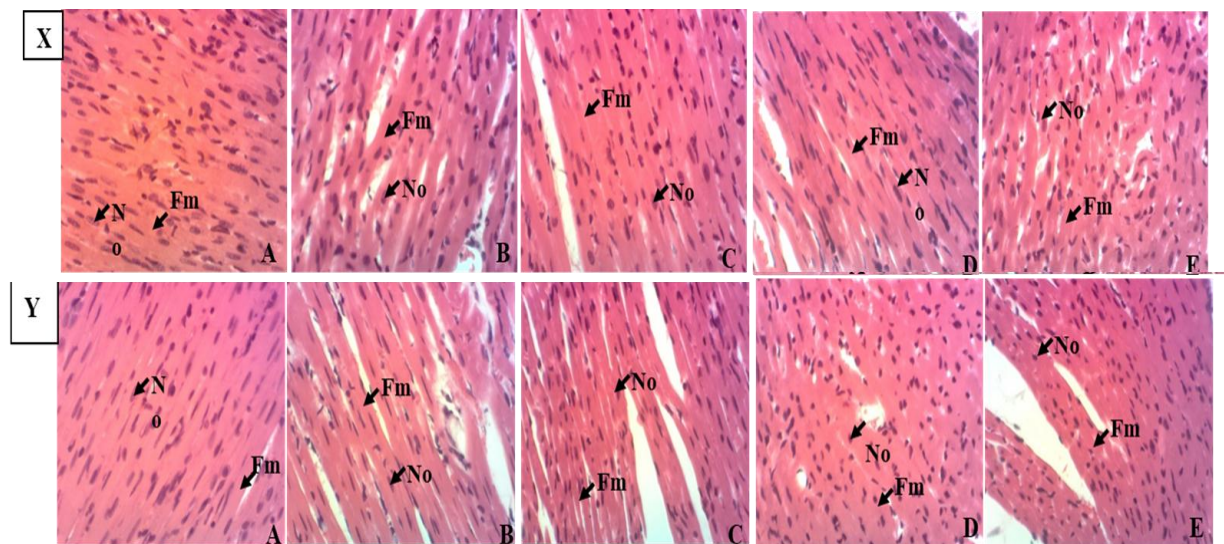


**Figure 38:** Microphotographies du rein des rats (Hématoxyline-éosine X 200). X : mâles et Y : femelles.

Légende : Chaque rectangle représente la microphotographie du rein d'un rat représentatif de A : rats sains traités à l'eau distillée ; E : Lot satellite traités à 2 ml/100g d'eau bouillie aux coques de riz puis observés 14 jours après la fin de l'expérimentation, B, C, D : lots de rats traités à l'eau bouillie aux coques de riz aux doses respectives de 0,5, 1, et 2 ml/100g de poids corporel. X : mâles et Y : femelles. **Vc** = Veine centrolobulaire ; **He** = Hépatocyte ; **Cs** = Capillaire sinusoiide. **G** = Glomérule ; **Eu** = Espace urinaire ; **Tcd** = Tubule contourné distal ; **Tcp** = Tubule contourné proximal.

### c) Effets sur l'histologie du cœur

La Figure 39 (X et Y) présente les microphotographies des coupes histologiques du cœur réalisé chez les animaux mâles et femelles après 28 jours d'administration de l'eau bouillie aux coques de riz à différentes doses. L'histologie du cœur du lot témoin normal (Figure 39 A) présente une architecture normale avec des fibres musculaires (Fm) (espaces légèrement blanchâtres allongés possédant plusieurs noyaux) bien resserrées et disposées en couches organisées avec le noyau des fibres cardiaques (No) alignés et bien visibles (structure en violet foncé). L'administration de l'eau bouillie aux coques de riz aux doses de 0,5 (Figure 39 B), 1 (Figure 39 C), et 2 ml/100g pc (Figure 39 D) n'a entraîné aucune atteinte pathologique au niveau du tissu cardiaque autant chez les mâles et les femelles. De même, 14 jours après l'arrêt du traitement, aucun signe de toxicité n'a été enregistré au niveau tissulaire chez le satellite (Figure 39 E).



**Figure 39:** Microphotographie du cœur des rats (Hématoxyline-éosine X 200). X : mâles et Y : femelles.

**Légende :** Chaque rectangle représente la microphotographie du cœur d'un rat représentatif de A : rats sains traités à l'eau distillée ; E : Lot satellite traité 2 ml/100g d'eau bouillie aux coques de riz puis observés 14 jours après la fin de l'expérience, B, C, D : lots de rats traités à l'eau bouillie aux coques de riz aux doses respectives de 0,5, 1, et 2 ml/100g de poids corporel. X : mâles et Y : femelles. **No** = Noyau des fibres musculaires cardiaques ; **Fm** = Fibre musculaire cardiaque.

## III.2. DISCUSSION

De nos jours, l'augmentation de l'effet de serre et l'épuisement des ressources minières constituent une préoccupation pour la plupart de nos dirigeants. Ce qui amène ainsi un grand nombre de pays à se tourner vers des sources d'énergies alternatives, les énergies renouvelables, pour un développement durable. Ainsi, la biomasse se trouve sans doute être l'une des sources d'énergies renouvelables les plus prometteuses, du fait de son faible coût, mais aussi de par son potentiel énergétique non négligeable. C'est le cas des sous-produits de la transformation du riz (*Oryza spp.*) qui est une source importante de calories en Afrique subsaharienne et dont la production devrait augmenter pour satisfaire la demande de plus en plus croissante. En moyenne, le paddy comprend 72% de riz, 5 à 8% de son et 20 à 22% de coques (Prasad *et al.*, 2001). Bien que le son de riz soit hautement nutritif (Saunders et Betschart, 1979 ; Amissah *et al.*, 2003), ce sous-produit est principalement utilisé en Afrique subsaharienne comme ingrédient dans la production d'aliments pour le bétail. Cependant, lorsque le son est mélangé à la coque, comme c'est le cas lorsque le riz est décortiqué dans des machines de type Engelberg, l'utilisation de ce produit comme aliment du bétail n'est pas appropriée en raison de la forte teneur en silice dans la coque (So *et al.*, 2008). De plus, La forte volatilité et la faible densité de la balle de riz (120 kg / m<sup>3</sup>) entraînent une valeur calorifique inférieure par unité de masse de biomasse par rapport aux combustibles fossiles, et peuvent poser des problèmes de manutention et de transport.

En ce qui concerne la production et la caractérisation des briquettes à base de coques de riz, la première étape a été de concevoir et de construire une briqueteuse. Cette briqueteuse était à presse hydraulique multi-pistons à neuf cylindres. Elle nous permettait d'obtenir environ 150 briquettes / h. La fabrication de briquettes conventionnelle nécessite environ 0,25 KWh / kg de briquettes pour générer de la chaleur pendant le processus de fabrication de briquettes (Toan *et al.*, 2000). Dans la presse à briqueter à vis chauffée (Ahiduzzaman et Islam, 2013), 77 kg / h ont été utilisés pour obtenir une production brute de 88 kg / h ; résultant en une production nette de 11 kg / h. Cependant, il s'agissait d'un apport important de briquettes pour la production nette. La briqueteuse à plusieurs pistons décrite dans ce document est entièrement manuelle et une seule personne a produit au moins 12 kg de briquettes / h. La technologie de densification pour la fabrication de briquettes a augmenté la densité de la balle de riz de 120 kg / m<sup>3</sup> à 600 kg / m<sup>3</sup> lorsque le temps de séjour était de 30 secondes. Chin et Siddiqui (2000) ont démontré que lorsque le temps de séjour du mélange de biomasse dans la

machine était dans la plage de 20 à 40 secondes, on produisait des briquettes les plus stable possible dans le temps. La densité des briquettes se situait dans la plage optimale des produits de la biomasse après densification (600–800 kg / m<sup>3</sup>) (**Lim et al., 2012a**) car elle est directement liée au rapport énergie-volume (**Maiti et al., 2006**). Les briquettes produites étaient de forme cylindrique avec un trou central. **Stanley (2003)** a déclaré que le trou central dans la briquette augmente l'efficacité de combustion de la briquette. Le trou central crée un courant d'air qui indique clairement le passage de l'air.

L'optimisation des paramètres nous a permis d'évaluer l'effet d'un ou des interactions de la taille des particules, du ratio coque – son de riz, de la méthode de séchage et de la température de l'eau sur la dureté des briquettes. Les briquettes produites à l'aide de fines particules (TP < 0,3 mm) étaient plus dures que celles de particules de taille moyenne. La taille des particules est un facteur important affectant la durabilité des briquettes. En règle générale, plus la taille des particules est fine, plus la durabilité est grande. Les particules fines absorbent généralement plus d'humidité et sont donc conditionnées plus fortement (**Kaliyan et Morey, 2009**). Ces résultats sont en accord avec les travaux antérieurs sur le miscanthus et les combustibles dérivés des déchets, pour lesquels **Ryu et al. (2006)** ont montré que la taille des particules influençait la densité des briquettes puisque des particules plus petites entraînaient un compactage plus dense à pression constante. Le son de riz a été utilisé comme liant pour la fabrication de briquettes (**Chuo et al., 2009**). Plus la proportion de liant est élevée, plus les briquettes sont dures. Dans cette étude, les briquettes fabriquées à partir de son de riz seulement (0 : 1) étaient les plus dures, tandis que celles fabriquées avec la coque seulement sans liant (1 : 0) étaient les plus fragiles. L'utilisation de grandes quantités de son de riz pur comme liant dans la production de combustible peut ne pas être recommandée car ce produit est un aliment de qualité pour les animaux. **Singh et Singh (1982)** ont étudié l'effet de certains liants sur la durabilité des briquettes. L'étude a révélé que l'ajout de 10% à 25% (en poids) de mélasse ou de silicate de sodium, ou d'un mélange de mélasses à 50% et de silicate de sodium à 50% avec de la paille de riz produisait des briquettes d'une durabilité de 40% à 80% avec une taille de particule de 0,5 mm et formant une pression de 29,4 MPa. L'étude a permis de conclure que plus la quantité de liant était élevée, plus élevée était la durabilité des briquettes. En plus, **Onuegbu et al. (2012)** ont signalé une durabilité de 90,54% de la briquette de plantain à une pression de 5 MPa avec 25% de liant d'amidon. Dans cette étude, les briquettes séchées dans des conditions ambiantes sous le soleil (pendant 21 jours) étaient plus dures que celles séchées à 70 ° C seulement (four). La vitesse d'élimination d'eau était

plus importante pour les échantillons séchés au four (l'humidité était de 20% après 2 jours de séchage) que pour ceux séchés dans des conditions ambiantes (l'humidité était de 20% après 7 jours de séchage). Ces résultats suggèrent qu'un taux de perte d'humidité plus rapide pourrait réduire la capacité des particules à se lier efficacement pendant le séchage (**Kaliyan et Morey, 2009**). Les briquettes étaient produites à la fois avec de l'eau bouillie et froide, et celles fabriquées avec de l'eau bouillie étaient plus dures que celles avec de l'eau froide ( $P < 0,01$ ). Néanmoins, les briquettes produites avec de l'eau à température ambiante et des mélanges coque-son, de particules fines et moyennes provenant d'usines d'Engelberg étaient suffisamment durs (101 N). Cela suggérait qu'il n'était pas nécessaire de chauffer de l'eau pour la production de briquettes à partir de mélanges de coques et de sons provenant de décortiqueuse de type Engelberg. L'eau chaude donnait des briquettes beaucoup plus dures, probablement à cause de la gélatinisation de l'amidon dans le son (20%) (**Saunders et Betschart, 1979**). Au terme de cette optimisation, les paramètres retenus qui permettaient d'avoir les briquettes avec une bonne résistance à la manutention et le transport sont les particules fines, l'eau à température ambiante (27° C) et le séchage au soleil. Ces paramètres ont été appliqués dans la fabrication des briquettes composées du mélange CS provenant de décortiqueuse de type Engelberg et des différents liants (fibres et boues issues de l'extraction de l'huile de palme et de l'argile).

Quatre types de briquettes CSF (Coque–Son de riz et Fibre de noix palme), CSB (Coque–Son de riz et Boue de noix palme), CS (Coque–Son de riz), CCA (Charbon de Coque de riz issu de la gazéification et Argile) ont été produites dans cette étude. Les briquettes CSF étaient les plus dures (170 N), suivies de CS (101 N), tandis que les CSB et les CCA étaient les plus fragiles (20 et 21 N, respectivement). Ceci pourrait s'expliquer par le fait que la fibre a contribué à la dureté du CSF en augmentant l'emboîtement mécanique. La teneur élevée en lipides enregistrée dans les briquettes CSB peut avoir joué un rôle dans la réduction des forces d'attractivité, de cohésion et d'adhésivité (**Manickam et al., 2006**) de ces briquettes et a donc réduit leur dureté. Un test de combustion a été mené sur différents échantillons de briquettes afin d'évaluer leur performance en utilisant le charbon comme échantillon de contrôle. Le réchaud utilisé est un réchaud à briquettes et à charbon SALMAR. Il s'agissait notamment des temps de démarrage, la vitesse de combustion, la consommation spécifique de combustible et la température des flammes. Les résultats obtenus ont montré que CSF, CSB, CS et CCA avaient des temps de démarrage plus courts ( $T < 5$  min) que celui du charbon de bois (10 min). Un matériau combustible devrait être facilement inflammable, en particulier à des fins

domestiques. Les briquettes produites en Afrique subsaharienne ont été jugées difficiles à allumer par rapport au charbon de bois (**Mwampamba et al., 2013**). Par conséquent, la technologie de briquetage décrite dans le présent document offre une opportunité pour la production de briquettes faciles à allumer. Les briquettes CS avaient la vitesse de combustion la plus élevée (145 g / min), tandis que les briquettes CCA présentaient la vitesse de combustion la plus faible (67 g / min). Le charbon de bois, les briquettes de CSB et de CSF avaient des vitesses de combustion similaires - 120, 109 et 126 g / min, respectivement. La variation des valeurs de vitesse de combustion des échantillons pourrait être attribuée à la porosité présentée entre les inter et intra - particules qui permet une infiltration facile de l'oxygène des briquettes (**Achebe et al., 2018**). Normalement, plus la vitesse de combustion est basse, meilleure est la briquette car il faudra toujours moins de briquettes pour allumer et entretenir le feu à usage domestique. Mais dans ce cas, les briquettes CCA présentaient une vitesse de combustion la plus faible et la consommation spécifique de combustible la plus élevée dû la présence de matières incombustibles qui a tendance à inhiber la propagation de la flamme car elle ralentit la diffusion de l'oxygène et des produits de combustion à l'intérieur et à l'extérieur des briquettes. De même, les briquettes à faible teneur en matières volatiles sont difficilement inflammables et brûlent lentement (**Sotannde et al., 2010**). Les briquettes CSF, CSB, CS et CCA avaient des températures de flamme supérieures à 800 °C après environ 4-5 min de combustion dans le foyer à briquettes Salmar. Cette température est restée supérieure à 700 °C entre 18 et 48 min de combustion et a ensuite commencé à baisser. Cette baisse de la température de la flamme a coïncidé avec l'épuisement de la biomasse de combustible et l'augmentation de la quantité de cendre produite. Pour les briquettes de CCA, la température de flamme maximale (650 ° C) a été enregistrée après 20 min de combustion, mais elle s'est stabilisée et est restée au-dessus de 490 ° C jusqu'au bout de 55 min. La température de la flamme pour le charbon de bois a commencé très basse, mais a atteint un pic à 930 ° C après 30 minutes, restant supérieure à 800 ° C même après 55 minutes. La température moyenne de la flamme sur la durée de combustion de 55 minutes ne différait pas significativement entre les différents types de combustible testés ( $P > 0,05$  ; Tableau XVII). Après avoir chargé 4 kg de combustible dans le réchaud, il a fallu 9 minutes pour que les briquettes à base de mélanges coque-son fassent bouillir 10 L d'eau, tandis que le charbon de bois prenait 14,2 minutes. Des briquettes CCA ont bouilli 5 L d'eau, mais n'ont pas réussi à faire bouillir 10 L d'eau même après 1 heure. Ces résultats indiquent que CSF, CSB, et CS conviennent aux opérations de cuisson nécessitant une intensité de chaleur élevée dès le début de la cuisson,

par exemple pour faire bouillir de l'eau pendant le trempage du paddy et la cuisson à la vapeur dans l'industrie de l'étuvage du riz.

La comparaison entre des propriétés de combustion des briquettes à base de coque de riz, les gazéificateurs à coque de riz pure et les combustibles traditionnels a été faite. Les gazéificateurs PO ont mis le plus court temps à faire bouillir 5 litres d'eau (6,5 à 10,8 min), R et V ont pris 15 à 18 min, tandis que le foyer Mayon a pris le plus long temps (23,8 à 31,6 min). Le résultat indique que PO cuit plus vite alors que M cuit lentement. Le foyer R avait la vitesse de combustion la plus basse (25,36 g / min) et le PO250, la vitesse de combustion la plus élevée (72,05 g / min). Le résultat indique que R consomme lentement du combustible tandis que le PO250 en consomme rapidement. Le foyer Mayon avait la consommation spécifique de combustible la plus élevée (414 g / l), tandis que le PO150 affichait la plus faible (100 g / l). La puissance de feu était maximale pour PO250 (17755 watts) suivi de M (12979 watts) et le minimum pour R (6248 watts). Le gazéificateur PO a une puissance de feu supérieure à celle des gazéificateurs R et V de la même taille. Même si le gazéificateur M brûlait rapidement, l'efficacité thermique était le plus faible (10%), alors que le PO150 affichait l'efficacité thermique le plus élevé (28%). Les taux d'abattement de tous les gazéificateurs étaient bas (1–1,37), la valeur la plus basse étant enregistrée pour M. Les valeurs inférieures indiquées signalent une plage de contrôle de puissance inférieure dans le gazéificateur. Pris ensemble, les résultats ci-dessus indiquent que les nouveaux gazéificateurs (PO, R et V) ont de meilleurs indices thermiques que ceux précédemment introduits dans la région (M). De la comparaison entre les briquettes de type CS et les gazéificateurs R, V, PO150, PO250, M, les résultats ont montré que la température de la flamme des briquettes de type CS était la plus élevée, comparée à celle des balles de riz utilisées dans les gazéificateurs R, V, PO150, PO250, M. Cependant, les gazéificateurs de type PO ont produit un mélange de flammes jaune clair et bleuâtre pendant toute la durée de combustion. Les foyers R et V ont produit une flamme jaune qui a provoqué le noircissement de la marmite au cours des cinq (5) premières minutes de démarrage du feu, puis la flamme a viré au bleu pendant le reste de la durée de combustion. La température de flamme élevée du PO ouvre la possibilité d'utiliser ce gazéificateur pour l'étuvage du riz car cette activité nécessite des foyers à haute production d'énergie (Ndindeng *et al.*, 2015a). L'évaluation de l'utilisateur final et le retour d'information sur les 9 foyers testés ont mis en évidence une variation ( $p < 0,05$ ) entre les foyers pour les attributs suivants : fonctionnement, vitesse de cuisson, émission de fumée, qualité du matériau du foyer, odeur de fumée, remplissage du combustible et acceptabilité du foyer. Les gazéificateurs à coque de riz testés ont été plus appréciés par les femmes en

comparaison aux foyers a combustibles traditionnels, à l'exception de M qui les ont détestés. L'acceptabilité du foyer PO150 était comparable à celui du foyer NAC utilisant le charbon. Ces résultats sont contraires à ceux de **Bello et al. (2010)** où le charbon était plus apprécié par les femmes comparativement aux coques de riz. Cette différence serait due au fait que le foyer coques de riz utilisé dans leur étude n'était pas ventilé.

Une analyse du cycle de vie (ACV) des cinq (5) gazéificateurs a ensuite été menée afin de démontrer lequel des foyers de cuisson à gazéification utilisant les coques de riz pures sont écologiquement durables en termes de demande d'énergie cumulée et d'impact sur la santé humaine et l'environnement par modélisation avec le logiciel SimaPro 8. Selon les résultats de l'analyse des inventaires, la demande de ressources pour la fabrication de PO150 était moindre que pour les autres foyers. Il nécessitait moins de travail manuel et de matériaux pour sa construction. Cela est dû au fait que le PO150 était le plus petit et utilisait donc moins de ressources. Le monoxyde de carbone et les matières particulaires étaient les plus produits lors de la cuisson en raison de la combustion incomplète (**Prockop et al., 2007**) de coque de riz. PO250 est le plus gros contributeur de CO uniquement du point de vue des données de l'inventaire. Ces résultats sont cohérents avec les observations de **Zhang et al., (2000)** qui ont montré qu'augmenter l'efficacité globale du foyer tendait à augmenter les produits d'émission due à la combustion incomplète. **Patra et al., (2015)** ont signalé des émissions plus élevées (CO et PM<sub>2,5</sub>) pour un foyer de gazéification à contre-courant et à ventilation forcée. D'après les résultats de la Figure 18, le foyer M, à ventilation naturelle, a enregistré la DEC la plus élevée, comparé aux autres foyers de cuisson à gazéification (PO250, PO150, R et V). Cette différence de DEC pourrait être due au fait que les foyers à ventilation assistée avaient une efficacité thermique supérieure à celle du foyer naturel basé sur la technologie TEE (**Ndindeng et al., 2019**). Ces résultats sont similaires à ceux de **Sarah et al.** en 2016 qui ont démontré que les foyers améliorés ont généralement une DEC plus faible, car une plus grande valeur calorifique du combustible est convertie en énergie de cuisson utile. Par conséquent, moins de combustible doit être produit, transporté et brûlé pour fournir la même quantité d'énergie de cuisson. Sur le plan de la caractérisation de l'impact, M était le foyer à gazéification qui contribue aux principaux impacts négatifs sur l'environnement tandis que PO150 fournissait les meilleurs indices. Le risque associé à la santé humaine et au réchauffement de la planète résultant de l'exposition aux émissions de M est disproportionnellement plus élevé que le risque de PO150. Ce résultat est un point de tension essentiel pour les décideurs - un choix crucial entre s'attaquer à un problème de santé publique



imminent ou à un problème environnemental à court terme. Cette politique a été inspirée par de récentes évaluations de la charge de morbidité mettant en évidence l'ampleur des impacts sur la santé liée à la pollution atmosphérique (**Lim et al., 2012 ; Forouzanfar et al., 2015**) et la nécessité de s'attaquer au double fardeau imputable aux facteurs de pollution ambiant et domestique (**Balakrishnan et al., 2014**). La mise à jour globale des recommandations pour la qualité de l'air par l'OMS en 2005 a attiré l'attention sur l'importante incidence de la pollution de l'air intérieur sur la santé de l'homme. Les concentrations élevées de particules et de gaz trouvés à l'intérieur des habitations utilisant des combustibles solides, notamment de la biomasse, ont été notées et il a été estimé que l'exposition pourrait être responsable de près de 1,6 million de décès supplémentaires par an et environ 3% de la charge de morbidité mondiale. C'est un impact énorme sur la santé. En effet, il est bien supérieur à celui imposé par l'exposition aux polluants de l'air extérieur (**OMS, 2005**).

L'étude de toxicité aiguë par voie orale chez les rats femelles n'a entraîné aucun décès tout au long de l'étude : l'échantillon d'eau a un indice de toxicité équivalent à 5, selon l'échelle de toxicité d'une substance chimique en fonction de la DL50 et de la voie d'administration (**Charles et al., 2016**). Toutefois, aucun signe de toxicité n'a été observé pendant les 4 h qui ont suivi l'administration de l'extrait, ni même tout au long de l'étude notamment la baisse de la sensibilité au stimulus (douleur et bruit), la diminution de la mobilité ou le ramollissement des fèces. Cependant, la toxicité et les effets *in vivo* liée à l'utilisation des coques de riz n'ont pas été documentés précédemment. La croissance homogène du poids observée dans tous les groupes des rats peut être prise comme un indicateur d'absence d'impact de différents traitements sur l'alimentation et la santé de l'animal. Aucune différence significative dans le gain de poids corporel des rats mâles et femelles par rapport au contrôle n'a été enregistrée. Dans les études de toxicité, les variations du poids des organes sont des indicateurs sensibles de la toxicité, des effets sur les enzymes, des perturbations physiologiques et des lésions des organes cibles (**Michael et al., 2007**). Une augmentation du poids de l'organe suggère la survenue d'une hypertrophie, tandis qu'une diminution suggère une nécrose de l'organe cible (**Teo et al., 2002**). Dans cette étude, le poids relatif des organes du foie et des reins, du cœur, des poumons et de la rate évalués dans les groupes de traitement ne montrait pas de différence significative chez les deux sexes à toutes les doses par rapport au groupe témoin.

L'étude des paramètres biochimiques sont des indicateurs de toxicité, augmentant l'efficacité ou la mise en place d'une toxicité sur les organes vitaux. La toxicité hépatorenale a été étudiée

par le dosage de quelques paramètres biochimiques et par l'analyse histopathologique du rein, du cœur et du foie. L'ALAT est une enzyme cytosolique sécrétée dans les cellules hépatiques d'où elle est libérée dans le sang en cas de nécrose cellulaire hépatique (**Kaneko et al., 1997 ; Dufour et al., 2000**). C'est une enzyme spécifique au foie, ce qui en fait un important indicateur très sensible de l'hépatotoxicité (**Pratt et Kaplan, 2000**). L'ASAT est également un indicateur de la destruction des hépatocytes même si en plus du foie on la retrouve dans le cœur, les muscles squelettiques, les poumons et les reins (**Dufour et al., 2000**). Les taux d'ALAT et d'ASAT s'élèvent rapidement lorsque le foie est endommagé pour diverses raisons incluant les nécroses cellulaires hépatiques, l'hépatite, les cirrhoses ainsi que l'hépatotoxicité de certaines drogues (**Dufour et al., 2000 ; Pratt et Kaplan, 2000**). Dans notre étude, la concentration de ces deux enzymes (ALAT et ASAT) n'ont subi aucune variation significative autant chez les rats mâles que chez les femelles comparativement au témoin normal de même qu'au contrôle satellite. L'acide urique et la créatinine sérique sont considérés comme les principaux marqueurs de la néphrotoxicité (**Palani et al., 2009**). La créatinine est un produit d'excrétion de l'activité musculaire, qui circule dans le sang. Son élimination est exclusivement rénale, il existe donc une corrélation entre les taux de créatinine et la fonction rénale. La majeure partie de la créatinine éliminée par les reins est filtrée librement dans les glomérules rénaux et une petite fraction est filtrée par le composant tubulaire, ce qui est un bon indicateur de la fonction réno-glomérulaire (**Bohinski, 1991 ; Raju et al., 2016 ; Ghorbel et al., 2016 ; Belhadj et al., 2018**). La diminution de ces paramètres montrerait l'action hépatoprotectrice de l'échantillon d'eau bouillie à cette dose. L'acide urique est issu de la dégradation dans l'organisme des acides nucléiques (purines) (propres à l'organisme) ou provenant de l'alimentation (**Bohinski, 1991 ; Gonzales et al., 1994 ; Gonzales et al., 1998**). Une fois dans le sang, l'acide urique est principalement excrété par les reins. Après cette filtration glomérulaire, entre 40 et 60% sont réabsorbés au niveau tubulaire, constituant un marqueur de la fonction rénale (**Bohinski, 1991 ; Gonzales et al., 1994 ; Gonzales et al., 1998**). Dans la présente étude l'acide urique était élevé chez les rats traités (2 ml / 100g pc). Les paramètres de la créatinine chez les mâles et de l'acide urique chez les femelles ont montré des différences entre les groupes traités et les groupes de contrôle. Une dose de 1 ml / 100g pc chez les mâles a significativement réduit la créatinine alors qu'à la dose de 2 ml / 100g pc administrée aux femelles, l'acide urique a augmenté de manière significative ( $P < 0,05$ ) suggérant des lésions rénales (**Raju et al., 2015 ; Raju et al., 2016 ; Belhadj et al., 2018**). La fonctionnalité du foie a été évaluée par les protéines sériques et la bilirubine totales. Une réduction des taux sériques de protéines et de la bilirubine totales

réduit la fonction synthétique, ce qui est évident dans les lésions du foie ou les maladies. Une augmentation de ces paramètres est généralement observée dans les affections cancéreuses ou après un régime riche en protéines (**Tietz et al., 1994**). Notre étude a montré une diminution significative de la bilirubine totale chez les rats femelles suggérant l'effet toxique de l'eau bouillie sur le foie des animaux. Le taux sérique total de protéines ne différait pas significativement du groupe témoin. Cela montre que l'effet de l'eau bouillie sur le foie pourrait être un léger effet toxique n'affectant que les rats femelles. De manière générale, il est apparu que l'eau bouillie affectait les femelles à une dose plus faible que les mâles.

L'hématopoïèse est le processus de formation des cellules sanguines. L'analyse des paramètres hématologiques est importante pour évaluer les effets toxiques des substances à tester, ainsi que pour déterminer l'état physiologique et pathologique du corps, car des variations de ces paramètres peuvent indiquer une toxicité associée aux substances à l'essai et diverses maladies et affections, notamment : anémie, leucémie, réactions à l'inflammation et infections (**Olson et al., 2000 ; Martini et al., 2012**). Il n'y avait pas de différence significative dans plusieurs paramètres tels que RBC, Hb, HCT, MCV, MCH, MCHC, WBC, LYM et PLT entre les groupes traités et le groupe témoin, indiquant que l'eau bouillie aux coques de riz n'avait aucun effet sur les globules sanguins en circulation des animaux testés. Sur le paramètre MON, les analyses ont montré une augmentation significative à la dose de traitement de 2 ml / 100g pc, le nombre de granulocytes a augmenté de manière significative ( $p < 0,05$ ) à toutes les doses par rapport au contrôle chez les femelles. Cependant, les différences obtenues dans cette étude ne montrent pas de changement hématologique, car elles se situent dans la plage de santé normale de cette espèce animale (**Giknis et Clifford, 2008**).

Ces différences obtenues entre les animaux testés et le témoin pourraient être expliquées par la présence dans cette eau bouillie de matières en suspension qui pourraient être de la cendre de coque de riz. Selon **Xu (2012)**, les cendres de coques de riz ont la plus forte proportion de silice parmi tous les résidus végétaux. La composition moyenne de cette cendre bien brûlée est de 90% de silice amorphe. Nos résultats sont conformes à ceux de **Wai et al. (2017)** qui ont étudié la toxicité *in vivo* des nanoparticules de silice (NPsSi) à 150 nm à diverses doses via une administration intraveineuse chez la souris. Leurs résultats ont montré que les SiNPs étaient biocompatibles et sans danger pour une utilisation *in vivo* chez la souris.

L'histologie des reins, du foie et du cœur chez les rats mâles et femelles n'a produit aucun changement toxique confirmant la sécurité de l'eau bouillie aux coques de riz dans ces

organes. Sur la base des résultats de notre étude, nous avons conclu que la coque de riz utilisée comme combustible dans le gazéificateur de type PO150 permet de cuire un aliment plus sûr et non toxique.

## CONCLUSION

Parvenu au terme de ce travail dont l'objectif général était d'évaluer l'efficacité et l'acceptabilité des gazéificateurs et coque de riz utilisés comme combustibles afin d'accroître la productivité de la chaîne de valeur du riz, il en ressort donc que :

- La taille des particules, le ratio coque / son, la méthode de séchage et la température de l'eau pour la fabrication des briquettes sont les principaux facteurs qui influent sur la dureté des briquettes à pression constante. L'utilisation de son ou d'autres formes de liants est nécessaire pour produire des briquettes de balle de riz d'une dureté suffisante. Les briquettes Coque- Son -Fibre de noix de palme (CSF) et Coque- Son (CS) produites avec des mélanges de coque et de son provenant de décortiqueuse du type Engelberg ont présenté la meilleure qualité de combustible en termes de dureté, facilité d'allumage, valeur calorifique, teneur en cendres, vitesse de combustion, consommation spécifique de combustible et température de flamme. Ces briquettes devraient être adaptés aux opérations de cuisson nécessitant une intensité de chaleur élevée dès le début de la cuisson, par exemple pour faire bouillir de l'eau pendant le trempage du paddy et la cuisson à la vapeur dans l'industrie de l'étuvage du riz.
- Les nouveaux gazéificateurs assistés par ventilateur (Rua, Viet et Paul Olivier) ont de meilleurs indices thermiques que celui à ventilation naturelle (M). Les foyers ventilés étaient plus appréciés que les foyers à combustibles traditionnels car rapide à la cuisson et produisant très peu de fumée. Il est préférable de les utiliser dans espaces ouverts où il y a une bonne circulation d'air.
- L'ACV a permis une évaluation des impacts du cycle de vie des foyers associés à leur utilisation. Le gazéificateur PO150 a fourni les meilleurs indices en termes de ressources, d'impacts humain et environnemental. Ces résultats pourraient aider les décideurs à diffuser le foyer de cuisson PO150 et contribuer ainsi à réduire la prévalence des maladies respiratoires, cardiovasculaires, de la pneumonie et du cancer du poumon, entre autres maladies. Les études de toxicité n'ont montré aucune toxicité notoire sur la croissance, les fonctions hépatiques et rénales indiquant que la consommation d'eau bouillie avec le foyer PO150 utilisant la coque de riz comme combustible, n'est pas nocive aux doses aux étudiées (0,5 ml / 100g pc ; 1 ml / 100g pc et 2 ml / 100g pc).

## **PERSPECTIVES**

A l'issu de ce travail nous envisageons de poursuivre les analyses suivantes :

- Evaluer le cout de production des briquettes à base de coques de riz ;
- Réaliser un test de toxicité avec des doses plus élevées pour une période plus longue suivant le protocole de l'OCDE ;
- Évaluer le niveau de toxicité directe des gaz émis par les gazéificateurs utilisés dans une pièce fermée sur des rats ;
- Compléter l'analyse du cycle de vie en incluant le facteur type de matériaux utilisé pour la production des gazéificateurs ;
- Evaluer la composition chimique (Hydrocarbure Aromatique Polycyclique) d'un aliment cuit aux coques de riz afin de mesurer l'impact de la fumée produite sur ce dernier.

## REFERENCES

- Achebe, C. H., Umeji, A. C., and Chukwuneke, J. L.** (2018). Energy Evaluation of Various Compositions of Biomass Waste Briquettes. *Advances in Research*, Vol.13 (N° 6), 1-11.
- Adapa, P., Tabil, L., Schoenau, G., Crerar, B., and Sokhansanj, S.** (2002). Compression characteristics of fractionated alfalfa grinds. *Powder Handling & Processing*, Vol. 14 (N° 4), 252-259.
- ADEME (Agence de l'environnement et de la maitrise).** (2001). *Mesure des caractéristiques des combustibles bois*. ADEME -Critt Bois – Fibois -CTBA. P: 122
- Adrien, B. Y., Sakariyou, M., and Koffi, A.** (2010). *Identification des potentialités et modalités d'exploitation des sources d'énergies renouvelables sur l'ensemble du territoire national*. Rapport final, Programme des Nations Unies pour le Developpement (PNUD). P: 150
- AFP,** (2018). *L'Union européenne veut réduire de près d'un tiers sa consommation d'énergie d'ici 2030*. Retrieved from [connaissancedesenergies.org](http://connaissancedesenergies.org)
- Ahiduzzaman, M., and Islam, A.** (2013). Development of biomass stove for heating up die barrel ofrice husk briquette machine. *Procedia Engineering*, Vol. 56, 71-77. doi:org/10.1016/j.proeng.2013.03.194.
- AIE: (Agence Internationale de l'Energie).** (2018). *World Energy Outlook 2018*. AIE. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>
- Al-Widyan, M., Al-Jilal, H., Abu-Zreig, M.M., and Abu-Hamdeh, N.H.** (2002). Physical durability and stability of olive cake briquettes. *Canadian Biosystems Engineering*, Vol. 44, 341-345.
- Amissah, J.G.N., Ellis, W.O., Oduro, I., and Manful, J.T.** (2003). Nutrient composition of bran from new rice varieties under study in Ghana. *Food Control*, Vol. 14 (N° 1), 21–24. doi:org/10.1016/S0956-7135(02)00047-6.

- AOAC.** (2002). *Official methods of analysis of AOAC International* (Vol. 920). AOAC International. P: 255
- Aprovecho Research Center.** (2013). *Testing & Protocols Cottage Grove (OR)*. Aprovecho Research. Retrieved from <http://www.aprovecho.org/lab/pubs/testing>.
- Arizpe, N., Giampietro, M., and Ramos-Martin, J.** (2011). Food security and fossil energy dependence: an international comparison of the use of energy in agriculture (1991 - 2003). *Critical Reviews in Plant Sciences*, Vol. 30, 45-63. doi:10.1080/07352689.2011.554352
- ASTM Standard.** (2010). Standard test method for gross calorific value of coal and coke. *American Society for Testing and Materials*, Vol. 5 (N<sup>o</sup> 6), 628–644.
- Babu, B., and Sheth, P. N.** (2006). Modeling and simulation of reduction zone of downdraft biomass gasifier: Effect of char reactivity factor. *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, 2602– 2611.
- Bailis R., Ogle D., Maccarty N., and Still D.** (2009). *The Water Boiling Test (WBT). Version 4.12*. Oregon, USA: Household Energy and Health Programme, Shell Foundation 2003. Pp: 122–64
- Balakrishnan, B. K., Mohd, I. D., and Wong, J. Y.** (2014). The Impact of Social Media Marketing Medium Toward Purchase Intention and Brand Loyalty Among Generation Y. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*; (Vol. 148), 177 – 185. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/82047991.pdf>
- Basu, P.** (2013). Biomass Gasification and Pyrolysis. *Practical Design and Theory*, Vol. 53. 177 – 185. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- Beagle, E.C.** (1978). *Rice-husk, conversion to energy* *FAO agricultural services bulletin* (Vol. 31) 377 – 385. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Belgiorno, V., Feo, G., Della Rocca, C., and Napoli, R.** (2003). Energy from gasification of solid wastes. *Waste Management*, Vol. 23, 1–15.



- Belhadj , B., Dilmi , B., Mezaini , A., Belhadri, A., and Benali, M.** (2018). Effect of oral exposure to acrylamide on biochemical and hematologic parameters in Wistar rats. *Drugs Chemistry and Toxicology*, 1–10.
- Belkadi, M. A.** (2009). *Etude technique pour la valorisation énergétique des micro-algues*. Thèse de Doctorat en Energie et Développement Durable, Facultés des sciences de l'Ingénieur. Université M'Hamed Bougara de Boumerdes- Algérie. Pp : 226
- Bello, S.R., Adegbulugbe, T. A.** (2010). Comparative study on utilization of charcoal, sawdust and rice husk in heating oven. *Agric Eng Int: CIGR Journal*, Vol. 12, N° 2, Pp: 29. <http://www.cigrjournal.org>
- Bhagirath S., Khawar, J., and Gulshan, M.** (2017). *Rice Production Worldwide*. Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-47516-5. Pp: 1–21
- Bhattacharya, S., Arul Joe, M., Kandhekar, Z., Abdul Salam, P. , and Shrestha, R.M.** (1999). Greenhouse-gas emission mitigation from the use of agricultural residues: the case of ricehusk. *Energy*, Vol. 24 (N° 1), 43-59.
- Bhattacharya, S.C. , Leon, M.A. , and Rahman, M. M.** (2002). A study on improved biomass briquetting. *Energy Sustainable Development*, Vol. 6(N° 2), 67–71. doi:org/10.1016/S0973-0826(08)60317-8.
- Biomass Technology Group (BTG).** ( 2013). *Charcoal production from alternative feedstocks*. The Netherlands: AV Enschede. Pp: 55
- Bohinski, C.** (1991). *Bioquímica* (Vol. 5). Wesley Iberoamericana, Wilmington: Editorial Addison.
- Boström, C., Gerde, P., Hanberg, A., Jernström, B., Johansson, C., Kyrklund, T., and Rannug, A.** (2002). Cancer risk assessment, indicators, and guidelines for polycyclic aromatic hydrocarbons in the ambient air. *Environmental Health Perspectives*, Vol. 110, 451-488.
- Bradford, M.** (1976). A Rapid and Sensitive Method for the Quantitation of Microgram Quantities of Protein Utilizing the Principle of Protein-Dye Binding. *Analytical Biochemistry*, Vol. 72, 248-254.

- Brown, J., and Thornton, J.** (1957). Percivall Pott (1714-1788) and chimney sweepers' cancer of the scrotum. *British journal of industrial medicine* , Vol. 14, 68–70.
- Butler, J.L., and McColly, H.F.** (1959). Factors affecting the pelleting of hay. *Agricultural Engineering*, Vol. 40, 442-446.
- CDM : Clean Development Mechanism.** (2006). *United Nations Framework Convention on Climate Change*. Executive Board, Clean Development Mechanism Project Design Document Form (CDM-PDD). Pp: 242-310
- Charles A., Jemima A., Kwesi B., and Priscilla K.** (2016). Aqueous leaf extract of *Carica papaya* (caricaceae) linn. Causes liver injury and reduced fertility in rats. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, Vol. 8 (N<sup>o</sup> 2), 261-265.
- Chin, O.C., and Siddiqui, K.M.** (2000). Characteristics of some biomass briquettes prepared under modest die pressures. *Biomass Bioenergy*, Vol.18 (N<sup>o</sup> 3), 223–228. doi:doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00084-7.
- Chou, C.S., Lin, S.H., Peng, C.C., and Lu, W.C.** (2009). The optimum conditions for preparing solid fuel briquette of rice straw by a piston-mold process using the Taguchi method. *Fuel Process Technology*, Vol. 90 (N<sup>o</sup> 7), 1041–1046. doi:org/10.1016/j.fuproc.2009.04.007
- Clucas, I.J., and Ward, A.R.** (1996). *Post-harvest fisheries development: a guide to handling/preservation, processing and quality*. Kent (UK): Natural Resource Institute. Pp : 335
- Daifullah, A., Girgis, B., and Gad, H.** (2004). A study of the factors affecting the removal of humic acid by activated carbon prepared from biomass material',. *Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 235(N<sup>o</sup> 1-3), 1-10.
- Demirbaş, A.** (1999). Physical properties of briquettes from waste paper and wheat straw mixtures. *Energy Conversion & Management*, Vol. 40, 437-445.
- Demirbaş, A., Şahin-Demirbaş, A., and Hilal, A.** (2004). Briquetting properties of biomass waste materials. *Energy Sources*, Vol. 26, 83-91.

- Department of Health (DoH).** (1996). *Health advisory group on chemical contamination incidents. Smoke Toxins.* Vol. 23, 123- 234
- Dickson M. H. et Fanelli M.** (2003). *Geothermal energy: utilization and technology,* Routledge.
- Dufour D.R., Lott J.A., Nolte F.S., Gretch D.R. , Koff R.S., and Seeff L.B.** (2000). Diagnosis and monitoring of hepatic injury II. Recommendation for use of laboratory tests in screening, diagnosis and monitoring. *Clinical Chemistry,* Vol. 46, 2050-2068.
- Dufour, A., Girods, P., Masson, E., Rogaume, Y., and Zoulalian, A.** (2009). Synthesis gas production by biomass pyrolysis: Effect of reactor temperature on product distribution. *International Journal of Hydrogen energy,* Vol. 34, 1726–1734.
- El-Shafey, E.** (2010). Removal of Zn (II) and Hg (II) from aqueous solution on a carbonaceous sorbent chemically prepared from rice husk. *Journal of Hazard Mater,* Vol. 175 (N° 1), 319–327. doi:org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.006
- Eyo, A.A.** (2001). *Fish processing technology in the tropics.* New Bussa: National Institute for Freshwater Fisheries Research (NIFFR). Pp: 1726–1734.
- Faccin, G., Miotto, L., Vieira, L., Barreto, P.L.M. , and Amante, E.R.** (2009). Chemical, sensorial and rheological properties of a new organic rice bran beverage. *Rice Sciences,* Vol. 16(N° 3), 226–234. doi:org/10.1016/S1672-6308(08)60083-9
- Forouzanfar, and et al.** (2015). *Global, regional, and national comparative risk assessment of 79 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks in 188 countries, 1990-2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease study 2013.* Pp: 176–233. doi:10.1016/S0140-6736(15)00128-2
- Gergaud, O.** (2002). “Modélisation énergétique et optimisation économique d’un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau,” Thèse de Doctorat de l’Ecole Normale Supérieure de Cachan, France, Décembre. Pp: 255.
- Ghorbel, I., Maktouf, S., Fendri, N., Jamoussi, K., Ellouze, C. S., Boudawara, T., and Zeghal, N.** (2016). Co-exposure to aluminum and acrylamide disturbs expression of metallothionein, roinflammatory cytokines and induces genotoxicity: Biochemical and

- histopathological changes in the kidney of adult rats. *Environmental Toxicology*, Vol. 9, 1044 - 1058.
- Giknis, M., and Clifford, C.** (2008). *Clinical laboratory parameters for Crl: Wi(Han) rats*. Wilmington, MA: Charles River Laboratories International. Pp: 2726–2777.
- Gonzales , A., and Gonzáles , F.** (1994). Evaluación de la función renal y el aparato urinario. *Bioquímica Clínica. Barcelona*, 193–212.
- Gonzales J., Ferreiro A., Rodríguez M., and Sanchez A.** (1998). McGraw-Hill-Interamericana. *Bioquímica Clínica*, 345–360.
- Gornall A., Bradwill C., and David M.** (1949). Determination of serum proteins by means of the biuret reaction. *Journal of Biology and Chemistry*, Vol. 77, 167-182.
- Goyal, H.B., Seal, D., and Saxena, R.C.** (2008). Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: a review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12 (N<sup>o</sup> 2), 504–517. doi:org/10.1016/j.rser.2006.07.014
- Granada, E., López González, L., Míguez, J.L., and Moran, J.** (2002). Fuel lignocellulosic briquettes, die design and products study. *Renewable Energy*, Vol. 27, 561-573.
- Grover, P.D., Mishra, S.K., and Clancy, J.S.** (1994). Development of an appropriate biomass briquetting technology suitable for production and use in developing countries. *Energy for Sustainable Development*, Vol. 1(N<sup>o</sup> 1), 45–48.
- Gunawan, S., Maulana, S., Anwar, K., and Widjaja, T.** (2011). Rice bran, a potential source of biodiesel production in Indonesia. *Industrial Crops and Products*, Vol. 33(N<sup>o</sup> 3), 624–628. doi:org/10.1016/j.indcrop.2010.12.027
- Hall, G.E., and Hall, C.W.** (1968). Heated-die wafer formation of alfalfa and Bermudagrass. *Transactions of the ASAE*, Vol. 11, 578-581.
- Hanping, C., Bin, L., Haiping, Y., Guolai, Y., and Shihong, Z.** (2008). Experimental Investigation of Biomass Gasification in a Fluidized Bed Reactor. *Energy & Fuel*, Vol. 22, 3493-3498. Retrieved from <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ef800180e>
- Hartzell, G.** (1996). Overview of combustion toxicology. *Toxicology*, Vol. 115, 1-3.

- Heffels, T., McKenna, R., and Fichtner, W.** (2014). An ecological and economic assessment of absorption-enhanced-reforming (AER) biomass gasification. *Energy Conversion and Management*, Vol. 77, 535–544.
- Holgate S.T., Samet J.M., Koren H.S., and Maynard R.** (1999). *Air pollution and health*. London: Academic Press. Pp: 455
- Horner W.F.A.** (1997). Preservation of fish by curing (drying, salting and smoking). In H. GM, *Fish processing technology. 2nd ed* (pp. 34–36). London: Blackie Academic & Professional.
- Husain, Z., Zainac, Z., and Abdullah, Z.** (2002). Briquetting of palm fibre and shell from the processing of palm nuts to palm oil. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 22, 505-509.
- Iribarren, D., Susmozas, A., and Dufour, J.** (2013). Life-cycle assessment of Fischer-Tropsch products from biosyngas. *Renewable Energy*, Vol. 59, 229-236.
- IRRI, and RICESTAT.** (2019). *World Rice Statistics Online Query Facility*. Los Baños: International Rice Research Institute. Retrieved from <http://ricestat.irri.org:8080/wrs2/entrypoint.htm>
- Ishizaki, A., Saitoa, K., Haniokab, N., Narimatsub, S., and Kataokaa, H.** (2010). Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in food samples by automated on-line in-tube solid-phase microextraction coupled with high-performance liquid chromatography-fluorescence detection. *Journal of Chromatography*, Vol. 1217, 5555-5563.
- ISO 14044.** (2006). *Environmental Management –Life Cycle Assessment – Requirements and guidelines*. Suisse, Genève: International Organization for standardization. Pp: 332
- Janvijitsakul, K., and Kuprianov, VI.** (2008). Major gaseous and PAH emissions from a fluidized-bed combustor firing rice husk with high combustion efficiency. *Fuel Processing Technology*, Vol. 89 (N<sup>o</sup> 8), 777-787.
- Jenkins B., L.L. Baxter, T.R. Miles Jr., T.R.** (1998). Miles, Combustion properties of biomass, *Fuel Process. Technol.* 5417- 5446. [https://doi.org/10.1016/s0378-3820\(97\)00059-3](https://doi.org/10.1016/s0378-3820(97)00059-3).

- Jimenez, A., Tongeren, M., and Aitken, R.** (2012). *Guidance for Collection of Inhalable and Respirable Ni Dust*. Edinburgh, UK. Pp: 345-453
- Kaliyan, N., and Morey, R.** (2009). Densification characteristics of corn stover and switchgrass. In A. MI 49085-9659 (Ed.), *the ASABE Annual International Meeting*. Portland, OR: ASABE.
- Kaliyan, N., and Morey, R.V.** (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass Bioenergy*, Vol. 33 (N° 3), 337–359. doi:org/10.1016/j.biombioe.
- Kaneko J.J., Harvey J.W., and Bruss M.L.** (1997). *Clinical Biochemistry of Domestic Animals* (5ème ed.). Academic Press: San Diego.
- Kapilan, R., and Arasaratnam, V.** (2011). Paddy husk as support for solid state fermentation to produce xylanase from *Bacillus pumilus*. *Rice Science*, Vol. 18 (N° 1), 36–45. doi:org/10.1016/S1672-6308(11)60006-1.
- Kaplan, H.L., and Hartzell, G.E.** (1984). Modeling of toxicological effects of fire gases: I. incapacitating effects of narcotic fire gases. *Journal of Fire Science*, Vol. 2, 286- 305.
- Kiatkittipong, W., Wongsuchoto, P., and Pavasant, P.** (2009). Life cycle assessment of bagasse waste management options. *Waste Management*, Vol. 29 (N° 5), 1628-1633.
- Kirkels, A. F., and Verbong, G. P.** (2011). Biomass gasification: Still promising? A 30-year global overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, 471-481.
- Krishnani, K.K., Meng, X., Christodoulatos, C., and Boddu, V.M.** (2008). Biosorption mechanism of nine different heavy metals onto biomatrix from rice husk. *Journal of Hazard Mater*, Vol. 153 (N° 3), 1222–1234. doi:org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.113.
- Lehnert, M., Pesch, B., Lotz, A., Pelzer, J., Kendzia, B., Gawrych, K. E., et al.** (2012). Bruning, the Weldox study group, Exposure to inhalable, respirable, and ultrafine particles in welding fume. *Annals of Occupational Hygiene*, Vol. 56, 557-567.
- Levin, B.C., and Kuligowski, E.D.** (2006). *Toxicology of fire and smoke, in Inhalation Toxicology*. Boca Raton: Taylor & Francis. Pp: 122-196

- Levin, B.C., Paabo, M., Gurman, J.L., and Harris, S.E.** (1987). Toxicological interactions between carbon monoxide and carbon dioxide. *Toxicology*, Vol. 47 (N° 1-2), 135-164.
- Li, Y., and Liu, H.** (2000). High pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 19, 177-186.
- Li, Z., Lu, J., Yang, Z., Han, L., and Tan, T.** (2012). Utilization of white rice bran for production of lactic acid. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 39, 53- 58. doi:org/10.1016/j.biombioe.2011.12.039
- Lim, J., Abdul Manan, Z., Wan Alwi, S., and Hashim, H.** (2012a). A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Review*, Vol. 16 (N° 5), 3084–3094. doi:org/10.1016/j.rser.2012.02.05
- Lim, S., Wu, T., Sim, E., Lim, P., and Clarke, C.** (2012b). Biotransformation of rice husk into organic fertilizer through vermicomposting. *Ecology Engineering*, Vol. 4 (N° 1), 60–64. doi:org/10.1016/j.ecoleng.2012.01.011
- Lin, L., Ying, D., Chaitep, S., and Vittayapadung, S.** (2009). Biodiesel production from crude rice bran oil and properties as fuel. *Applied Energy*, Vol. 86 (N° 5), 681–688. doi:org/10.1016/j.apenergy.2008.06.002
- Louvel, R.** (1986). *Evaluation de l'acceptabilité des briquettes au Niger. Projet pilote pour l'usage des briquettes au Niger de l'Association Bois de Feu au compte du Conseil de l'Entente. In Boiling Point N° 12 - Avril 1987 (ITDG, 1987).*
- Lv, P., Yuan, Z., Ma, L., Wu, C., Chen, Y., and Zhu, J.** (2007). Hydrogen-rich gas production from biomass air and oxygen/steam gasification in a downdraft gasifiers. *Renewable Energy*, Vol. 32, 2173–2185.
- Madhiyanon, T., Lapirattanakun, A., Sathitruangsak, P., Saponronnarit, S.** (2006). A novel cyclonic fluidized-bed combustor ([psi]-FBC): Combustion and thermal efficiency, temperature distributions, combustion intensity, and emission of pollutants. *Combustion and Flame*, Vol. 146 (N° 1-2), 232-245.

- Mai Thao, P.T. , Kurisu, K.H. , & Hanaki, K.** (2011). Greenhouse gas emission mitigation potential of rice husks for An Giang province, Vietnam. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 35 (N° 8), 3656–3666. doi:org/10.1016/j.biombioe.2011.05.023
- Maiti, S., Dey, S., Purakayastha, S., and Ghosh, B.** (2006). Physical and thermochemical characterization of rice husk char as a potential biomass energy source. *Bioresources Technology*, Vol. 97 (N° 16), 2065–2070. doi:org/10.1016/j.biortech.2005.10.005
- Mani, S., Tabil, L.G., and Sokhansanj, S.** (2006a). Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 30, 648-654.
- Mani, S., Tabil, L.G., and Sokhansanj, S.** (2004). Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 37, 339-352.
- Mani, S., Tabil, L.G., and Sokhansanj, S.** (2006b). Specific energy requirement for compacting corn stover. *Bioresource and Technology*, Vol. 97, 1420-1426.
- Manickam, I., Ravindran, D., and Subramanian, P.** (2006). Biomass densification methods and mechanism. *Cogeneration & Distribution Generation Journal*, Vol. 21 (N°: 4), 33–45. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1080/15453660609509098>.
- Mark Jacob Goedkoop, Michiel Oele, Jorrit Leijting, Tommie Ponsioen, Ellen Meijer,** (January 2016). Introduction to LCA with SimaPro. Technical Report· Pp: 81
- Martini, F., Nath, J., and Bartholomew, E.** (2012). *Fundamental of Anatomy and Physiology* (9 ed.). San Fransisco, CA, USA: Pearson. Pp: 1420-1426.
- McKendry, P.** (2002). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource Technology*, Vol. 83, 47-54.
- McKendry, P.** (2002). Energy production from biomass (Part 3): gasification technologies. *Bioresource Technology*, Vol. 83, 55-63.



- Météo-paris.** (2019). *La fonte de la banquise Arctique bat des records*. Pp: 120-156. Retrieved from <http://www.meteo-paris.com/actualites/la-fonte-de-la-banquise-arctique-bat-des-records-12-aout-2019.html>
- Michael, B., Yano, B., Sellers, R., Perry, R., Morton, D., Roome, N., Schafer, K.** (2007). Evaluation of organ weights for rodent and non-rodent toxicity studies: A review of regulatory guidelines and a survey of current practices. *Toxicologic Pathology*, Vol. 35 (N° 5), 742-750.
- Michel, R., Ammar, M. R., Véron, E., Simon, P., and Poirier, J.** (2014). Correction: Investigating the mechanism of phase transformations and migration in olivine at high temperature. *RSC Advances*, Vol. 4, 26645-26652.
- Mirecki, A.** (2005). “Etude comparative des chaînes de conversion d’énergie dédiées à une éolienne de petite puissance,” Thèse de Doctorat de l’Institut National Polytechnique de Toulouse, France. Pp: 153-205.
- Mishra, A.** (2008). *Fuel for the clean energy debate – a study of fuelwood collection and purchase in rural India: Policy Brief*. Kathmandu: South Asian Network for Development and Environmental Economics (SANDEE). Pp: 253-285.
- Moshenin, N., and Zaske, J.** (1976). Stress relaxation and energy requirements in compaction of unconsolidated materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 21, 193-205.
- Murray, A. , and Price, L.** (2008). *Use of Alternative Fuels in Cement Manufacture: Analysis of Fuel Characteristics and Feasibility for Use in the Chinese Cement Sector*. Environmental Protection Agency. U.S.: Office of Technology Cooperation and Assistance. Pp: 103-200.
- Mwampamba, T., Owen, M., and Pigaht, M.** (2013). Opportunities, challenges and way forward for the charcoal briquette industry in sub-Saharan Africa. *Energy and Sustainable Development*, Vol. 17 (N° 2), 158–170. doi:org/10.1016/j.esd.2012.10.006

- Ndiema, C.K.W., Manga, P.N., and Ruttoh, C.R.** (2002). Influence of die pressure on relaxation characteristics of briquetted biomass. *Energy Conversion and Management*, Vol. 43, 2157-2161.
- Ndindeng, S., Manful, J., Futakuchi, K., Mapiemfu, D., Akoa-Etoa, J., Tang, E., and et al.** (2015a). Upgrading the quality of Africa's rice: a novel artisanal parboiling technology for rice processors in sub-Saharan Africa. *Food Science and Nutrition*, Vol. 3 (N<sup>o</sup> 6), 557-568. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1002/fsn3.242>
- Ndindeng S.A., Mbassi J.E.G., Mbacham W.F., Manful J., Graham-Acquaah S. Moreira J., and Futakuchi K.** (2015b). Quality optimization in briquettes made from rice milling by-products. *Energy for Sustainable Development*, Vol. 29, 24-31. [doi.org/10.1016/j.esd.2015.09.00](http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2015.09.00)
- Ndindeng, S.A., Marco, W., Sidi, S., and Koichi, F.** (2019). Evaluation of fan-assisted rice husk fuelled gasifier cookstoves for application in Sub-Sahara Africa. *Renewable Energy*, Vol. 139, 924-935.
- Ndindeng, S., Mapiemfu, D., Fantong, W., Nchinda, V., Ambang, Z., and Manful, J.** (2014). Postharvest adaptation strategies to the effects of temperature variations and farmer–miller practices on the physical quality of rice in Cameroon. *American Journal of Climate Change*, Vol. 3, 178–192. [doi.org/10.4236/ajcc.2014.32017](http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.32017)
- Nehdi, M., Duquette, J., and El Damatty, A.** (2003). Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33 (N<sup>o</sup> 8), 1203-1210.
- Nisbet, I.C.T., and LaGoy, P.K.** (1992). Toxic equivalency factor (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 290-300.
- Norris, J.C., and Ballantyne B.** (1999). Toxicology and implications of the products of combustion. *General and Applied Toxicology: Second Edition*, B. Ballantyne, T. Marrs, and T. Syversen, Editors, 1915 - 1933.

- Obernberger, I., and Thek, G.** (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 27, 653–669.
- OCDE: Organisation de coopération et de développement économiques.** (2001). *Ligne directrice de l'OCDE pour les essais de produits chimiques 423*. Pp: 355
- OCDE: Organisation de coopération et de développement économiques.** (2008). *Ligne directrice de l'OCDE pour les essais de produits chimiques 407*. Pp: 455
- Ohlemiller, T.** (2002). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition*. Walton: P.J. DiNenno, D. Drysdale, C.L. Beyler, and W.D. Pp: 195
- Ollett, A.L., Kirby, A.R., Parker, R., and Smith, A.C.** (1993). A comparative study of the effects of water content on the compaction behaviour of some food materials. *Powder Technology*, Vol. 75, 59-65.
- Olley, J., Doe, P.E. , and Heruwati, E.S.** (1988). The influence of drying and smoking on the nutritional properties of fish. *Elsevier*, 1–14.
- Olokor, J., Ihuahi, J., Omojowo, F., Falayi, B.A. , and Adelowo, E.A.** (2007). *Handbook of practical fisheries technology*. New Bussa: Fisheries Technology Division, National Institute for Freshwater Fisheries Research (NIFFR). Pp: 259-265.
- Olson H. , Betton G. , Robinson D. , Thomas K., Monroe, A., Kolaja, G., Bracken, W.** (2000). Concordance of the toxicity of pharmaceuticals in humans and in animals. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, Vol. 32, 56–67.
- OMS : Organisation Mondiale de la Santé.** (2005). *Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide. Summary of Risk Assessment*,. Retrieved from WHO/SDE/PHE/OEH/06.02. Pp: 259.
- OMS : Organisation Mondiale de la Santé.** (2002). *Rapport sur la santé dans le monde 2002 – Réduire les risques et promouvoir une vie saine*. Genève: Organisation mondiale de la Santé. Pp: 139

- Onuegbu, T., Ogbu, I., and Ejikeme, C.** (2012). Comparative analyses of densities and calorific values of wood and briquettes samples prepared at moderate pressure and ambient temperature. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*, Vol. 1 (N<sup>o</sup> 2), 40–45.
- Owor, O., Nyakairu, G., Mbabazi, J., and Kwetegyeka, J.** (2012). Polycyclic aromatic hydrocarbons in roasted pork, kampala, Uganda. *International Journal of Current Research*, Vol. 4 (N<sup>o</sup> 8), 042-048.
- Oyelaran O.A., Bolaji B.O., Waheed M.A. and Adekunle M.F.** (2014). Effects of Binding Ratios on Some Densification Characteristics of Groundnut Shell Briquettes. *Iranica Journal of Energy & Environment*, Vol. 5 (N<sup>o</sup> 2): 167-172. DOI: 10.5829/idosi.ijee.2014.05.02.08
- Palani S., Raja R., Kumar P., and Jayakumar S.** (2009). Therapeutic efficacy of *Pimpinella tirupatiensis* (Apiaceae) on acetaminophen induced nephrotoxicity and oxidative stress in male albino rats. *International Journal of PharmTech Research*, Vol. 1 (N<sup>o</sup> 3), 925-934.
- Parmigiani, S.P., Vitali, F., Lezzi, A.M., and Vaccari, M.** (2014). Design and performance assessment of a rice husk fueled stove for household cooking in a typical sub-Saharan setting. *Energy for Sustainable Development*, Vol. 23, 15–24. doi:org/10.1016/j.esd.2014.01.003
- Patel, M., Karera, A., and Prasanna, P.** (1987). Effect of thermal and chemical treatments on carbon and silica contents in rice husk. *Journal of Materials Science*, Vol. 22 (N<sup>o</sup> 7), 2457-64.
- Patra, T.K., and Sheth, P.N.** (2015). Biomass gasification models for downdraft gasifier: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 50, 583-593. doi:org/10.1016/j.rser.2015.05.012
- Payne, J.D.** (1978). Improving quality of pellet feeds. *Milling Feed and Fertiliser*, Vol. 161, 34-41.

- Permchart, W., and Kouprianov, VI.** (2004). Emission performance and combustion efficiency of a conical fluidized-bed combustor firing various biomass fuels. *Bioresource Technology*, Vol. 92 (N<sup>o</sup> 1), 83-91.
- Phillips, D.H.** (1999). Polycyclic aromatic hydrocarbons in the diet. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, Vol. 443 (N<sup>o</sup> 1-2), 139-147.
- Phonphuak, N., and Thiansem, S.** (2012). Using charcoal to increase properties and durability of fred test briquettes. *Construction and Building Materials*, Vol. 29, 612-618.
- Plaza-Bolaños, P., Frenich, A., and Vidal, J.** (2010). Polycyclic aromatic hydrocarbons in food and beverages. Analytical methods and trends. *Journal of Chromatography A*, Vol. 1217, 6303– 6326.
- Pourali, O., Asghari, F.S., and Yoshida, H.** (2010). Production of phenolic compounds from rice bran biomass under subcritical water conditions. *Chemical Engineer Journal*, Vol. 160 (N<sup>o</sup> 1), 259–66. doi:org/10.1016/j.cej.2010.02.057
- Prasad, C.S., Maiti, K.N., and Venugopal, R.** (2001). Effect of rice husk ash in whiteware compositions. *Ceram Int*, Vol. 27 (N<sup>o</sup> 6), 629–35. doi:org/10.1016/S0272-8842(01)00010-4
- Prasetyoko, D., Ramli, Z., Endud, S., Hamdan, H. , and Sulikowski, B.** (2006). Conversion of rice husk ash to zeolite beta. *Waste Management*, Vol. 26 (N<sup>o</sup> 10), 1173-1179.
- Pratt D.S., and Kaplan M.M.** (2000). Evaluation of abnormal liver-enzyme results in asymptomatic patients. *New England Journal of Medicine*, Vol. 342, 1266-1271.
- Prien, T., and Traber, D.** (1988). Toxic smoke compounds and inhalation injury a review. *Burns*, Vol. 14 (N<sup>o</sup> 6), 451-60.
- Prockop, L., and Chichkova, R.** (2007). Carbon monoxide intoxication: an updated review. *The Journal of the Neurological Sciences*, Vol. 262, 122-130. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jns.2007.06.037>
- Puig-Arnabat, M., Bruno, J., and Coronas, A.** (2010). Review and analysis of biomass gasification models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, 2841-2851.

- Purser, D., and Berrill, K.** (1983). Effects of carbon monoxide on behavior in monkeys in relation to human fire hazard. *Archives of Environmental Health*, Vol. 38 (N<sup>o</sup> 5), 308- 15.
- Raju J., Roberts J. , Taylor M. , Patry D. , Chomyshyn E., Caldwell D., and Metha R.** (2015). Toxicological effects of short-term dietary acrylamide exposure in male F344 rats. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, Vol. 39, 85–92.
- Raju, J., Kocmarek, A., Roberts, J., Taylor, M., Patry, D., Chomyshyn, E., Mehta, R.** (2016). Lack of adverse health effects following 30-weeks of dietary exposure to acrylamide at low doses in male F344 rats. *Toxicology Reports*, Vol. 3, 673–678.
- Rajvanshi, A.K.** (1986). Biomass Gasification. (D. Goswami, Ed.) *Alternative Energy in Agriculture, II*, pp. 83-102.
- Ramanathan V., Crutzen P. J. , Kiehl J.T. , and Rosenfeld D.** (2001). Aerosols, climate and the hydrological cycle. *Science*, Vol. 294, 2119-2124.
- Rao S., Pachauri S., Dentener F., Kinney P., Klimont Z., Riahi K., and Schoepp W.** (2013). Better air for better health: forging synergies in policies for energy access, climate change and air pollution. *Global Environmental Change*, Vol. 23, 1122-1130. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.05.003>
- Rasmus, H.** (2003). *Household Fuel and Energy use In Developing Countries - A Multi-country Study*. Oil and Gas Policy Division: The World Bank.
- Reed, T.B., and Das, A.** (1988). *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems*. Colorado USA: Solar Technical Information Program. Pp: 326
- Rehkugler, G.E., and Buchele, W.F.** (1969). Biomechanics of forage wafering. *Transactions of the ASAE*. Vol. 12, 1-8.
- Reitman, S., and Frankel, S.** (1957). A colorimetric method for the determination of serum glutamic oxalacetic and glutamic pyruvic transaminases. *American Journal of Clinical Pathology*, Vol. 28 (N<sup>o</sup> 1), 56-63.

- Rhén, C., Gref, R., Sjöström, M., and Wästerlund, I.** (2005). Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of Norway spruce pellets. *Fuel Processing Technology*, Vol. 87, 11-16.
- Rohman, A.** (2014). Rice bran oil's role in health and cooking. In P. V. Watson RR, *Wheat and rice in disease prevention and health: benefits, risks and mechanisms of whole grains in health promotion* (p. 48).
- Roos, C.J.** (2010). *Clean Heat and Power Using Biomass Gasification for Industrial and Agricultural Projects*. WA: Northwest: Clean Energy Application Center, U.S. Department of Energy. Pp: 234
- Ruiz, J. A., Juarez, M. C., Morales, M. P., Munoz, P., and Mendivil, A.** (2013). Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 18, 174-183.
- Ryu, C., Yang, Y., Khor, A., Yates, N., Sharifi, V., and Swithenbank, J.** (2006). Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I. Experiments—fuel type, equivalence ratio and particle size. *Fuels*, Vol. 85, 1039–1046. doi:org/10.1016/j.fuel.2005.09.019
- S.C.F.** (2002). *Opinion of the Scientific Committee on Food (SCF) in the risks to human health of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Food* . Brussels: European Commission, Health and Consumer Protection Directorate General. Pp: 1039–1046.
- Safiétou, T. F., Dominique, F., Didier, R., and Hubert, G.** (1989). *Valeur nutritive de cinq espèces ligneuses d'Afrique de l'Ouest : Leur aptitude à améliorer les rations à base de fourrages pauvres distribuées aux ovins*. Institut Sénégalais de recherches. Pp: 539–546.
- Saha, B.C., and Cotta, M.A.** (2007). Enzymatic saccharification and fermentation of alkaline peroxide pretreated rice hulls to ethanol. *Enzyme and Microbial Technology*, Vol. 41 (N<sup>o</sup> 4), 528-32.
- Saha, B.C., and Cotta, M.A.** (2008). Lime pretreatment, enzymatic saccharification and fermentation of rice hulls to ethanol. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 32 (N<sup>o</sup> 10), 971-7.

- Saha, B.C., Iten, L.B., Cotta, M.A. , and Wu, Y.V.** (2005). Dilute Acid Pretreatment, Enzymatic Saccharification, and Fermentation of Rice Hulls to Ethanol. *Biotechnol. Prog.*, Vol. 21, 816-22.
- Sampattagul, S., Kato, S., Kiatsiriroat, T., and Widiyanto, A.** (2004). Life cycle considerations of the flue gas desulphurization system at a lignite-fired power plant in Thailand. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 9 (N<sup>o</sup> 6), 387-393.
- Sangeeta Chopra , and Jain Anil Kr.** (2007). A Review of Fixed Bed Gasification Systems for biomass. (A. E. journal, Ed.) *Invited Overview, IX(5)*. Pp: 539–546.
- Sarah, C., Molly, R., Melissa, H., Rebe, F., and Ben, M.** (2016). *Final report life cycle assessment of cookstove fuels in India and china Eastern Research Group*. Pp: 387-393. Inc. Lexington. Retrieved from <https://www.cleancookingalliance.org/binary-data/RESOURCE/file/000/000/496-1.pdf>
- Saravanan, S. , Nagarajan, G., Rao, G. , and Sampath, S.** (2007). Feasibility study of crude rice bran oil as a diesel substitute in a DI–CI engine without modifications. *Energy and Sustainable Development*, Vol. 11 (N<sup>o</sup> 3), 83–92. doi:org/10.1016/S0973-0826(08)60580-3
- Saravanan, S.D., and Senthil Kumar, M.** (2013). Effect of mechanical properties on rice husk ash reinforced aluminum alloy (AlSi10Mg) matrix composites. *Procedia Engineer*, Vol. 64, 1505–13. doi:org/10.1016/j.proeng.2013.09.232
- Saunders, R.M., and Betschart, A.A.** (1979). Rice and rice foods: chemistry and nutrition. *Tropical Foods: Chemistry and Nutrition*, Vol. 1 (N<sup>o</sup> 1), 191–216.
- Sengor , G., Kalafatoglu, H., and Gun, H.** (2004). The determination of Microbial flora, water activity and chemical analysis in smoked Mussels (*Mytilus galloprovincialis*). *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences* , Vol. 28, 793–797.
- Seo, E.S.M., Andreoli, M. , and Chiba, R.** (2003). Silicon tetrachloride production by chlorination method using rice husk as raw material. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 141 (N<sup>o</sup> 3), 351-356.



- Shafie, S.M., Mahlia, T.M., Masjuki, H.H., and Yazid, A.A.** (2012). A review on electricity generation based on biomass residue in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, 5879-5889.
- Shaw, M.D., Tabil, L.G. , Panigrahi, S., and Chang, P.** (2006). Evaluation of compression, relaxation, and frictional properties of peat moss, wheat straw, oat hull, and flax shive grinds. *Third International Conference on Biomass for Energy*. Kiev, Ukraine. 551-556.
- Shim, J., and Mulvaney, S.J.** (2001). Effect of heating temperature, pH, concentration and starch/whey protein ratio on the viscoelastic properties of corn starch/whey protein mixed gels. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, Vol. 81, 706-717.
- Siedlecki, M., De Jong, W., and Verkooijen, A. H.** (2011). Fluidized bed gasification as a mature and reliable technology for the production of bio-syngas and applied in the production of liquid transportation fuels—A review. *Energies*, Vol. 4, 389-434.
- Šimko, P.** (2002). Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in smoked meat products and smoke flavouring food additives. *Journal of Chromatography 047 International Journal of Current Research*, Vol. 4 (N<sup>o</sup> 8), 042-048.
- Singh, A., and Singh, Y.** (1982). Briquetting of wheat straw. *Journal of Research Punjab Agricultural University*, Vol. 20 (N<sup>o</sup> 2), 154-159.
- Singh, N., Singh, J., and Sodhi, N.S.** (2002). Morphological, thermal, rheological and noodle-making properties of potato and corn starch. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, Vol. 82, 1376-1383.
- Skupińska, K., Misiewicz, I., and Kasprzycka-Guttman.** (2004). *Acta Pol. Pharm. Polycyclic aromatic hydrocarbons: physicochemical properties, environmental appearance and impact on living organisms*, Vol. 61, 233–240.
- Smith K.R., and Haigler E.** (2008). Co-benefits of climate mitigation and health protection in energy systems: scoping methods. *Annual Review of Public Health*, Vol. 29, 11-25. Retrieved from <https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090759>
- Smith, I., Probert, S., Stokes, R., and Hansford, R.J.** (1977). The briquetting of wheat straw. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 22, 105-111.

- Smith, K.R.** (1987). *Biofuels, air pollution, and health: a global review*. New York: Plenum Press.
- Smith, K.R.** (1993). Fuel combustion, air pollution exposure, and health: the situation in developing countries. *Annual Review of Energy and Environment*, Vol. 18, 529–566.
- Smith, K.R.** (1994). Health, energy, and greenhouse-gas impacts of biomass combustion in household stoves. *Energy for sustainable development*, Vol. 1 (N<sup>o</sup> 4), 23-29. doi:org/10.1016/S0973-0826(08)60067-8
- So, S.J., Jang, I.S., and Han, C.S.** (2008). Effect of micro/nano silica particle feeding for mice. *Journal of Nanosciences and Nanotechnology*, Vol. 8 (N<sup>o</sup> 10), 5367–5371. doi:org/10.1166/jnn.2008.1347.
- Sokhansanj, S., Mani, S., Bi, X., Zaini, P., and Tabil, L.** (2005). Binderless pelletization of biomass. In ASAE (Ed.), *the ASAE Annual International Meeting*. Tampa, FL, 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659 USA. Pp: 329–566.
- Sookkumnerd, C. , Ito, N. , and Kito, K.** (2005). Financial viabilities of husk-fueled steam engines as an energy-saving technology in Thai rice mills. *Appl Energy*, Vol. 82 (N<sup>o</sup> 1), 64–80. doi:org/10.1016/j.apenergy.2004.09.012
- Sotannde, O., Oluyeye, A., and Aba, G.** (2010). Physical and Combustion of charcoal briquettes from neem wood residues. *International Agrophysics*, Vol. 24, 189-194.
- SPSS.** (2002). *Statistical Package for Social Sciences version 10.1.4*. Chicago (IL): SPSS Inc.
- Squilbin, O.** (2002). *Presentation at Renewable Energies and Cogeneration (EREC) for Sustainable Development in Africa*. Catholic University of Louvain-Biomass Energy Group (UCL-GEB). Pp: 332
- Stadler, R.H., and Lineback , D.R.** (2008). *Process-induced Food Toxicants—Occurrence, Formation, Mitigation and Health Risks*. New Jersey: John Wiley and Sons. Pp: 345
- Stanley, R.** (2003). Fuel Briquettes-Theory and applications from around the world,. *Legacy Foundation*. Pp: 23- 68.

- Stenfors, N., Nordenhall, C., Salvi, S., Mudway, I., Blomberg, A., Helleday, R., Sandstrom, T.** (2004). Different airway inflammatory responses in asthmatic and healthy humans exposed to diesel. *European Respiratory Journal*, Vol. 23 (N° 1), 82.
- Steubing, B., Ballmer, I., Gassner, M., Gerber, L., Pampuri, L., Bischof, S., Zah, R.** (2014). Identifying environmentally and economically optimal bioenergy plant sizes and locations, A spatial model of wood-based SNG value chains. *Renewable Energy*, Vol. 61, 57 - 68.
- Stewart, R.** (1975). The effect of carbon monoxide on humans. *Annual Review of Pharmacology*, Vol. 15, 409-23.
- Sujirote, K., and Leangsuwan, P.** (2003). Silicon carbide formation from pretreated rice husks. *Journal of Materials Science*, 38, 4739-44.
- Supachita, K., Chihiro, F., Atsushi, T., and Kuchonthara, P.** (2013). Synergetic effect during co-pyrolysis/gasification of biomass and sub-bituminous coal. *Fuel processing technology*, 11-18.
- Suzuki, R.M. , Andrade, A.D. , Sousa, J.C. , and Rollemberg, M.C.** (2007). Preparation and characterization of activated carbon from rice bran. *Bioresour Technol*, Vol. 98 (N° 10), 1985–1991. doi:org/10.1016/j.biortech.2006.08.001
- Sylvie Chiousse et Brahim Labari** (2012). Les identités méditerranéennes au défi du processus de la mondialisation Mutations, enjeux et perspectives. Dépôt légal : 2016MO0099 ISBN : 9789954369067. Pp: 244
- Tabil, Jr. L.G., and Sokhansanj, S.** (1996a). Compression and compaction behavior of alfalfa grinds – part 1: compression behavior. *Powder Handling & Processing*, Vol. 8 (N° 1), 17-23.
- Tabil, Jr. L.G., and Sokhansanj, S.** (1996b). Compression and compaction behavior of alfalfa grinds – part 2: compaction behavior. *Powder Handling & Processing*, Vol. 8 (N° 2), 117-122.
- Tabil, Jr. L.G., and Sokhansanj, S.** (1997). Bulk properties of alfalfa grind in relation to its compaction characteristics. *Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 13 (N° 4), 499-505.

- Tauon, M., and Panchapan, S.** (2002). Development of rice-residue application in agriculture. *Journal of Academic Service Centre Khon Kaen University*, Vol. 10 (N° 1), 72-78.
- Tchouate, H.** (1999). *feasibility of biomass gasification for decentralised rural electrification and industry in remote areas in africa*. Institut de l'Énergie et de l' Environnement de la Francophonie (IEPF). Pp: 199
- Teo S. , Stirling D. , Thomas S. , and Hoberma** (2002). A 90-day oral gavage toxicity study of d-methylphenidate and d, l-methylphenidate in SpragueDawley rats. *Toxicol.*, Vol. 179 (N° 3), 183-196. Pp: 499-505.
- Tewarson A.** (1996). Ventilation effects on combustion products. *Toxicology*, Vol. 115 (N° 1-3), 145-56.
- Thomas, M., Huijnen, P.T.H.J., van Vliet, T., van Zuilichem, D.J., Thomas, M., and van der Poel, A.F.B.** (1999). Effects of process conditions during expander processing and pelleting on starch modification and pellet quality of tapioca. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, Vol. 79, 1481-1494.
- Thomas, M., van Vliet, T., and van der Poel A.F.B.** (1998). Physical quality of pelleted animal feed 3. Contribution of feedstuff components. *Animal Feed Science Technology*, Vol. 70, 59-78.
- Thomas, M., van Zuilichem, D., and van der Poel, A.F.B.** (1998). Quality of pelleted animal feed 2. Contribution of processes and its conditions. *Animal Feed Science Technology*, Vol. 64, 173-192.
- Tietz W.N. , Prude E.L. , and Sirgard-Anderson O.** (1994). *Tietz Textbook of Clinical Chemistry*. WB Saunders London, UK. Pp: 290
- Tijmensen, M., Faaij, A., Hamelinck, C., and Hardeveld, M.** (2002). Exploration of the possibilities for production of Fischer-Tropsch liquids and power via biomass gasification. *Biomass & Bioenergy*, Vol. 23, 129-152.
- Toan, P.K., Cuong, N.D., and Leon, M.A.** (2005). Activities and Achievements of a Biomass Briquetting Project in Vietnam. (pp. 18-21 ). Jakarta, Indonesia: World Renewable Energy Regional Conference. Pp: 553

- Toan, P.K., Cuong, N.D., Quy, N.T., and Sinh, P.K.** (2000). Application of briquetting technology to produce briquettes from agricultural residues and by-products. *The Energy for the 21st Century* (pp. 1416–1419). World Renewable Energy Congress VI Renewables. doi:org/10.1016/B978-008043865-8/50295-6
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S.EPA).** (2004). *Air quality criteria for particulate matter*. National Center for Environmental Assessment-RTP Office. U.S.: Office of Research and Development: Research Triangle Park, NC. Pp: 553-599
- UNEP.** (2009). *Guidelines for social life cycle assessment of products*. UNEP/Earthprint. Belgium: Druk in de weer. Pp: 299
- Vadiveloo J., Nurfariza B., and Fadel J.G.** (2009). Nutritional improvement of rice husks. *Animal Feed Science and Technology*, Vol. 151 (N<sup>o</sup> 3), 299–305. doi:org/10.1016/j.anifeedsci.2009.03.002
- VDI.** (1997). *Cumulative Energy Demand - Terms, Definitions, Methods of Calculation*. VDI-Richtlinien 4600. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf. Pp: 344
- Wai-TC, Cheng-CL, Jen-S, Shang-TT, Chih-KL, Mei-LC, Shao-YH, A.** (2017). In vivo toxicologic study of larger silica nanoparticles in mice. *International Journal of Nanomedicine*, Vol. 12, 3421–3432. doi:10.2147/IJN.S126823
- Wamukonya, L., and Jenkins, B.** (1995). Durability and relaxation of sawdust and wheatstraw briquettes as possible fuels for Kenya. *Biomass and Biomass*, Vol. 8 (N<sup>o</sup> 3), 175- 179.
- Wan Y, Prudente A. and Sathivel S.** (2012). Purification of soluble rice branfiber using ultrafiltration technology. *LWT- Food Sci Technol*, Vol. 46 (N<sup>o</sup> 2), 574–579. doi:org/10.1016/j.lwt.2011.09.019. Pp: 456
- WHO: World Health Organization.** (2002). *Reducing risks, promoting healthy life*. Geneva: World Health Organization. Pp: 236
- WHO: World Health Organization.** (2010). guidelines for indoor air quality: selected pollutants. *Bonn: World Health Organization*. Retrieved May 19th, 2016, from [http://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0009/128169/e94535](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535)

- WHO: World Health Organization.** (2014). guidelines for indoor air quality. *household fuel combustion*. Retrieved May 19th, 1996, from [http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/141496/1/9789241548885\\_eng](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/141496/1/9789241548885_eng)
- WHO: World Health Organization.** ( 1998). Selected non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Health Criteria* , 202. Retrieved from <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc202.htm> (cited 5.2.2016)
- Widdicombe, J.G.** (1982). Pulmonary and respiratory tract receptors. *Journal of Experimental Biology*, Vol. 100, 41.
- Williams, P., and Nugranad, N.** (2011). Comparison of products from the pyrolysis and catalytic pyrolysis of rice husks. *Energy*, Vol. 25, 493–513.
- WRI/WBCSD.** (2011). *Product Life Cycle Accounting And Reporting Standard*. USA: World Business Council for Sustainable Development and World Resource Institute. Pp: 456
- Xu, W., Lo, T., and Memon, S.** (2012). Microstructure and reactivity of rich husk ash. *Construction and Building Materials*, Vol. 29, 541-547.
- Yaman, S., Şahan, M., Haykiri-açma, H., Şeşen, K., and Küçükbayrak, S.** (2000). Production of fuel briquettes from olive refuse and paper mill waste. *Fuel Processing Technology*, Vol. 68, 23-31.
- Yoon S.J., Son Y.I., Kim Y.K., and Lee J.G.** (2012). Gasification and power generation characteristics of rice husk and rice husk pellet using a downdraft fixed-bed gasifier. *Renewable Energy*, Vol. 42, 163-167. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.08.028>
- Yuzer, N., Cinar, Z., Akoz, F., Biricik, H., Yalcin Gurkan Y., and Kabay, N.** (2013). Influence of raw rice husk addition on structure and properties of concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 44, 54–62. doi:org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.070
- Zhang, J., Smith, K., Ma, Y., S. Ye, X., Weng, F., Jiang, W., Thorneloe.** (2000). Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: a database for emission factors. *Atmospher and Environment*, Vol. 34, 4537 -4549. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(99\)00450-1](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(99)00450-1)

**Zhang, K., Chang, J., Guan, Y., Chen, H., Yang, Y., and Jiang, J.** (2013). Lignocellulosic biomass gasification technology in China. *Renewable Energy*, Vol. 49, 175-184.

**Zhang, L., Xu, C., and Champagne, P.** (2010). Overview of recent advances in thermochemical conversion of biomass. *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, 969-982.

**Zouhour, K.** (2004). *Analyse de cycle de vie energetique de systeme de valorisation de biomasse*. Thèse de Doctorat de Lorraine; P: 217. [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)

## ANNEXES

### Annexe 1 : Fiches techniques pour le test d'ébullition de l'eau

#### ***Water Boiling Test - General Information***

<b><i>Test &amp; stove description</i></b>	
Name of Tester(s)	
Test Number or Code	
Test Dates	
Test Year	
Test Location	
Replicate Test Number	
Altitude/Elevation (m)	
Stove Type/Model	
Manufactured by	
Description and Notes	
Description of Pot(s)	
<b><i>Ambient conditions</i></b>	
Air relative humidity (%)	
Local boiling point (C)	
<b><i>Emission testing</i></b>	
Atmospheric P (kPa)	
Pitot delta-P	
Hood flow rate (m <sup>3</sup> /hr)	
<b><i>Notes or description about stove or operation not included elsewhere on this form</i></b>	



**Fuel description**

Your general description

Fuel type

Fuel description

Average length (cm)

1

Cross-sectional dimensions (cm x cm)

Default values (looked up)

Gross calorific value	_____	-	HHV, kJ/kg
Net calorific value	_____	-	LHV, kJ/kg
Char calorific value	_____	-	LHV, kJ/kg
Char carbon content	_____	95%	by mass

If possible, enter a calorific value from measurements of local fuel below.

Check box if you have a measured calorific value

Measured gross calorific value	_____	HHV measured, kJ/kg
Measured net calorific value	_____	LHV, kJ/kg
Assumed net calorific value	_____	LHV, kJ/kg

Values to be used for tests

Gross calorific value	_____	-	HHV, kJ/kg
Net calorific value	_____	-	LHV, kJ/kg
Fuel carbon content	_____	-	by mass

**Description of firestarter (e.g. paper, fluid) and small wood or kindling**

(note: Kindling should be weighed and reported with wood)

**Description of operation during the high-power test**

How is fire started?

When do you add new fuel to the fire?

How much fuel do you add at one time?

How often do you feed the fire without adding fuel (e.g. push sticks)?

Do you control the air above or below the fire?  
If so, what do you do?

***Description of operation during the simmering test***

How is fire started?

When do you add new fuel to the fire?  
How much fuel do you add at one time?

How often do you feed the fire without adding fuel (e.g. push sticks)?

Do you control the air above or below the fire?

If so, what do you do?

**Water Boiling Test - Test Entry Form** Version 4.2.3

These values are not linked to the Test sheets. This sheet is provided so you can print an easy data entry form. You will have to enter these values in each Test sheet to obtain the calculations.

Air Temperature

Wind Conditions

Fuel Dimensions

Moisture Content (wet basis)

Dry Weight Pot 1

Dry Weight Pot 2

Dry Weight Pot 3

Dry Weight Pot 4

Weight Container for Char

Local Boiling Point \*   
\* enter on General Information

Background CO2 (ppm)\*\*

Background CO (ppm)\*\*

Background PM (ug/m3)\*\*

Name of Testers

Date

Stove Type/Model

Test Number

Location

Fuel Type

Notes

\*\* For emission testing only

	Cold Start		Hot Start		Simmer	
	Start	End	Start	End	Start	End
Time	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Weight of Fuel	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Water Temperature, Pot 1	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Water Temperature, Pot 2	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Water Temperature, Pot 3	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Water Temperature, Pot 4	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Weight of Pot 1 with water	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Weight of Pot 2 with water	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Weight of Pot 3 with water	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Weight of Pot 4 with water	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Fire Starting Materials	<input type="text"/>		<input type="text"/>		<input type="text"/>	
Average CO2 (ppm)		<input type="text"/>		<input type="text"/>		<input type="text"/>
Average CO (ppm)		<input type="text"/>		<input type="text"/>		<input type="text"/>
Average PM (ug/m3)		<input type="text"/>		<input type="text"/>		<input type="text"/>
Average Duct Temperature		<input type="text"/>		<input type="text"/>		<input type="text"/>

**WATER BOILING TEST - VERSION 4.2.3 - TEST #1**

**DATA AND CALCULATION FORM (for one to four pots)\***

*Shaded cells and arrows require user input; unshaded cells automatically display outputs*

**Qualitative data**

Name(s) of Tester(s)

Test Number

Date

Location

Stove type/model

Type of fuel

gray: efficiency
blue: emissions
pink: error, missing input

**Initial Test Conditions**

Data	value	units	label	Data	value	units	label
Air temperature	<input type="text"/>	°C		Dry weight of Pot # 1 (grams)	<input type="text"/>	g	P1
Wind conditions	<input type="text" value="(Select from list)"/>			Dry weight of Pot # 2 (grams)	<input type="text"/>	g	P2
Fuel dimensions	<input type="text"/>			Dry weight of Pot # 3 (grams)	<input type="text"/>	g	P3
Fuel moisture content (wet basis)	<input type="text"/>	%	MC	Dry weight of Pot # 4 (grams)	<input type="text"/>	g	P4
Gross calorific value (dry fuel)	<input type="text" value="-"/>	kJ/kg	HHV	Weight of container for char (grams)	<input type="text"/>	g	k
Net calorific value (dry fuel)	<input type="text" value="-"/>	kJ/kg	LHV	Local boiling point	<input type="text" value="-"/>	°C	T <sub>b</sub>
Effective calorific value				Background concentrations: CO <sub>2</sub>	<input type="text"/>	ppm	CO <sub>2,b</sub>
(accounting for fuel moisture)	<input type="text" value="-"/>	kJ/kg	EHV	CO	<input type="text"/>	ppm	CO <sub>b</sub>
Char calorific value	<input type="text" value="-"/>	kJ/kg		PM	<input type="text"/>	ug/m <sup>3</sup>	PM <sub>b</sub>

Notes about this test:

**BASIC TEST DATA**

ef28105c78f7b8b939317e531e8979743191d9c6ef58107bad43bfa1c44f08e4 Test-1

TEST #1		COLD START HIGH POWER				HOT START HIGH POWER (OPTIONAL)				SIMMER TEST	
Measurements	Units	Start		Finish: when Pot #1 boils		Start		Finish: when Pot #1 boils		Start	Finish: 4:
		data	label	data	label	data	label	data	label	data	data
Time (in 24 hour form)	hr:min		$t_{cd}$		$t_{cf}$		$t_{hd}$		$t_{hf}$		$t_{si}$
Weight of fuel	g		$f_{cd}$		$f_{cf}$		$f_{hd}$		$f_{hf}$		$f_{si}$
Water temperature, Pot # 1	°C		$T1_{cd}$		$T1_{cf}$		$T1_{hd}$		$T1_{hf}$		$T1_{si}$
Water temperature, Pot # 2	°C		$T2_{cd}$		$T2_{cf}$		$T2_{hd}$		$T2_{hf}$		$T2_{si}$
Water temperature, Pot # 3	°C		$T3_{cd}$		$T3_{cf}$		$T3_{hd}$		$T3_{hf}$		$T3_{si}$
Water temperature, Pot # 4	°C		$T4_{cd}$		$T4_{cf}$		$T4_{hd}$		$T4_{hf}$		$T4_{si}$
Weight of Pot # 1 with water	g		$P1_{cd}$		$P1_{cf}$		$P1_{hd}$		$P1_{hf}$		$P1_{si}$
Weight of Pot # 2 with water	g		$P2_{cd}$		$P2_{cf}$		$P2_{hd}$		$P2_{hf}$		$P2_{si}$
Weight of Pot # 3 with water	g		$P3_{cd}$		$P3_{cf}$		$P3_{hd}$		$P3_{hf}$		$P3_{si}$
Weight of Pot # 4 with water	g		$P4_{cd}$		$P4_{cf}$		$P4_{hd}$		$P4_{hf}$		$P4_{si}$
Fire-starting materials (if any)	--										
Weight of charcoal+container	g				$c_c$				$c_h$		
Average CO2	ppm				$CO2_c$				$CO2_h$		
Average CO	ppm				$CO_c$				$CO_h$		
Average PM	ug/m3				$PM_c$				$PM_h$		
Average Duct Temperature	°C				$T_{cd}$				$T_{hd}$		
Total CO2 (if available)	g				$m_{CO2,c}$				$m_{CO2,h}$		
Total CO (if available)	g				$m_{CO,c}$				$m_{CO,h}$		
Total PM (if available)	g				$m_{PM,c}$				$m_{PM,h}$		

Calculations/Results	Units	COLD START		HOT START		SIMMER TEST (CALCULATIONS DIFFER FROM HIGH POWER TEST)	
		data	label	data	label	Units	data
Fuel consumed (moist)	g	-	$f_{cm}$	-	$f_{hm}$	g	-
Net change in char during test	g	-	$\Delta C_c$	-	$\Delta C_h$	g	-
Equivalent dry fuel consumed	g		$f_{cd}$		$f_{hd}$	g	
Water vaporized from all pots	g	-	$w_{cv}$	-	$w_{hv}$	g	-
Effective mass of water boiled	g		$w_{or}$		$w_{hr}$	g	
Time to boil Pot # 1	min	-	$\Delta t_c$	-	$\Delta t_h$	min	-
Temp-corr time to boil Pot # 1	min		$\Delta t_c^T$		$\Delta t_h^T$	min	
Thermal efficiency	%		$\eta_c$		$\eta_h$	%	
Burning rate	g/min		$r_{cb}$		$r_{hb}$	g/min	
Specific fuel consumption	g/liter boiled		$SC_c$		$SC_h$	g/liter remaining	
Temp-corr sp consumption	g/liter		$SC_c^T$		$SC_h^T$	watts	
Temp-corr sp energy consumpt.	kJ/liter		$SE_c^T$		$SE_h^T$	Turn down ratio	-
Firepower	watts		$FP_c$		$FP_h$	Specific Energy Consumption	kJ/liter
						Fuel Benchmark to Complete 5L WBT	g
						Energy Benchmark to Complete 5L WBT	kJ

Emissions Calculation Method: Carbon Balance

**IWA PERFORMANCE METRICS**

		Data	Tier
High Power Thermal Efficiency	%		
Low Power Specific Fuel Consumption	MJ/(min-L)		
High Power CO	g/MJ		
Low Power CO	g/(min-L)		
High Power PM	mg/MJ		
Low Power PM	mg/(min-L)		
Indoor CO Emissions	g/min		
Indoor PM Emissions	mg/min		

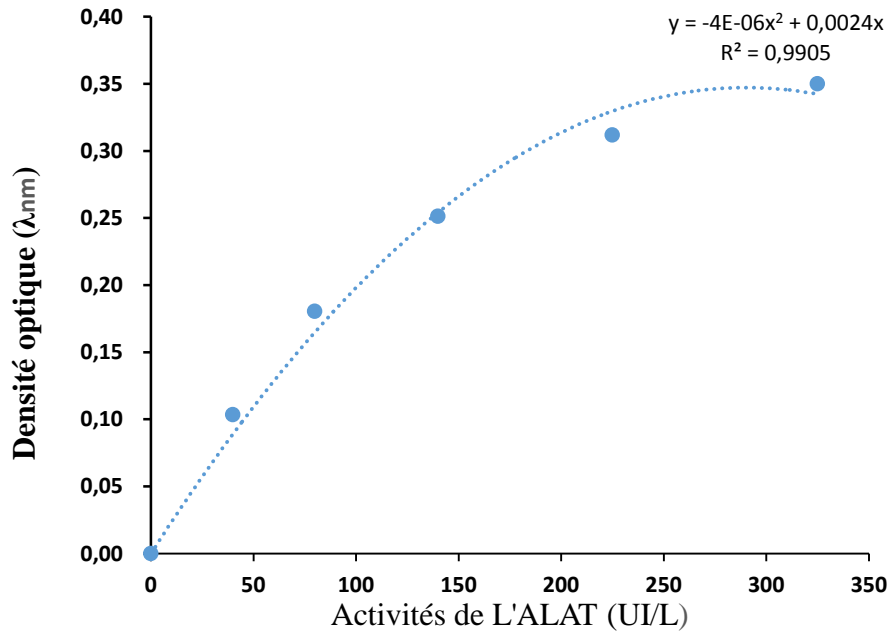
TEST #1

**Emission Report**

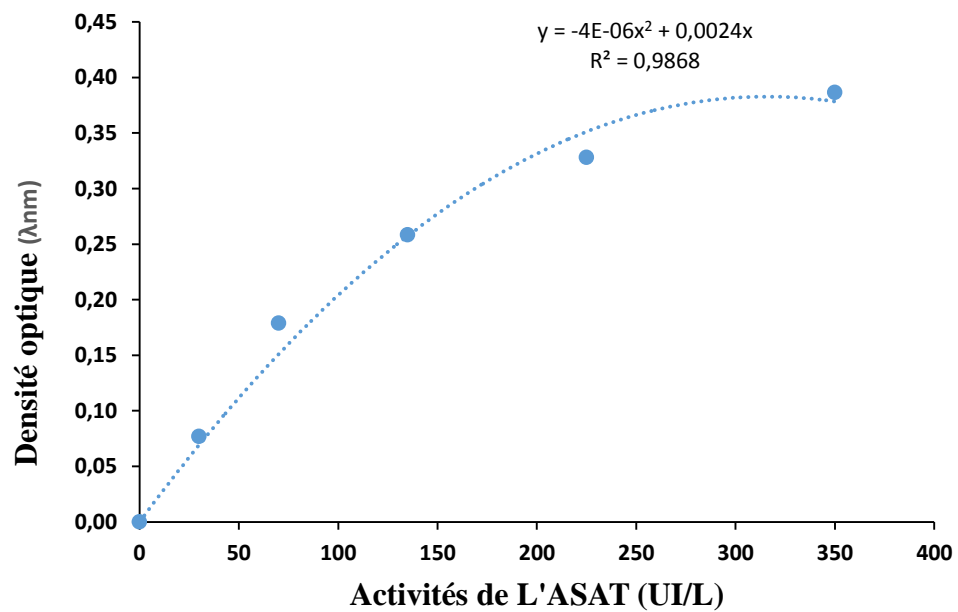
Calculations/Results	Units	C-COLD START		HOT START		SIMMER TEST	
		data	label	data	label	data	label
Total exhaust flow	m3		$V_c$		$V_h$		$V_s$
Exhaust carbon concentration	ppm		$CC_c$		$CC_h$		$CC_s$
Total carbon in exhaust	g/m3		$C_c$		$C_h$		$C_s$
Fuel consumed est. (dry)	g		$F_{c,d}$		$F_{h,d}$		$F_{s,d}$
Hood carbon balance	%		$CB_c$		$CB_h$		$CB_s$
<i>Emission per water boiled</i>							
CO2	g/liter		$E_{CO2,c}$		$E_{CO2,h}$		$E_{CO2,s}$
CO	g/liter		$E_{CO,c}$		$E_{CO,h}$		$E_{CO,s}$
PM	g/liter		$E_{PM,c}$		$E_{PM,h}$		$E_{PM,s}$
<i>Mass emission factors</i>							
CO2	g/kgf		$EF_{CO2,c}$		$EF_{CO2,h}$		$EF_{CO2,s}$
CO	g/kgf		$EF_{CO,c}$		$EF_{CO,h}$		$EF_{CO,s}$
PM	g/kgf		$EF_{PM,c}$		$EF_{PM,h}$		$EF_{PM,s}$
<i>Total Emissions (carbon balance)</i>							
CO2	g		$m_{CO2,c}$		$m_{CO2,h}$		$m_{CO2,s}$
CO	g		$m_{CO,c}$		$m_{CO,h}$		$m_{CO,s}$
PM	g		$m_{PM,c}$		$m_{PM,h}$		$m_{PM,s}$
<i>Total Emissions (total capture)</i>							
CO2	g		- $m_{CO2,c}$		- $m_{CO2,h}$		- $m_{CO2,s}$
CO	g		- $m_{CO,c}$		- $m_{CO,h}$		- $m_{CO,s}$
PM	g		- $m_{PM,c}$		- $m_{PM,h}$		- $m_{PM,s}$
<b>Emission benchmarks:</b>							
CO to Complete 5L WBT	g						BCO
PM to Complete 5L WBT	g						BPM

## Annexe 2 : Courbes d'étalonnage

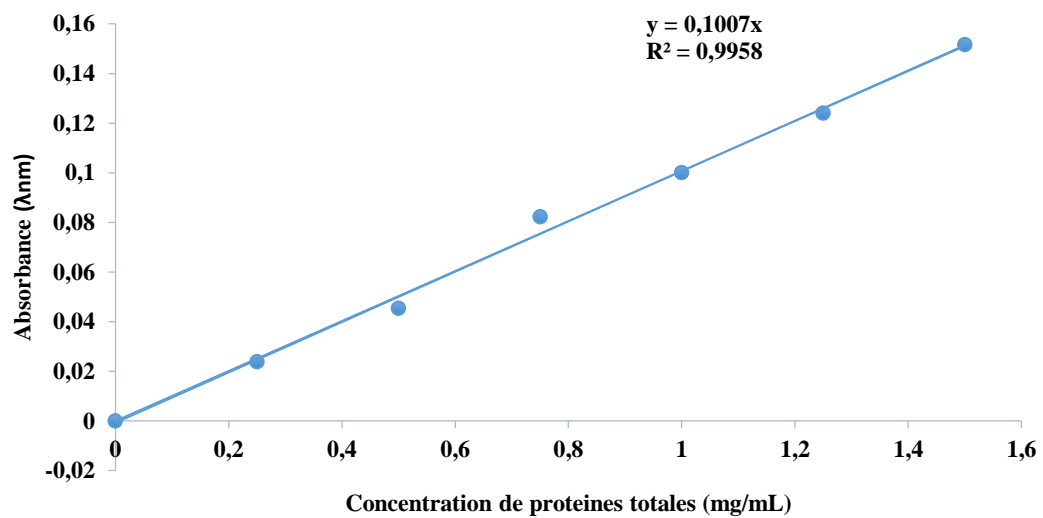
### Courbe d'étalonnage ALAT



### Courbe d'étalonnage ASAT



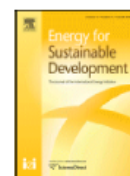
## Courbe d'étalonnage des protéines





### Annexe 3 : Liste des publications issues de la thèse

- S.A. Ndindeng, **J.E.G. Mbassi**, W.F.Mbacham, J.Manful, S. Graham-Acquaah, J. Moreira, J. Dossou, K. Futakuchi, (2015). Quality optimization in briquettes made from rice milling by-products, *Energy for Sustainable Development*, 29: 24 – 31.
- **Mbassi Josiane E. G.**, Ndindeng S. A., Achu Mercy B. L., Dimo Théophile, Mbacham Fon W. (2020). Evaluation of in vivo toxicity of rice husk used as fuel for cooking in households. *African Journal of Biochemistry Research*. Vol. 14(2), pp. 46-56, DOI: 10.5897/AJBR2020.1078
- **Mbassi Josiane E. G.**, Ndindeng S A., Achu Mercy B. L., Mbacham Fon W. Life cycle analysis of different rice husk gasifier cookstoves for rice cooking. Under revision for submission



## Quality optimization in briquettes made from rice milling by-products



S.A. Ndindeng<sup>a,\*</sup>, J.E.G. Mbassi<sup>b</sup>, W.F. Mbacham<sup>c</sup>, J. Manful<sup>a</sup>, S. Graham-Acquaah<sup>a</sup>, J. Moreira<sup>a</sup>, J. Dossou<sup>d</sup>, K. Futakuchi<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Africa Rice Center, 01BP 2031, Cotonou, Benin

<sup>b</sup> Institute of Agricultural Research for Development (IRAD), Yaoundé, Cameroon

<sup>c</sup> Faculty of Science, University of Yaoundé-I, Yaoundé, Cameroon

<sup>d</sup> Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Benin

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 30 November 2014

Revised 6 September 2015

Accepted 11 September 2015

Available online xxxxx

#### Keywords:

Rice husk

Husk–bran mixtures

Manual press

Briquettes

Burning characteristics

### ABSTRACT

In order to produce briquettes that meet the needs of consumers, different combinations of raw materials and methods were used to produce rice-husk briquettes using a locally fabricated multi-piston press. Particle size, husk–bran ratio, drying method, and water temperature for briquetting were the main influencers of the hardness of rice-husk briquettes at constant pressure. The briquetting process increased the density of rice husk from 120 to 600 kg/m<sup>3</sup>. The average time for making nine briquettes (loading, compressing, ejection, and transfer to drying tray) was 3.6 min (150 briquettes/h) using the locally fabricated piston press. Briquettes produced using fine particles (<0.3 mm), hot (97 °C) water, husk–bran ratios of 0:1, 1:2, 1:1, 1:0, 2:1, and dried in the sun for 21 days had mean hardness values of 132, 89, 76, 62, and 31 N. Four types of fuel briquettes were produced: husk–bran–palm press fiber (HBF), husk–bran–palm press sludge (HBS), husk–bran only (HBO), and husk–biochar–clay (HBC). The four types of briquettes recorded shorter start-up time (<5 min) than charcoal (10 min). The average flame temperatures of HBF, HBS, and HBO during the first 20 min were higher (898 °C) than the average temperature of charcoal (546 °C). The characteristics of HBF and HBO briquettes provide the best option for consumers, especially those in the rice parboiling industry, as these briquettes recorded the following values for hardness (170 and 101 N, respectively), start-up time (2 and 3 min), burning rate (126 and 145 g/min), specific fuel consumption (121 and 136 g/l), and flame temperature (684 °C and 728 °C). It was concluded that briquettes could be produced from rice-milling by-products with acceptable quality using this affordable technology.

© 2015 International Energy Initiative. Published by Elsevier Inc. All rights reserved.

### Introduction

Rice (*Oryza* spp.) is an important source of calories in sub-Saharan Africa (SSA) and production is likely to increase to satisfy the ever-increasing demand. In 2014, SSA produced about 22.1 million tonnes (Mt) of paddy, equivalent to 4.6% of the world's production (IRRI, 2015). On average, paddy consists of 72% rice, 5%–8% bran, and 20%–22% husk (Prasad et al., 2001). Thus, the milling of 22.1 Mt of paddy will generate about 4.8 Mt of husk. Since the 2007–2008 food crisis, African governments and their development partners have established programs for increasing rice production with an expected increase in rice milling by-products.

The generation of revenue from rice-milling by-products is very low in SSA. Although rice bran is highly nutritive (Saunders and Betschart, 1979; Amissah et al., 2003), this by-product is mainly used in SSA only as an ingredient in the production of livestock feed. However, when bran is mixed with husk, as is the case when rice is milled in Engelberg type mills, the use of this product as a livestock feed is not desirable due to the high amount of silica in husk (So et al., 2008). Studies have demonstrated the potential of using rice bran in the production of useful chemicals (Li et al., 2012), oil (Rohman, 2014), biodiesel (Saravanan et al., 2007; Lin et al., 2009; Gunawan et al., 2011), soluble fiber (Wan et al., 2012), phenolic compounds (Pourali et al., 2010), activated carbon (Suzuki et al., 2007), and beverages (Faccin et al., 2009). Unlike bran, the majority of rice husk produced in SSA is disposed of by burning in open fields or abandoned behind rice milling facilities. This pollutes the air and land, and generates greenhouse gases such as methane (CH<sub>4</sub>), nitrous oxide (N<sub>2</sub>O), and unburnt carbon (Lim et al., 2012a; Mai Thao et al., 2011). Very few of the technologies that add value to rice husk have been tested in SSA. These include the use of rice husk as biofuel for the generation of heat and electricity (Sookkumnerd et al., 2005; Goyal et al., 2008; Lim et al., 2012a), biosorption of heavy metals from

Abbreviations: ASTM, American Society for Testing and Materials; GLM, generalized linear model; HBC, husk–biochar–clay; HBF, husk–bran–palm press fiber; HBO, husk–bran only; HBS, husk–bran–palm press sludge; HHV, higher heating value; RHA, rice-husk ash; WBT, Water Boiling Test.

\* Corresponding author. Tel.: +229 66077113 or +237 676484705; fax: +229 64227809.

E-mail address: S.Ndindeng@cgiar.org (S.A. Ndindeng).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2015.09.003>

0973-0826/© 2015 International Energy Initiative. Published by Elsevier Inc. All rights reserved.

single and mixed metal solutions (Krishnani et al., 2008; El-Shafey, 2010), vermicomposting for the production of organic fertilizer (Lim et al., 2012b), as animal feed after physical, chemical, or biological treatment (Vadiveloo et al., 2009), and as a support for solid-state fermentation (Kapilan and Arasaratnam, 2011). Rice husk ash (RHA), a product of rice-husk combustion, is useful as a material for building and construction (Khan et al., 2012; Yuzer et al., 2013), glass ceramic tiles and whiteware (Prasad et al., 2001; Andreola et al., 2013), reinforcement of aluminum alloy (Saravanan and Senthil Kumar, 2013), production of silica powder, activated carbon, and carbon-silica composite (Kumagai and Sasaki, 2009; An et al., 2011).

Fuelwood and farm residues are the most common cooking fuels in SSA, representing 74% and 12%, respectively, of the total fuel used. Firewood collection places a substantial time and labor burden on families, particularly women, and can place additional pressure on local forest resources, particularly in places where wood is scarce (Adkins et al., 2012). In communities where fuelwood is scarce, the use of rice husks to generate heat for households and the local artisanal food-processing industry will be a suitable alternative. In addition, the use of rice husk may serve as a first step toward valorizing the huge quantities of this rice-milling by-product.

Thermochemical conversion of rice husk to produce heat energy can be achieved via direct combustion, gasification, and pyrolysis (Lim et al., 2012a). High-tech systems exist for each of these processes, but their adoption and sustainability among smallholder processors in SSA remain to be seen. Small-scale rice-husk gasifier stoves—especially affordable ones that burn efficiently with a continuous fuel recharging system—appear to be promising in SSA. Rice-husk gasifier stoves will be more useful for households in the vicinity of rice milling facilities (Parmigiani et al., 2014), since the high volatility and low density of rice husk (120 kg/m<sup>3</sup>) can cause challenges in handling and transportation. For households that are not within the vicinity of rice milling facilities or factories that may require husk or husk-bran mixtures as raw materials, these challenges can be overcome by densification (briquetting or pelleting) at husk production sites. In addition, it may be useful to convert the char produced from the gasification process into briquettes for use as clean fuel.

Briquetting technologies, such as the heated die screw press briquetting (Toan et al., 2000; Ahiduzzaman and Islam, 2013) and single piston and die press (Chin and Siddiqui, 2000; Bhattacharya et al., 2002), and the subsequent use of briquettes as fuel is common in China, India, Taiwan, Thailand, and Vietnam. Although massive investments have been made in briquetting in SSA, very few commercial success stories have been documented (Mwampamba et al., 2013). The quality, availability, convenience, and price of briquettes appear to be major factors hindering widespread adoption of briquetting technologies in the region. In addition, dependency on importation of equipment, spare parts, and after-sales service limits the scale at which briquetting production can occur and, to a large extent, explains why there are few briquetting factories in the region (Grover et al., 1994; Mwampamba et al., 2013).

Although the potential to use briquettes as fuel in SSA is high, the low price of fuelwood, punitive legal and fiscal requirements for briquette producers, and supply-driven approaches to industry development have limited the growth of fuel briquettes in the region (Mwampamba et al., 2013). Consumers prefer briquettes that are sufficiently hard with good burning characteristics (low moisture content, easy to light, high burning rate, low specific fuel consumption, low ash content, high flame temperature, and long burning time). Briquettes currently sold in SSA are hard to light, slow to burn, crumble easily when put out, and require additional ventilation of the stoves (Mwampamba et al., 2013). The production of briquettes of acceptable quality from rice-milling by-products at rice milling sites using affordable technologies is crucial to adding value to rice husk or husk-bran mixtures in SSA. Production of briquettes from rice husk or husk-bran mixtures with sufficient hardness and acceptable burning properties

is a big problem, especially when using low-cost equipment. This paper presents the production and analysis of briquettes using different combinations of materials, methods, and low-cost equipment with the hope of getting briquettes with optimum performance (hardness and burning characteristics).

## Material and methods

### Construction of the briquetting machine

A multi-piston briquetting hydraulic press with nine cylinders was constructed at the Africa Rice Center (AfricaRice), Cotonou, Benin. All materials used for construction were acquired from local vendors.

The total pressure ( $P$ ) and pressure exerted on each briquette ( $P_c$ ) were derived from Eq. (1) which was subsequently used to develop Eqs. (2) and (3).

$$P = \frac{F}{S} \quad (1)$$

$$P = \frac{4F}{\pi(D^2 - d^2)} \quad (2)$$

$$P_c = \frac{P}{9} \quad (3)$$

where  $F$  is force in newtons,  $S$  is total surface area in square meters,  $D$  is the diameter of the cylinder in millimeters,  $d$  is the diameter of the central rod in the cylinder in millimeters, and 9 is the number of cylinder and piston systems per machine.

### Biomass

Two types of rice residues produced in SSA were used in this study: pure husk from rubber-roll type mills and husk-bran mixtures from Engelberg type mills (Ndindeng et al., 2014). The bulk density of husk was 120 kg/m<sup>3</sup>, and its moisture content was 12.6%.

### Sample preparation

Separate rice husk and bran from rubber-roll type mills were collected from the AfricaRice Grain Quality and Postharvest Unit. The husk and bran were ground separately using a commercial hammer mill (Songhai Center, Porto Novo, Benin) to reduce the size of the particles. Each sample was separated into three particle sizes (large = particle sizes  $\geq 1$  mm; medium = 0.301–0.99 mm; fine  $\leq 0.300$  mm) using mesh 18 and mesh 50. The samples were first sieved with mesh 18 and then with mesh 50. Particles remaining in sieve mesh 18 were large, while those that remained in sieve mesh 50 were of medium size, and those that passed through sieve mesh 50 were the fine particles. Husk-bran mixtures were also ground and sieved with sieve mesh 18 to get a mixture of fine and medium-sized particles.

### Production of briquettes

#### Description of the briquetting machine

The main components of the rice-husk briquetter (Fig. 1) are a frame assembly that holds together a hydraulic jack, plates, and a system of cylinders and pistons. The force generated by the jack drives the pistons sitting on the vertical mobile plate through the cylinders and compresses the biomass in the cylinders against the horizontal mobile plate. When the material to be briquetted is put in the cylinders, the upward-moving piston compresses the material against the horizontal mobile plate. When the material is fully compressed, the pressure on the horizontal mobile plate is eased by slightly releasing the force applied by the jack using the force-easing key. This action allows the

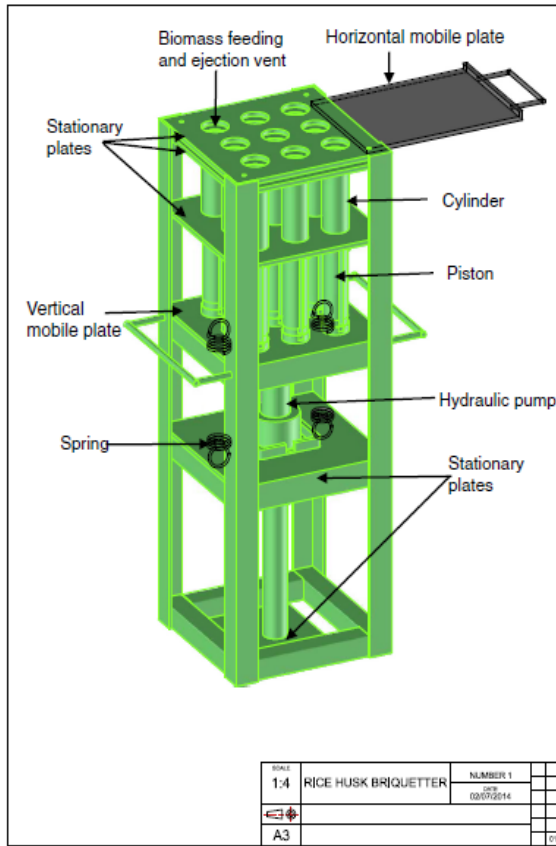


Fig. 1. Technical drawing for rice-husk briquetter.

horizontal mobile plate to be removed by sliding it out. The jack is then pumped upward to release the briquettes. The briquettes at this stage are soft and need to be dried to harden them. This upward collection method allows the briquettes that are held in that position by the pistons to be easily and safely removed and placed on drying boards. The force produced by the jack is then completely released using the force-easing key and the springs pull the pistons downward in preparation for loading the next batch of briquetting material. The complete technical drawings of the briquetter are provided as Supplementary information.

*Optimization of briquette hardness*

The aim of the optimization process was to get briquettes that were hard enough to withstand transportation. Four experiments were performed to determine the best husk–bran ratio, drying method, particle sizes, and water temperature for briquetting. For each of these experiments, variable classes and fixed factors were selected (Table 1a). For each variable class, two machines were used and two replications were done giving a total of 36 briquettes per class. The mixture to be introduced into the briquetting machine was prepared by adding water to the biomass in the ratio of 3:5 weight basis and then homogenized. When required, heated water was used to raise the temperature of the mixture to 97 °C. Fifty (50) grams of the mix was placed in each biomass-feeding vent and the same amount of pressure (7.74 MPa) was applied to compress the biomass. To ensure that the same pressure was applied to all the briquettes, the same quantity of biomass was fed into the vents and the piston was made to travel an optimum predetermined fixed distance. The briquettes were then ejected after a holding time of 30 s and dried to a moisture content of 20%.

Table 1a  
Sequential optimization of the hardness of briquette.

Factor being optimized	Class variables	Fixed factors			
Husk-bran ratio	Husk-bran ratio	Particle size	Water temperature for briquetting	Drying method	
	1:1	Fine	97 °C	Sun only	
	1:2	Fine	97 °C	Sun only	
	1:0	Fine	97 °C	Sun only	
	0:1	Fine	97 °C	Sun only	
Drying method	Particle size	Water temperature for briquetting	Husk-bran ratio	Drying method	
				Sun only	
				Sun and oven	
				Sun only	
				Sun only	
Particle size	Particle size	Water temperature for briquetting	Husk-bran ratio	Drying method	
				Sun only	
				Sun only	
				Sun only	
Water temperature for briquetting	Water temperature for briquetting	Husk-bran ratio	Drying method	Particle size	
				Fine	
				Sun only	
				Sun only	

*Production of fuel briquettes from rice-milling by-products*

Four types of fuel briquettes—husk–bran only (HBO), husk–bran–palm press fiber (HBF), husk–bran–palm press sludge (HBS), and husk–biochar–clay (HBC)—were produced for this set of experiments (Table 1b). The husk–bran mixture used for this experiment was collected from Engelberg type mills in Glazoué, Benin. These mills do not produce separate bran and husk, rather the husk and bran are coarsely ground during the rice milling process, making it impossible to separate the husk and bran. Palm press fiber and palm press sludge were collected from a local artisanal palm oil extraction company. Palm press waste is used as a fire-lighting material in rural communities in SSA and was added to the fuel briquette formulation to improve ignition and burning characteristics. Husk biochar was a waste product from husk gasifier stoves. For HBF and HBS briquettes, 0.5 kg of palm press fiber or palm press sludge were added to husk–bran mixtures (4.5 kg) of particle sizes ≤ 0.99 mm (medium and fine) and then homogenized. HBC briquettes were produced by adding 0.5 kg of fine clay to 4.5 kg of rice biochar, followed by thorough mixing. Water (3 L) at ambient temperature was then added and the mixtures homogenized by hand mixing. The optimum quantity of palm press fiber, palm press sludge, and clay for the production of HBF, HBS, and HBC briquettes had been predetermined (data not shown). For each briquette mix, two machines were used and two replications were done giving a total of 36 briquettes per briquette type. Two hundred (200) grams of the mix was placed in each biomass-feeding vent and the same amount of pressure (7.74 MPa) applied to compress the biomass. The briquettes were then ejected after a holding time of 30 s and dried for 21 days.

Table 1b  
Production of different types of fuel briquettes from rice-milling by-products using water at 27 °C, particle size ≤ 0.9 mm, and sun drying.

Briquette type	Rice by-product	Binder
HBF	Husk–bran mixture from Engelberg type mill	Palm press fiber
HBS	Husk–bran mixture from Engelberg type mill	Palm press sludge
HBO	Husk–bran mixture from Engelberg type mill	
HBC	Husk biochar from husk gasification	Clay

HBF = rice husk–bran–palm press fiber; HBS = rice husk–bran–palm press sludge; HBO = rice husk–bran only; HBC = rice husk char.

#### Determination of moisture content during drying

The moisture content was determined on wet weight basis. The weight of briquettes was recorded daily for 7 days for samples dried in the oven and for 21 days for samples dried under ambient conditions (temperature = 16 °C–34 °C; relative humidity = 41%–100%). The daily moisture content of the sample was calculated as shown in Eq. (4).

$$Mc = \frac{Mo - Mt}{Mt} \times 100 \quad (4)$$

where  $Mc$  is the percent moisture content,  $Mo$  is the mass immediately after briquette is ejected from machine, and  $Mt$  is the mass of the briquette after drying for time  $t$ .

#### Determination of hardness of briquettes

The hardness of the briquettes was determined with a Kiya hardness tester (Fujirara Seisakusho, Ltd., Tokyo, Japan). The hardness of a briquette was the force required to break a briquette that was 20 mm thick using a 5 mm diameter plunger. The hardness of the briquettes was determined at a moisture content of 20%, usually after 7 days for samples dried in the oven and 21 days for samples dried under ambient conditions.

#### Determination of densification factor of rice-husk briquettes

Two (2) types of rice husk were used to produce briquettes for this experiment (husk-only and husk-biochar). Husk-only was either fine ( $\leq 0.300$  mm) or a mixture of fine and medium ( $\leq 0.99$  mm). An equal weight of rice husk or rice husk-biochar was placed in a measuring cylinder, shaken to remove voids, and the volume measured.

The length, diameter, and height of the briquette were measured using vernier calipers. The density of the briquette and husk were determined from Eqs. (5) and (6), respectively.

$$\text{Density of briquette}(D_b) = \frac{M_b}{\pi h(r_1^2 - r_2^2)} \quad (5)$$

$$\text{Density of husk}(D_h) = \frac{M_h}{V_h} \quad (6)$$

where  $D_b$  is the density of the briquette,  $D_h$  is the density of the husk,  $M_b$  is the mass of the briquette,  $M_h$  the mass of husk,  $V_h$  the volume of husk,  $h$  the height of the briquette,  $r_1$  the radius of the briquette, and  $r_2$  the radius of the orifice in the briquette.

The densification factor was then estimated using Eq. (7).

$$\text{Densification factor}(d) = \frac{D_b}{D_h} \quad (7)$$

#### Durability of briquettes

The drop resistance test (Al-Widyan and Al-Jalil, 2001) was used to determine the durability of the husk briquettes. For this test, briquettes were produced using particle sizes  $\leq 0.9$  mm, hot water (97 °C), husk-bran ratios of 1:1, 1:2, 2:1, and sun-dried for 21 days. Briquettes were dropped from a height of 1.85 m onto a metal plate four times. The final weight as a percentage of the initial weight was taken as the briquette durability.

#### Characterization of fuel briquettes from rice-milling by-products

The moisture content of the fuels was determined after drying for 24 h in an oven (Fisher Scientific 750 F, USA) at 104 °C based on the ASABE Standard S358.2 (ASABE, 2006). Total lipid and ash content

were estimated according to AOAC methods (AOAC International, 2002). A bomb calorimeter (Parr Oxygen Bomb 1341 EB, Calorimeter Thermometer 6772, IL, USA) was used to measure the higher heating value (HHV) according to the American Society for Testing and Materials (ASTM) standard D5865-11a (ASTM, 2010). The start-up time of the fire was the time that elapsed for the flame temperature to reach 400 °C after lighting. The burning rate and specific fuel consumption were determined during the cold-start high-power phase of the Water Boiling Test (WBT) protocol version 4.2.2 (Bailis et al., 2003) with slight modifications. The modification was on the volume of water used (10 L) and the local boiling point (99 °C). The stove used was a SALMAR briquette-charcoal stove. Charcoal was used as the reference fuel. The amount of fuel used for each test was 4 kg and each test was carried out in triplicate. The data were entered in the WBT data calculation sheet version 4.2.2 (Aprovecho Research Center, 2013).

The burning rate measured the average number of grams of fuel burned per minute during the test, while the specific fuel consumption measured the amount of fuel required to boil 1 L of water. For each fuel type, the flame temperature was determined by burning 4 kg of fuel in the SALMAR briquette-charcoal stove and the flame temperature recorded every 5 min for 55 min using a traceable double thermometer (VWR-USA) equipped with thermal probes that can withstand up to 1200 °C.

#### Statistical analysis

Data obtained were analyzed using the Statistical Package for Social Sciences version 10.1.4 (SPSS, 2002) at a 5% significance level. The generalized linear model-univariate (GLM-Univariate) analysis was used to study the effect of husk-bran ratio, drying method, particle size, and water temperature for briquetting on the hardness of briquettes. The marginal estimated mean hardness for each class is reported. The means were further compared using the multiple comparison tests (LSD). The characteristics of the different types of fuel tested were compared using LSD. Pearson's correlation was used to determine the relationship between different briquette characteristics. Graphs were produced for flame temperature against time for the different types of fuel tested.

## Results and discussion

#### Briquette production rate and briquette densities

The rate of briquette production depends on the time it takes to load the biomass and the time to fully compress the material. The average time for making nine briquettes (loading, compressing, ejection, and transfer to drying tray) was 3.6 min (150 briquettes/h). The compression and ejection time was significantly reduced from 55 to 18 s when the Stargold hydraulic jack was replaced with a Yale hydraulic jack. When the Stargold jack was used, the machine compressed and ejected 47.12 kg briquettes/day (589 briquettes at 11.4% moisture content), compared with 144 kg briquettes/day (1800 briquettes) when the Yale hydraulic jack was used. Conventional briquette making requires about 0.25 kWh/kg of briquettes to generate heat during the briquette-making process (Toan et al., 2000). In the heated die screw briquetting press (Ahiduzzaman and Islam, 2013), 77 kg/h was used to yield a gross output of 88 kg/h; resulting in a net output of 11 kg/h. However, this was a high input of briquettes for the net production. The operation of the multi-piston briquetting machine described in this paper is completely manual after grinding and a single person produced at least 12 kg of briquettes/h at 11.4% moisture content.

The briquetting technology increased the density of rice husk from 120 kg/m<sup>3</sup> to 600 kg/m<sup>3</sup> when the holding time was 30 s. Chin and Siddiqui (2000) demonstrated that holding time in the range of 20–40 s produced briquettes with the least percentage relaxation with time. The density of the briquettes was within the optimal

range of biomass products after densification (600–800 kg/m<sup>3</sup>) (Lim et al., 2012a) since this is directly related to the energy–volume ratio (Maiti et al., 2006). The densification factors for husk of fine and medium particle sizes were 1.51 and 1.50, respectively. These values were significantly lower than for husk biochar (5.91) because the husk biochar briquetting resulted in complete grinding of the carbonized husk into very fine particles.

*Effects of particle size, husk–bran ratio, drying method, and water temperature for briquetting on the hardness of briquettes*

Particle size, husk–bran ratio, drying method, and water temperature for the preparation of the biomass mix all influenced the hardness of rice-husk briquettes (Table 2). Briquettes were produced using fine and medium-sized particles, as large-particle briquettes crumbled when they were ejected from the machine due to the elastic nature of the husk. Particle size is an important factor affecting the durability of briquettes. Generally, the finer the particle size, the greater the durability. Fine particles usually absorb more moisture than large particles and, therefore, undergo a higher degree of conditioning (Kaliyan and Morey, 2009). In this study, the hardness of briquettes correlated positively with their durability ( $R^2 = 0.55$ ;  $P = 0.0001$ ).

Briquettes produced using fine particles were harder than those from medium-sized particles ( $P < 0.001$ ). In addition, the density was higher for fine (605 kg/m<sup>3</sup>) than for medium-sized particles (506 kg/m<sup>3</sup>). These findings agree with previous work on *Miscanthus* and refuse-derived fuel, for which Ryu et al. (2006) showed that particle size influenced the density of briquettes since smaller particles resulted in more dense packing of particles at constant pressure. Briquettes produced using fine particles (<0.3 mm), hot (97 °C) water, husk–bran ratios of 0:1, 1:2, 1:1, 1:0, 2:1, and dried in the sun for 21 days had calculated mean hardness values of 132, 89, 76, 62, and 31 N. Rice bran has been used as binder for briquetting (Chuo et al., 2009) and the higher the proportion of the binder, the harder the briquettes. In this study, briquettes produced from bran only (0:1) were the hardest, while those produced with 2:1 husk–bran ratio were the softest (Table 3). Using large quantities of pure bran as binder may not be advisable as this product is a valued animal feed.

In this study, briquettes dried under ambient conditions were harder than those dried at 70 °C (oven) only or first dried at 70 °C and then under ambient conditions ( $P < 0.01$ ). The rate of moisture loss was greater for samples dried in the oven (moisture was 20% after 2 days of drying) than for those dried under ambient conditions (moisture was 20% after 7 days of drying). These results suggest that a faster rate of moisture loss may reduce the ability of the particles to bind effectively during drying (Kaliyan and Morey, 2009). Briquettes were produced

**Table 2**  
Main and interacting effect of factors that affect the hardness of rice-husk briquettes at constant pressure.

Term	F-value
Model	106.3****
Husk–bran ratio (HBR)	66.0***
Particle size (PS)	40.6***
Water temperature (WT)	12.1**
Drying method (DM)	6.3**
HBR × PS	0.5
HBR × WT	3.3*
HBR × DM	2.8*
PS × WT	9.1*
PS × DM	4.3*
WT × DM	4.4*
HBR × PS × WT	ns
PS × WT × DM	ns
HBR × PS × DM	ns
HBR × PS × DWT × DM	ns
R-square	0.87

\*\*\*  $P < 0.001$ ; \*\*  $P < 0.01$ ; \*  $P < 0.05$ .

**Table 3**  
Effects of factor combinations on the hardness of rice-husk briquettes.

Husk–bran ratio	Particle size	Water temperature (°C)	Drying method	Estimated mean hardness (N)
2:1	Fine	97	Oven + sun	24
			Sun	31
			Oven	4
	Medium	27	Oven + sun	8
			Sun	16
			Oven	55
1:2	Fine	97	Oven + sun	86
			Sun	89
			Oven	31
	Medium	27	Oven	30
			Oven + sun	63
			Oven	42
1:1	Fine	97	Oven + sun	64
			Sun	76
			Oven	09
	Medium	97	Oven + sun	03
			Sun	34
			Oven	41
	Fine	27	Oven + sun	14
			Sun	23
			Oven	35
1:0	Fine	97	Sun	62
			Oven	01
			Oven	01
0:1	Fine	97	Sun	132
			Oven	38

with both hot and cold water, and those produced using hot water were harder than those with cold water ( $P < 0.01$ ). Nonetheless, briquettes produced using water at ambient temperature and husk–bran mixtures of fine and medium-sized particles from Engelberg mills were sufficiently hard (101 N). This suggested that heating water for the production of briquettes from husk–bran mixtures from Engelberg type mills was not necessary. Hot water gave much harder briquettes probably due to the gelatinization of the starch in bran (20%) (Saunders and Betschart, 1979).

*Characteristics of fuel briquettes made from husk–bran mixtures from Engelberg type mills and rice-husk char*

The four types of fuel briquettes—HBF, HBS, HBO, and HBC—produced in this study are shown in Fig. 2a. Briquettes made using husk–bran mixtures collected from Engelberg type mills and mixed with different palm press waste showed differences in hardness ( $P < 0.05$ ) (Table 4). HBF briquettes were the hardest (170 N), followed by HBO (101 N), while HBS and HBC were the softest (20 and 21 N, respectively), although they were all produced using water at ambient temperature (27 °C). Palm press fiber contributed to the hardness of HBF by increasing mechanical interlocking. High lipid content recorded in HBS briquettes may have played a role in reducing the forces of attractive, interlocking, cohesiveness, and adhesiveness (Manickam et al., 2006) in these briquettes and thus reduced their hardness. Although it was possible to make very hard HBC briquettes with higher-quantity clay, these briquettes showed poor burning characteristics (data not shown).

The briquettes burned well in two natural draft stoves: a Salmar briquette–charcoal stove and an improved rocket stove previously developed for rice parboiling in SSA (Ndindeng et al., in press) (Fig. 2b).

HBF, HBS, HBO, and HBC briquettes had shorter start-off times (<5 min) than charcoal (10 min). Briquettes produced in SSA have been rated as hard to light compared to charcoal (Mwampamba et al., 2013), thus the briquetting technology described in this paper provides an opportunity for the production of briquettes that are easy to light and start a fire.

HBF, HBS, and HBO briquettes burned with a yellow flame, while HBC burned with a mixture of blue and red flames as did charcoal.



Fig. 2. (a) Different types of briquettes produced from husk-bran mixtures from Engelberg type mills and rice husk char; (b) burning of rice-husk briquettes in rocket and Salmar briquette-charcoal stoves.

HBF, HBS, and HBO briquettes produced some smoke especially when ventilation in the combustion chamber was poor (data not shown). HBO briquettes had the highest burning rate (145 g/min), while HBC briquettes had the lowest burning rate (67 g/min). Charcoal, HBS, and HBF briquettes had similar burning rates—120, 109, and 126 g/min, respectively. The briquettes produced crumbled when the fire was put out and so could not be re-used. This is a common problem in the briquetting industry worldwide (Mwampamba et al., 2013). HBC briquettes had the highest specific fuel consumption (701 g/l), while HBS briquettes had the lowest. HBC briquettes also recorded the largest ash content and the lowest calorific value. A positive correlation was observed between the ash content and specific fuel consumption ( $R^2 = 0.917$ ;  $P = 0.0001$ ), while negative correlations were observed between the ash content and the calorific value, lipid content, and burning rate ( $R^2 = -0.65$ ,  $P = 0.05$ ;  $R^2 = -0.845$ ,  $P = 0.001$ ; and  $R^2 = -0.781$ ,  $P = 0.001$ , respectively) for the different types of fuel briquettes produced. The calorific values of HBF, HBS, and HBO briquettes were 18.47, 19.23, and 16.87 MJ/kg, respectively. These values are lower than the range reported for charcoal briquettes produced elsewhere (22–29 MJ/kg) (Mwampamba et al., 2013).

Briquettes made from husk-bran mixtures had flame temperatures above 800 °C after ~4–5 min of combustion in the Salmar briquette-charcoal stove (Fig. 3). This temperature stayed above 700 °C between 18 and 48 min of combustion and then started to drop. This drop in flame temperature coincided with the depletion of fuel biomass and an increase in the quantity of ash produced. For HBC briquettes, the maximum flame temperature (650 °C) was recorded after 20 min of combustion, but it stabilized and stayed above 490 °C until after 55 min. The flame temperature for charcoal started very low but peaked at 930 °C after 30 min, remaining above 800 °C even after 55 min. The average flame temperature over the 55 min burning time was not significantly different among the different fuel types tested ( $P > 0.05$ ; Table 3). After loading the stove with 4 kg of fuel, briquettes made from husk-bran mixtures took 9 min to boil 10 L of water, while charcoal took 142 min. Briquettes made from rice-husk char boiled 5 L of water, but were unable to boil 10 L of water even after 1 h (data not shown).

These results indicate that HBF, HBS, and HBO are suitable for cooking operations that require high heat intensities from the onset of cooking, such as for boiling water during paddy soaking and steaming in the rice parboiling industry.

Table 4

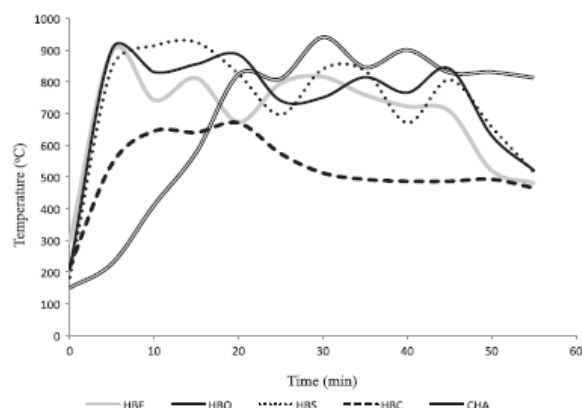
Characteristics of fuel briquettes from rice-milling by-products and palm press waste burnt in a Salmar briquette-charcoal stove in comparison with charcoal. HBF = rice husk-bran-palm press fiber; HBS = rice husk-bran-palm press sludge; HBO = rice husk-bran only; HBC = rice husk char; CHA = charcoal; ND = not determined.

Fuel type	Hardness (N)	Lipid content (g/100 g)	Higher heating value (MJ/kg)	Ash content (g/100 g)	Start-up time (min)	Burning rate at cold start high power (g/min)	Specific fuel consumption at high power (g/liter of water boiled)	Flame temperature (°C) during a period of 55 min
HBF	170 ± 3 <sup>a*</sup>	04.11 ± 0.13 <sup>b</sup>	18.47 ± 0.04 <sup>b</sup>	19.79 ± 0.25 <sup>c</sup>	2 <sup>b</sup>	126 ± 8 <sup>b</sup>	121 ± 07 <sup>d</sup>	684.3 ± 163.4 <sup>a</sup>
HBS	20 ± 0.3 <sup>c</sup>	10.58 ± 0.01 <sup>a</sup>	19.23 ± 1.67 <sup>b</sup>	17.64 ± 0.00 <sup>e</sup>	3 <sup>b</sup>	109 ± 6 <sup>c</sup>	107 ± 06 <sup>e</sup>	725.5 ± 199.5 <sup>a</sup>
HBO	101 ± 2 <sup>b</sup>	02.27 ± 0.04 <sup>b</sup>	16.87 ± 1.63 <sup>b</sup>	21.33 ± 0.06 <sup>b</sup>	3 <sup>b</sup>	145 ± 8 <sup>a</sup>	136 ± 09 <sup>c</sup>	728.5 ± 188.1 <sup>a</sup>
HBC	21 ± 0.9 <sup>c</sup>	0.250 ± 0.02 <sup>c</sup>	09.66 ± 1.02 <sup>c</sup>	68.80 ± 1.17 <sup>a</sup>	4 <sup>b</sup>	67 ± 8 <sup>d</sup>	701 ± 07 <sup>a</sup>	518.0 ± 113.5 <sup>a</sup>
Charcoal	ND	ND	31.14 ± 2.14 <sup>a</sup>	03.51 ± 0.91 <sup>d</sup>	10 <sup>a</sup>	120 ± 6 <sup>b,c</sup>	195 ± 15 <sup>b</sup>	679.5 ± 260.1 <sup>a</sup>

\*Means with different superscript letters implies least significant difference at the 0.05 level of significance using the multiple comparison test.

- Lim JS, Abdul Manan Z, Wan Alwi SR, Hashim H. A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Renew Sustain Energy Rev* 2012a; 16(5):3084–94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.051>.
- Lim SL, Wu TY, Sim EYS, Lim PN, Clarke C. Biotransformation of rice husk into organic fertilizer through vermicomposting. *Ecol Eng* 2012b; 41:60–4. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoeng.2012.01.011>.
- Lin L, Ying D, Chaitep S, Vittayapadung S. Biodiesel production from crude rice bran oil and properties as fuel. *Appl Energy* 2009; 86(5):681–8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.06.002>.
- Mai Thao PT, Kurisu KH, Hanaki K. Greenhouse gas emission mitigation potential of rice husks for An Giang province, Vietnam. *Biomass Bioenerg* 2011; 35(8):3656–66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.05.023>.
- Maiti S, Dey S, Purakayastha S, Ghosh B. Physical and thermochemical characterization of rice husk char as a potential biomass energy source. *Bioresour Technol* 2006; 97(16): 2065–70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2005.10.005>.
- Manickam IN, Ravindran D, Subramanian P. Biomass densification methods and mechanism. *Cogeneration & Distrib Generation J* 2006; 21(4):33–45. <http://dx.doi.org/10.1080/15453660609509098>.
- Mwampamba TH, Owen M, Pigaht M. Opportunities, challenges and way forward for the charcoal briquette industry in sub-Saharan Africa. *Energy Sustain Dev* 2013; 17(2): 158–70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2012.10.006>.
- Ndingeng SA, Mapiemfu DL, Fantong W, Nchinda VP, Ambang Z, Manful JT. Postharvest adaptation strategies to the effects of temperature variations and farmer-miller practices on the physical quality of rice in Cameroon. *Am J Clim Chang* 2014; 3:178–92. <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.32017>.
- Ndingeng SA, Manful J, Futa-kuchi K, Mapiemfu DL, Akoa-Etoa JM, Tang EN, et al. Upgrading the quality of Africa's rice: a novel artisanal parboiling technology for rice processors in sub-Saharan Africa. *Food Sci Nutr* 2015. <http://dx.doi.org/10.1002/fsn3.242>. [in press].
- Parmigiani SP, Vitali F, Lezzi AM, Vaccari M. Design and performance assessment of a rice husk fueled stove for household cooking in a typical sub-Saharan setting. *Energy Sustain Dev* 2014; 23:15–24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2014.01.003>.
- Pourali O, Asghari FS, Yoshida H. Production of phenolic compounds from rice bran biomass under subcritical water conditions. *Chem Eng J* 2010; 160(1):259–66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2010.02.057>.
- Prasad CS, Maiti KN, Venugopal R. Effect of rice husk ash in whiteware compositions. *Ceram Int* 2001; 27(6):629–35. [http://dx.doi.org/10.1016/S0272-8842\(01\)00010-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0272-8842(01)00010-4).
- Rohman A. Rice bran oil's role in health and cooking. In: Watson RR, Preedy VR, Zibadi S, editors. *Wheat and rice in disease prevention and health: benefits, risks and mechanisms of whole grains in health promotion*. Elsevier, Academic Press; 2014. p. 481–90. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-401716-0.00037-4>.
- Ryu C, Yang YB, Khor A, Yates NE, Sharifi VN, Swithembank J. Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I. Experiments—fuel type, equivalence ratio and particle size. *Fuel* 2006; 85:1039–46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2005.09.019>.
- Saravanan SD, Senthil Kumar M. Effect of mechanical properties on rice husk ash reinforced aluminum alloy (AlSi10Mg) matrix composites. *Procedia Eng* 2013; 64: 1505–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.232>.
- Saravanan S, Nagarajan G, Rao G, Sampath S. Feasibility study of crude rice bran oil as a diesel substitute in a DI-CI engine without modifications. *Energy Sustain Dev* 2007; 11(3):83–92. [http://dx.doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60580-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60580-3).
- Saunders RM, Betschart AA. Rice and rice foods: chemistry and nutrition. *Tropical Foods: Chemistry and Nutrition*, 1. 1; 1979. p. 191–216.
- So SJ, Jang IS, Han CS. Effect of micro/nano silica particle feeding for mice. *J Nanosci Nanotechnol* 2008; 8(10):5367–71. <http://dx.doi.org/10.1166/jnn.2008.1347>. [5].
- Sookkumnerd C, Ito N, Kito K. Financial viabilities of husk-fueled steam engines as an energy-saving technology in Thai rice mills. *Appl Energy* 2005; 82(1):64–80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.09.012>.
- SPSS. *Statistical Package for Social Sciences version 10.1.4*. Chicago (IL): SPSS Inc.; 2002.
- Suzuki RM, Andrade AD, Sousa JC, Rollenber MC. Preparation and characterization of activated carbon from rice bran. *Bioresour Technol* 2007; 98(10):1985–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2006.08.001>.
- Toan PK, Cuong ND, Quy NT, Sinh PK. Application of briquetting technology to produce briquettes from agricultural residues and by-products. *World Renewable Energy Congress VI: Renewables—The Energy for the 21st Century*; 2000. p. 1416–9. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-008043865-8/50295-6>.
- Vadiveloo J, Nurfariza B, Fadel JG. Nutritional improvement of rice husks. *Anim Feed Sci Technol* 2009; 151(3):299–305. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeeds.2009.03.002>.
- Wan Y, Prudente A, Sathivel S. Purification of soluble rice bran fiber using ultrafiltration technology. *LWT—Food Sci Technol* 2012; 46(2):574–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2011.09.019>.
- Yuzer N, Cinar Z, Aköz F, Biricik H, Yalcin Gurkan Y, Kabay N, et al. Influence of raw rice husk addition on structure and properties of concrete. *Construct Build Mater* 2013; 44:54–62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.070>.





**Fig. 3.** Flame temperature of different types of briquettes and charcoal during combustion in a Salmar briquette-charcoal stove for a period of 55 min. HBF = rice husk-bran-palm press fiber; HBS = rice husk-bran-palm press sludge; HBO = rice husk-bran-only; HBC = rice husk char; CHA = charcoal.

## Conclusions

Briquettes currently produced in SSA are hard to light and difficult to burn because existing stoves require additional ventilation. This paper reports the production and characterization of different types of briquettes using different combinations of raw materials, methods, and an affordable briquetting technology. The paper demonstrates that particle size, husk-bran ratio, drying method, and water temperature for briquetting are the main factors that influence the hardness of the briquettes at constant pressure. Using bran or other forms of binders is necessary to produce rice-husk briquettes with sufficient hardness. HBF and HBO briquettes produced for fuel from husk-bran mixtures from Engelberg type mills showed the best fuel briquette quality in terms of hardness, ease of lighting, calorific value, ash content, burning rate, specific fuel consumption, and flame temperature. Although HBS was not hard enough, HBF, HBS, and HBO should be suitable for cooking operations that require high heat intensities from the onset of cooking such as for boiling water during paddy soaking and steaming in the rice parboiling industry.

The high volumes of firewood used for rice parboiling represent as much as 30% of operating costs and contribute to local deforestation and landscape degradation. Targeting millers who also parboil rice is expected to increase the adoption rate of these briquettes, as this will reduce their dependence on firewood, which is becoming scarce, especially with increasing urbanization. Briquettes produced using husk only could be of added advantage, as the ash by-product could be used for building and construction (Khan et al., 2012; Yuze et al., 2013) or in the local ceramic industry (Prasad et al., 2001; Andreola et al., 2013). Rice-husk briquettes can also be produced for companies that require rice husk as raw material. However, further research is needed to understand consumer perception and willingness to pay for the different types of briquettes made from rice-milling by-products.

## Acknowledgements

This work received financial support from the Department of Foreign Affairs, Trade and Development of the Government of Canada (grant number A034968) and from the African Development Bank (grant number 2100155022217) toward the support for rice research in Africa awarded to the Africa Rice Center. Special thanks to Guy Manners (Green Ink, UK) for editing the manuscript.

## Appendix A. Supplementary data

Technical drawings of the different parts of the rice-husk briquetter showing (02) frame assembly, (03) frame assembly view, (04) plate and piston system, (05) plates, (06) cylinders, (07) piston, and (08) horizontal mobile plate. Supplementary data associated with this article can be found in the online version, at <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2015.09.003>.

## References

- Adkins E, Ooppelstrup K, Modi V. Rural household energy consumption in the millennium villages in sub-Saharan Africa. *Energy Sustain Dev* 2012;16(3):249–59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2012.04.003>.
- Ahiduzzaman M, Islam AKM. Development of biomass stove for heating up die barrel of rice husk briquette machine. *Procedia Eng* 2013;56:777–81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promeng.2013.03.194>.
- Al-Widyan MI, Al-Jalil HF. Stress-density relationship and energy requirement of compressed olive cake. *Appl Eng Agric* 2001;17(6):749–53.
- Amisah JGN, Ellis WO, Oduro I, Manful JT. Nutrient composition of bran from new rice varieties under study in Ghana. *Food Control* 2003;14(1):21–4. [http://dx.doi.org/10.1016/S0956-7135\(02\)00047-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0956-7135(02)00047-6).
- An D, Guo Y, Zou B, Zhu Y, Wang Z. A study on the consecutive preparation of silica powders and active carbon from rice husk ash. *Biomass Bioenerg* 2011;35(3):1227–34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.014>.
- Andreola F, Martin MI, Ferrari AM, Lancellotti I, Bondioli F, Ma Rincón J, et al. Technological properties of glass-ceramic tiles obtained using rice husk ash as silica precursor. *Ceram Int* 2013;39:5427–35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.12.050>.
- AOAC International. Official methods of analysis of AOAC International No. 920.05, 920.39. AOAC International; 2002.
- Aprovecho Research Center. Testing & Protocols. Cottage Grove (OR): Aprovecho Research Center; 2013. <http://www.aprovecho.org/lab/pubs/testing>.
- ASABE. Standard S358.2: Moisture measurement—Forages. St-Joseph (MI): American Society of Agricultural and Biological Engineering; 2006. p. 608–9.
- ASTM. Standard D5865-11: Standard test method for gross calorific value of coal and coke, vol. 05.06. West Conshohocken (PA): American Society for Testing and Materials; 2010. p. 628–44.
- Bailis R, Ogle D, Maccarty N, Still D. The Water Boiling Test (WBT), version 4.12. Oregon, USA: Household Energy and Health Programme, Shell Foundation; 2003 [revised 2009].
- Bhattacharya SC, Leon MA, Rahman MM. A study on improved biomass briquetting. *Energy Sustain Dev* 2002;6(2):67–71. [http://dx.doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60317-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60317-8).
- Chin OC, Siddiqui KM. Characteristics of some biomass briquettes prepared under modest die pressures. *Biomass Bioenerg* 2000;18(3):223–8. [http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534\(99\)00084-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00084-7).
- Chou CS, Lin SH, Peng CC, Lu WC. The optimum conditions for preparing solid fuel briquette of rice straw by a piston-mold process using the Taguchi method. *Fuel Process Technol* 2009;90(7):1041–6. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.04.007>.
- El-Shafey EI. Removal of Zn (II) and Hg (II) from aqueous solution on a carbonaceous sorbent chemically prepared from rice husk. *J Hazard Mater* 2010;175(1):319–27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.006>.
- Faccin GI, Miotto LA, Vieira IDN, Barreto PIM, Amante ER. Chemical, sensorial and rheological properties of a new organic rice bran beverage. *Rice Sci* 2009;16(3):226–34. [http://dx.doi.org/10.1016/S1672-6308\(08\)60083-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1672-6308(08)60083-9).
- Goyal HB, Seal D, Saxena RC. Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2008;12(2):504–17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.014>.
- Grover PD, Mishra SK, Clancy JS. Development of an appropriate biomass briquetting technology suitable for production and use in developing countries. *Energy Sustain Dev* 1994;1(1):45–8.
- Gunawan S, Maulana S, Anwar K, Widjaja T. Rice bran, a potential source of biodiesel production in Indonesia. *Ind Crop Prod* 2011;33(3):624–8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.12.027>.
- IRRI. World Rice Statistics Online Query Facility. Results generated on Sept 6, 2015 20:01. Los Baños: International Rice Research Institute; 2015 [<http://ricestat.irri.org:8080/wrs2/entrypoint.htm>].
- Kaliyan N, Morey RV. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass Bioenerg* 2009;33(3):337–59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>.
- Kaplan R, Arararatnam V. Paddy husk as support for solid state fermentation to produce xylanase from *Bacillus pumilus*. *Rice Sci* 2011;18(1):36–45. [http://dx.doi.org/10.1016/S1672-6308\(11\)60006-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1672-6308(11)60006-1).
- Khan R, Jabbar A, Ahmad I, Khan W, Khan AN, Mirza J. Reduction in environmental problems using rice-husk ash in concrete. *Construct Build Mater* 2012;30:360–5. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.028>.
- Krishnani KK, Meng X, Chnstodoulatos C, Boddu VM. Biosorption mechanism of nine different heavy metals onto biomatrix from rice husk. *J Hazard Mater* 2008;153(3):1222–34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.113>.
- Kumagai S, Sasaki J. Carbon/silica composite fabricated from rice husk by means of binderless hot-pressing. *Bioresour Technol* 2009;100(13):3308–15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.02.001>.
- Li Z, Lu J, Yang Z, Han L, Tan T. Utilization of white rice bran for production of L-lactic acid. *Biomass Bioenerg* 2012;39:53–8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.12.039>.

- Lim JS, Abdul Manan Z, Wan Alwi SR, Hashim H. A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Renew Sustain Energy Rev* 2012a; 16(5):3084–94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.051>.
- Lim SL, Wu TY, Sim EYS, Lim PN, Clarke C. Biotransformation of rice husk into organic fertilizer through vermicomposting. *Ecol Eng* 2012b;41:60–4. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.01.011>.
- Lin L, Ying D, Chaitep S, Vittayapadung S. Biodiesel production from crude rice bran oil and properties as fuel. *Appl Energy* 2009;86(5):681–8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.06.002>.
- Mai Thao PT, Kurisu KH, Hanaki K. Greenhouse gas emission mitigation potential of rice husks for An Giang province, Vietnam. *Biomass Bioenerg* 2011;35(8):3656–66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.05.023>.
- Maiti S, Dey S, Purakayastha S, Ghosh B. Physical and thermochemical characterization of rice husk char as a potential biomass energy source. *Bioresour Technol* 2006;97(16):2065–70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2005.10.005>.
- Manickam IN, Ravindran D, Subramanian P. Biomass densification methods and mechanism. *Cogeneration & Distrib Generation J* 2006;21(4):33–45. <http://dx.doi.org/10.1080/15453660609509098>.
- Mwampamba TH, Owen M, Pigah M. Opportunities, challenges and way forward for the charcoal briquette industry in sub-Saharan Africa. *Energy Sustain Dev* 2013;17(2):158–70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2012.10.006>.
- Ndingeng SA, Mapiemfu DL, Fantong W, Nchinda VP, Ambang Z, Manful JT. Postharvest adaptation strategies to the effects of temperature variations and farmer–miller practices on the physical quality of rice in Cameroon. *Am J Clim Chang* 2014;3:178–92. <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.32017>.
- Ndingeng SA, Manful J, Futakuchi K, Mapiemfu DL, Akoa-Etoa JM, Tang EN, et al. Upgrading the quality of Africa's rice: a novel artisanal parboiling technology for rice processors in sub-Saharan Africa. *Food Sci Nutr* 2015. <http://dx.doi.org/10.1002/fsn3.242>. [in press].
- Parmigiani SP, Vitali F, Lezzi AM, Vaccari M. Design and performance assessment of a rice husk fueled stove for household cooking in a typical sub-Saharan setting. *Energy Sustain Dev* 2014;23:15–24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2014.01.003>.
- Pourali O, Asghari FS, Yoshida H. Production of phenolic compounds from rice bran biomass under subcritical water conditions. *Chem Eng J* 2010;160(1):259–66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2010.02.057>.
- Prasad CS, Maiti KN, Venugopal R. Effect of rice husk ash in whiteware compositions. *Ceram Int* 2001;27(6):629–35. [http://dx.doi.org/10.1016/S0272-8842\(01\)00010-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0272-8842(01)00010-4).
- Rohman A. Rice bran oil's role in health and cooking. In: Watson RR, Preedy VR, Zibadi S, editors. *Wheat and rice in disease prevention and health: benefits, risks and mechanisms of whole grains in health promotion*. Elsevier, Academic Press; 2014. p. 481–90. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-401716-0.00037-4>.
- Ryu C, Yang YB, Khor A, Yates NE, Sharif VN, Swithenbank J. Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I. Experiments—fuel type, equivalence ratio and particle size. *Fuel* 2006;85:1039–46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2005.09.019>.
- Saravanan SD, Senthil Kumar M. Effect of mechanical properties on rice husk ash reinforced aluminum alloy (AlSi10Mg) matrix composites. *Procedia Eng* 2013;64:1505–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.232>.
- Saravanan S, Nagarajan G, Rao G, Sampath S. Feasibility study of crude rice bran oil as a diesel substitute in a DI–CI engine without modifications. *Energy Sustain Dev* 2007; 11(3):83–92. [http://dx.doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60580-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60580-3).
- Saunders RM, Betschart AA. Rice and rice foods: chemistry and nutrition. *Tropical Foods: Chemistry and Nutrition*, 1. 1; 1979. p. 191–216.
- So SJ, Jang IS, Han CS. Effect of micro/nano silica particle feeding for mice. *J Nanosci Nanotechnol* 2008;8(10):5367–71. <http://dx.doi.org/10.1166/jnn.2008.1347>. [5].
- Sookkumnerd C, Ito N, Kito K. Financial viabilities of husk-fueled steam engines as an energy-saving technology in Thai rice mills. *Appl Energy* 2005;82(1):64–80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.09.012>.
- SPSS. *Statistical Package for Social Sciences version 10.1.4*. Chicago (IL): SPSS Inc.; 2002.
- Suzuki RM, Andrade AD, Sousa JC, Rollemberg MC. Preparation and characterization of activated carbon from rice bran. *Bioresour Technol* 2007;98(10):1985–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2006.08.001>.
- Toan PK, Cuong ND, Quy NT, Sinh PK. Application of briquetting technology to produce briquettes from agricultural residues and by-products. *World Renewable Energy Congress VI: Renewables—The Energy for the 21st Century*; 2000. p. 1416–9. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-008043865-8/50295-6>.
- Vadiveloo J, Nurfanza B, Fadel JC. Nutritional improvement of rice husks. *Anim Feed Sci Technol* 2009;151(3):299–305. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeeds.2009.03.002>.
- Wan Y, Prudente A, Sathivel S. Purification of soluble rice bran fiber using ultrafiltration technology. *LWT - Food Sci Technol* 2012;46(2):574–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2011.09.019>.
- Yuzer N, Cinar Z, Aköz F, Biricik H, Yalcin Gurkan Y, Kabay N, et al. Influence of raw rice husk addition on structure and properties of concrete. *Construct Build Mater* 2013; 44:54–62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.070>.

*Full Length Research Paper*

## Evaluation of *in vivo* toxicity of rice husk used as fuel for cooking in households

Mbassi Josiane Emilie Germaine<sup>1,3\*</sup>, Sali Atanga Ndindeng<sup>2</sup>, Achu Mercy Bih Loh<sup>3</sup>, Dimo Théophile<sup>4</sup> and Mbacham Fon Wilfred<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Food Technology Laboratory, Institute of Agricultural Research for Development (IRAD), P.O. Box 2123 Yaoundé, Cameroon.

<sup>2</sup>Africa Rice Center, M'bé Research Station, Bouake, 01BP 2551, Côte d'Ivoire.

<sup>3</sup>Department of Biochemistry, Faculty of Sciences, University of Yaoundé I, P. O. Box 812, Cameroon.

<sup>4</sup>Laboratory of Animal Physiology, Department of Animal Biology, University of Yaoundé I- P. O. Box 812, Cameroon.

Received 18 January, 2020; Accepted 19 March, 2020

This study aimed to evaluate the toxicological effect of food cooked or water boiled with a fan-assisted top-lit-updraft rice husk fuelled gasifier stove named Paul Olivier 150 (PO150). Distilled water was boiled for 1 h using this stove in an opened pot and closed room. This water was then cooled to room temperature before being administered to rats with body weights ranging from 70 to 110 g. Two types of tests were performed: acute and sub-chronic toxicity test. For the acute toxicity study, a unique dose of 2 ml/100 g body weight (bw) of boiled water was administered orally to the rats. The animals were observed for toxic symptoms and mortality daily for 14 days. In a sub-chronic toxicity study, the boiled water, at doses of 0.5, 1 and 2 ml/100 g bw were orally administered daily for 28 days to rats. After these 28 days, the rats were sacrificed, blood samples were collected for haematological, biochemical and histological examination. The control rats were administered distilled water. The sample of distilled water boiled with rice husk fuelled gasifier stove showed no evidence of single dose toxicity (2 ml/100 g) when studying acute toxicity. For the sub-chronic toxicity study, boiled water at doses of 0.5, 1 and 2 ml/100 g showed significant difference in some parameters such as creatinine in males (71.81 mg/dL), uric acid (2.75 mg/dL) and total bilirubin (0.08 mg/dL), monocytes (0.49 10<sup>3</sup>/μL) and granulocytes in females (2.70 10<sup>3</sup>/μL) compared to the control group (64.16 mg/dL, 2.25 mg/dL, 0.19 mg/l, 0.37 10<sup>3</sup>/μL, and 1.80 10<sup>3</sup>/μL for each parameter respectively) but the data was below the threshold levels to be considered to have toxic effects. These showed that cooking in an open pot with a rice husk fuelled PO150 gasifier stove does not cause toxicity at the doses studied.

**Key words:** Acute toxicity, sub-chronic toxicity, biochemical analysis, hematological parameters, histopathology, rice husk.

### INTRODUCTION

The adoption of fire so many years ago was surely one of the most powerful developments in human history. Fire

for cooking has made the consumption of a much wider variety of foodstuffs and greatly enhanced food safety.

\*Corresponding author. E-mail: [josianembassi@yahoo.fr](mailto:josianembassi@yahoo.fr).

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Fire for heating has allowed humans to expand their zones of habitation to higher latitudes and elevations, and it has fundamentally transformed the patterns of social development. But with fire, also came the first anthropogenic pollution, evidenced by the soot still found in prehistoric caves (GEMS, 1990). Nearly 3 billion people worldwide, and a majority of households in developing countries, rely on solid fuels (such as wood, dung, crop residues, coal, and charcoal) with little or no access to modern fuels for cooking and other household energy needs (Lim et al., 2012; Smith et al., 2012). The types of fuel used for domestic needs such as cooking and heating can be categorized into non-solid and solid fuels (Torres et al., 2008).

Rice husk (solid fuel) constitutes about 20% of the weight of paddy and is composed of cellulose (50%), lignin (25-30%), silica (15-20%), and moisture (10-15%) (Bhupinder, 2018). According to the United States Department of Agriculture (USDA), paddy production in Sub-Saharan Africa (SSA) in 2018 was 26.5 million tons (IRRI RICESTAT, 2019). Based on paddy production estimates in 2018, some 5.3 million tons of rice husk were produced annually in SSA and this can be a perfect source of renewable energy. However, the husk in this region is mostly disposed by burning in the field or roads and/or dumping in river beds leading to high levels of land, water and air pollution. The rice husk can produce about 3000 kcal per kilogram of heat energy (Anderson et al., 2008). Combustion and gasification remain the most important viable options of using rice husk as fuel in SSA whereby the rice husk can be used unprocessed (Ndindeng et al., 2019) or processed into briquettes or pellets (Ndindeng et al., 2015).

Toxic health effects of solid fuels were identified as early as the late 18th century, when coal soot was recognized as a cause of scrotal cancer in chimney sweeps (Brown et al., 1957). In the 20th century, both coal and biomass fuels were subjects of intensive investigations on their possible negative health effects. The results of these researches suggest that some constituents of biomass smoke emissions have irritating, inflammatory and carcinogenic properties (Wei and Seow, 2012). Smoke emissions have carcinogenic and mutagenic properties in studies conducted on *in vitro* systems and animal models. At the population level, there is epidemiological evidence that biomass fuels are associated with respiratory and cardiovascular diseases such as lower respiratory tract infections, chronic obstructive lung disease and coronary heart disease (Dherani et al., 2008; Black et al., 2008). The incomplete combustion of these solid fuels results in much of the fuel energy being emitted as potentially toxic pollutants, including particles of varying sizes, carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide, volatile and semivolatile organic compounds (e.g., formaldehyde and benzo[a]pyrene), methylene chloride, and dioxins (Naeher et al., 2007). The use of solid fuels, primarily for cooking, has been

estimated to be responsible for >3.5 million premature deaths per year (plus an additional 0.5 million deaths from outdoor air pollution due to household fuel use) and 110 million disability-adjusted life years (DALYs) (Lim et al., 2012).

Ndindeng et al. (2019) evaluated five different rice husk top-lit updraft (TLUD) gasifier cook-stoves for use in cooking operations in Africa. This study demonstrated that fan-assisted cook-stoves especially PO150 recorded better thermal and emission indices and are safer to use than the natural draft gasifier stove (Mayon). Although PO150 operator may safely use the stove for cooking in well ventilated environments, questions still exist as to whether some compounds emitted by the stove can contaminate the food being cooked and exert toxic effects on consumers. However, to our knowledge, no study on the *in vivo* toxicity of rice husk as a fuel has been described in the literature. Therefore, in the present investigation, we aimed to investigate the toxicity (both oral acute and sub-chronic) of distilled water boiled on PO150 gasifier using rice husk as fuel on rats.

## MATERIALS AND METHODS

### Operation of the stove and preparation of the water sample

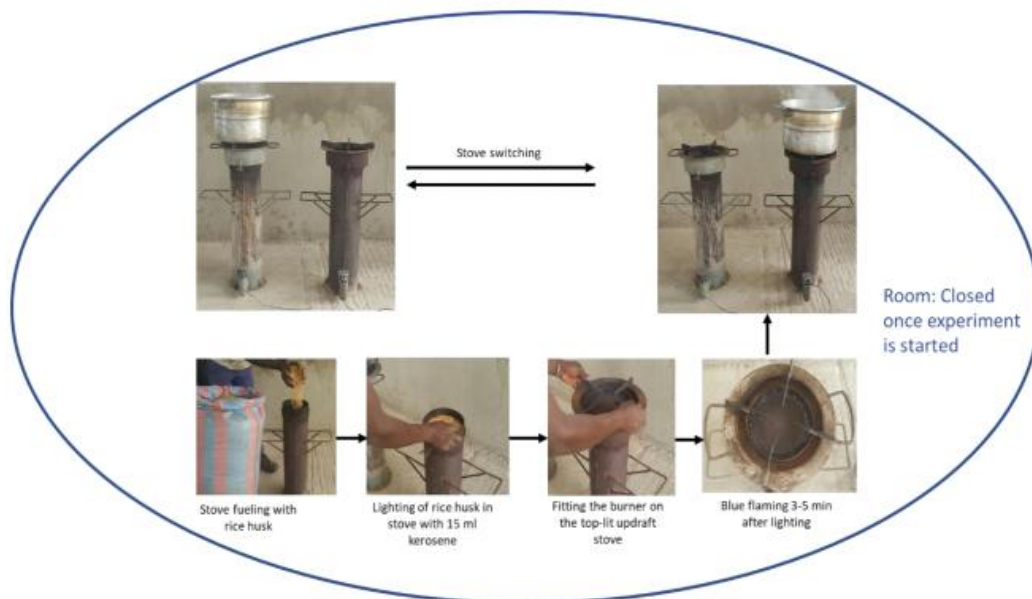
PO150 gasifier operates on batch mode and on a forced-draft system which is a fan with a fueling capacity of 0.78 kg per batch and a batch lasts for 30 min. When the rice husk in the gasifier was completely used up, the biochar was discarded before new fuel was put into the gasifier to initiate another energy generation process. In order to reduce the fuel refilling time and ensure smooth cooking of dishes whose cooking time is higher than the maximum burning time for batch type gasifiers, stove switching was used as previously described (Ndindeng et al., 2019). Briefly, two PO150 gasifiers, A1 and A2 were produced and used for the study. When A1 was running, A2 was filled with rice husk and placed nearby. The gasifier A2 was lit when the burning time in A1 was 5 min to stopping time. When A1 stopped, the pot was transferred to A2 and the biochar in A1 chamber was discarded, new fuel filled and placed nearby.

Distilled water was boiled every day during the period of the experiment (28 days). The fan-assisted gasifier PO150 (Figure 1) was placed in a room with window and door closed.

Five liters of distilled water were put in an open pot with a capacity of 10 L. Since the cooking time of food varies (10 min to 2 h), the time the water is kept boiling on the stove is critical and the longer the time, the better, to allow for any possible toxins from the stove emissions to dissolve in the water; the water was therefore allowed to boil for about 1 h from the boiling point on the stove using the rice husk as fuel. This water was then cooled to room temperature before being administered to the rats.

### Experimental animals

For the evaluation of rice husk-related toxicity, 48 albino rats of *Wistar* breed (20 males and 28 non-pregnant females), aged about 6 weeks, and body weights ranging from 70 to 110 g at the beginning of the experiment, were used. They were purchased from the Animal House of the Laboratory of Animal Physiology, Department of Biochemistry, University of Yaoundé I, and bred at



**Figure 1.** Schematic presentation of the setup for boiling water with a PO150 fan-assisted rice husk fuelled gasifier stove.

room temperature for a 12 h light/dark photoperiod cycle. A seven (7)-day adaptation period was observed before the experiment. They were kept in their plastic cages where they received the standard diet and water *ad libitum*. The litter used was sawdust, renewed twice per week to ensure good hygienic status of the animals. Authorization for the use of laboratory animals in this study was obtained from the Cameroon National Ethics Committee (Reg. N° FWA-IRD 0001954).

#### Grouping of animals

The 48 *Wistar* albino rats were randomly divided into 6 groups of 8 animals each. Group 1 (consisting of 8 females) was used for the acute toxicity assessment. Female rats were used because literature surveys of conventional LD50 tests show that, although there is little difference in sensitivity between the sexes, in cases where differences are observed, females are generally slightly more sensitive (OCDE, 2001). And the other 5 groups (8 rats per group, made up of 4 females and 4 males) were used for the sub-chronic toxicity study.

#### Acute toxicity study in rats

For acute toxicity testing, in rodents, the volume of administered substance should not normally exceed 1 mL/100 g of body weight. However, for aqueous solutions, 2 mL/100 g body weight (bw) can be considered. In this study, distilled water boiled with rice husk was given to the rats at the unique dose of 2 mL/100 g bw, according to the Organization for Economic Cooperation Development (OECD) guidelines 423 (OCDE, 2001). Eight healthy *Wistar* female rats were randomly divided into 2 groups (4 females per group). On the eve of the day of the experiment, food but not water was withheld overnight. Group 1 (Normal control group) received distilled water, given orally. Group 2 (The experimental

group) orally received a unique dose of 2 mL/100 g bw distilled water that was boiled with rice husk. Food was withheld for a further 4 h after giving the water. The rats were observed individually for general behaviour, toxic symptoms and mortality during the first 30 min. This observation continued every 30 min, during the first 4 h after administration of the unique dose of 2 mL/100 g bw boiled water, the animals were weighed every 2 days, for a total of 14 days and during this period, signs of toxicity including changes in hairs, motility, tremors, mass, grooming, sensitivity to noise after metal shock, stool appearance, mobility and death were observed. The rats were sacrificed by cervical dislocation, and their organs were excised (heart, liver, spleen, lungs, kidneys), and weighed using an analytical balance.

#### Sub-chronic toxicity study in rats

The sub-chronic toxicity study was carried out on the rats according to the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD guideline 407 for testing of chemicals on sub-chronic toxicity with slight modifications); which stated that the volume given to rats should not normally exceed 1 mL/100 g of body weight, however in the case of aqueous solutions 2 mL/100 g body weight can be considered (OECD, 2008). Forty healthy *Wistar* rats were weighed, orderly marked, and randomly divided into 5 groups (4 males and 4 females per group). Group 1 (Control group) received distilled water by oral gavage throughout the course of the study. The experimental groups (2-4) were orally administered samples of distilled water boiled with rice husk stove as follows: Low dose (0.5 mL/100 g), medium dose (1 mL/100 g) and high dose (2 mL/100 g) body weight/day, respectively, for 28 days. The body weight was measured every 2 days and signs of toxicity were noted daily. At the end of these 28 days, groups 1 to 4 were sacrificed while the physiological condition of the rats of group 5 was restored for another 2 weeks (with food and water supplied *ad libitum*). Group 5 was orally administered samples of a high dose of boiled distilled

water (2 ml/100 g) for 28 days but not sacrificed at the end of 28 days as groups 1 to 4. Group 5 was observed for an additional 14 days and sacrificed on the 42nd day. All the rats survived and were anesthetized with carbon dioxide and blood samples were obtained from the eyes of the rats using capillary tubes for hematological and serum biochemical studies. After blood collection, the rats were sacrificed by cervical dislocation.

#### Measurement of body and organ weights

The animals were weighed every 2 days and the percentage weight gain (%) was calculated using the formula:

$$\text{Weight gain (\%)} = \frac{W_f - W_i}{W_i} \times 100$$

where  $W_f$  is the final weight and  $W_i$  is the initial weight.

All the animals in this study were subjected to general autopsy. Animals were pinned down in a dissection tray by placing them with ventral side up. The abdominal skin was lifted with forceps and cut through with scissors. The scissor was inserted under the skin and moved towards the cephalic direction. The rats were cut along the body midline, from the public region to the lower jaw. A lateral cut was made about halfway down the ventral surface of each limb. The liver, heart and kidneys were removed, cleaned, and kept in the refrigerator. The relative weight of the liver, heart and kidneys was determined by the formula:

$$\text{Relative organ weight} = \frac{\text{weight of organ}}{\text{Animal weight}} \times 100$$

#### Biochemical parameters

Blood samples were collected in non heparinized tubes and centrifuged at 3000 rpm to obtain the serum that served for the assessment of the parameters for liver and kidney functions. The experiment was performed in accordance with protocols provided with commercial kits, Fortress Diagnostics, reviewed in October 2007. The levels of aspartate amino transferase (AST), alanine amino transferase (ALT), creatinine, uric acid, total bilirubin and proteins were assessed. Creatinine, uric acid and total bilirubin and proteins were analyzed using the method described by Timothy et al. (2015). Alanine aminotransferase (ALT) and aspartate aminotransferase (AST) in serum were assayed using the colorimetric test of Reitman and Frankel (1957) as published by Rodier and Mallein (1983).

#### Hematological analysis

The following haematological parameters were evaluated with the help of a "Hospitex Diagnostics Hema Screen 18" Automated Analyzer from the Haematology Laboratory of the Yaoundé Central Hospital: white blood cell count (WBC), haemoglobin (Hb), red blood cell counts (RBC), mean corpuscular volume (MCV), mean corpuscular haemoglobin (MCH), mean corpuscular haemoglobin concentration (MCHC), hematocrit (HCT), lymphocytes (LYM), monocytes (MON), granulocytes (GRA) and platelet count (PLT).

#### Histopathological study

The liver, heart and kidneys stored in formalin 10% for 3 weeks

were cut into small pieces of 5 to 10 mm. The tissues were dehydrated in an ascending series of alcohol, soaked in xylene, and embedded in paraffin wax melted at 60°C. Serial sections (5 µm thick) obtained by cutting the embedded tissue with microtome were mounted on 3-aminopropyl triethsilane coated slides and dried for 24 h at 37°C (Baravalle et al., 2006). The sections on the slides were deparaffinised with xylene and hydrated in a descending series of alcohol. They were then stained with Mayer's haematoxylin and eosin dyes, dried and mounted on a light microscope (X100 and X200) for histopathological examination.

#### Statistical analysis

The data was analyzed using the software, Excel and Graph Pad. Quantitative data were presented as mean ± standard deviation (SD) on graphs and tables. One-way Analysis of Variance (ANOVA) was used to compare the means between the groups. This was accompanied by the post hoc Tukey's multiple comparison test to determine significant differences between values. The value of  $p < 0.05$  was considered statistically significant.

## RESULTS

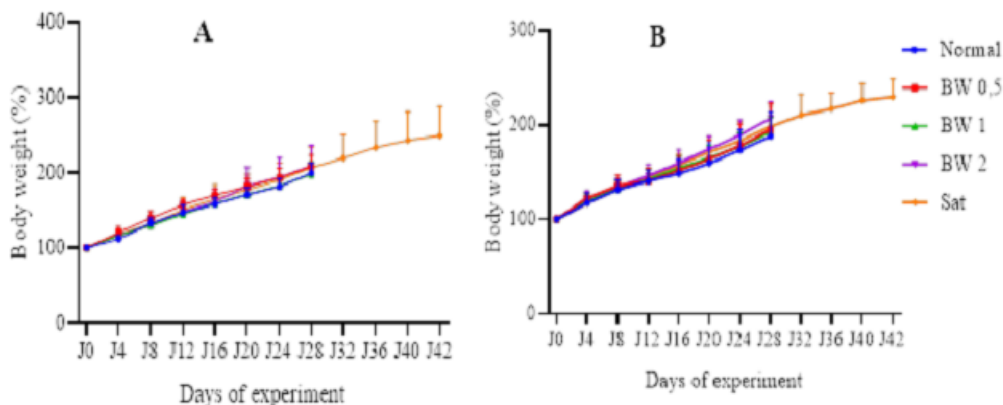
### Acute oral toxicity test

In all the eight female animals used for the test, no signs of toxicity or death were observed among the rats during the 14 days of the acute toxicity experimental period, after the administration of a single oral dose of 2 ml/100 g of distilled water, boiled with rice husk as fuel. The average gain in body weight of the rats was  $10.2 \pm 2.32$ ,  $40.75 \pm 7.78$  and  $60.75 \pm 8.78\%$  for days 2, 8 and 14, respectively. The body weight gradually increased within the normal range of body weight gain. After 14 days of testing, all the rats were subjected to gross necropsy. The pathological studies on the liver and kidneys of the rats tested showed no significant abnormal changes in colour, size, shape and texture compared to the control. These results suggest that water boiled with rice husk as fuel was not toxic, after an acute exposure.

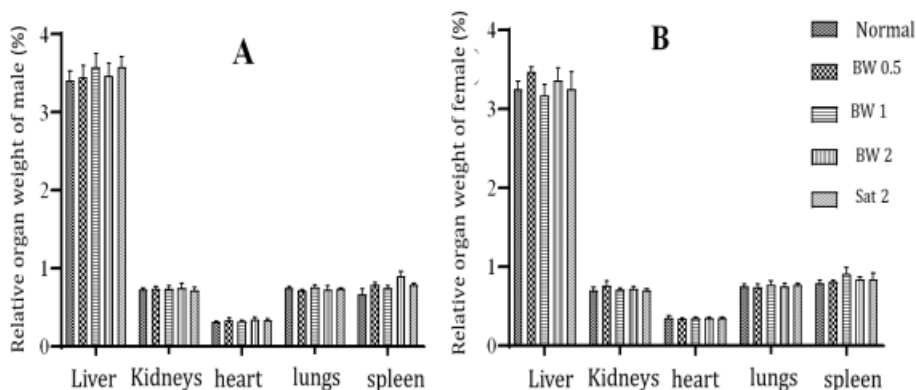
### 28-Day sub-chronic oral toxicity study

#### Effects on the behaviour, organ and body weight

The administration of various doses of water boiled with rice husk as fuel (0.5, 1 and 2 ml/100 g bw) for 28 days, had no significant change ( $p > 0.05$ ) on the body weight of either male or female rats compared to the controls (Figure 2A and B). No deaths or obvious clinical signs of toxicity in the rats were observed in all the groups, including the group that received the highest dose of 2 ml/100 g bw. Figure 3A and B show the relative organ weights of the male and female rats after 28 days of administration of the boiled water sample. The relative organ weights of the liver and kidneys, heart, lungs and spleen evaluated and calculated at necropsy in the treated groups did not show any significant difference ( $p$



**Figure 2.** Effect of water boiled with rice husk on the body weights of male (A) and female (B) wistar rats. n = 4 corresponding to number of rats per sex. Each value represents mean ± SD. Control: healthy rats that received distilled water; Sat: Rats that received 2 ml/100 g bw of boiled water and observed 14 days more, after the end of the experiment; BW0.5, BW1 and BW 2 represent groups of rats that received boiled water at doses of 0.5 ml/100 g, 1 ml/100 g and 2 ml/100 g bw, respectively.



**Figure 2.** Relative organ weights of male (A) and female (B) rats that received different doses of the boiled water for 28 days. n = 4 corresponding to number of rats per sex. Each bar represents mean ± SD. Control: healthy rats that received distilled water; Sat: Rats that received 2 ml/100 g bw of boiled water and observed 14 days more, after the end of the experiment, BW0.5, BW1 and BW 2 represent groups of rats that received boiled water at doses of 0.5 ml/100 g, 1 ml/100 g and 2 ml/100 g bw, respectively.

> 0.05) from those of the control.

**Effects on biochemical and haematological parameters**

The results of the biochemical parameters are shown in Table 1. The results for male rats showed no significant difference in some parameters (ALT, AST, Total protein, urea and Total bilirubin) at all treatment doses except creatinine which significantly (P<0.05) increased at the dose of 1 ml/100 g compared to the control.

In the female rats (Table 2), uric acid and total bilirubin recorded significant differences, at the dose of 2 ml/100 g administered. The analyses showed significant increase (P<0.05) in uric acid while total bilirubin significantly decreased, with more decrease 14 days after the end of the experiment compared to the control group.

The effect of the boiled water sample on the haematological indices of the rats was examined at the end of the experiment (Tables 3 and 4). Analysis of variances showed no significant difference in most of the parameters except the platelets (P<0.05), compared to the control in the male rats. However, in the female rats,

**Table 1.** Biochemical profile of male rats that received different doses of boiled water for 28 days.

Parameter	Groups				
	Control	0.5 ml/100 g	1 ml/100 g	2 ml/100 g	Satellite (2 ml/ 100 g)
AST (U/L)	134.44 ± 7.877	144.13 ± 10.24	136.37 ± 2.59	144.40 ± 5.89	134.17 ± 4.67
ALT (U/L)	36.75 ± 2.40	43.06 ± 2.36	41.08 ± 6.04	38.07 ± 10.22	40.70 ± 2.84
Creatinine (mg/dL)	64.16 ± 2.43	65.93 ± 1.93	71.81 ± 1.09*	67.28 ± 1.72	63.89 ± 1.86
Uric acid (mg/dL)	2.44 ± 0.10	2.24 ± 0.07	2.2 ± 0.16	2.13 ± 0.10	2.11 ± 0.18
Protein (mg/dL)	2.17 ± 0.05	2.17 ± 0.05	2.28 ± 0.03	2.22 ± 0.06	2.17 ± 0.10
Bilirubin (mg/l)	0.19 ± 0.01	0.19 ± 0.03	0.23 ± 0.04	0.26 ± 0.01	0.18 ± 0.02

**Table i.** Biochemical profile of female rats that received different doses of boiled water for 28 days.

Parameter	Groups				
	Control	0.5 ml/100 g	1 ml/100 g	2 ml/ 100 g	Satellite (2 ml/100 g)
AST (U/L)	171.10 ± 4.95	154.85 ± 9.05	147.08 ± 7.68	143.64 ± 11.00	160.98 ± 2.65
ALT (U/L)	52.77 ± 4.43	50.35 ± 7.95	42.82 ± 2.14	44.51 ± 3.26	48.17 ± 3.77
Creatinine (mg/dL)	67.55 ± 0.39	72.01 ± 2.86	65.59 ± 4.43	69.11 ± 3.65	66.01 ± 1.24
Uric acid (mg/dL)	2.25 ± 0.19	2.45 ± 0.09	2.29 ± 0.17	2.75 ± 0.13*	2.27 ± 0.15
Protein (mg/dL)	2.23 ± 0.03	2.22 ± 0.12	2.06 ± 0.05	2.23 ± 0.07	2.17 ± 0.06
Bilirubin (mg/l)	0.19 ± 0.01	0.19 ± 0.03	0.15 ± 0.03	0.08 ± 0.02*	0.10 ± 0.04*

Values are expressed as mean ± SD; \*significantly different from the control group ( $p < 0.05$ ). AST: Aspartate amino transferase, ALT: alanine amino transferase,  $n = 4$  corresponding to number of rats per sex. Control: healthy rats given distilled water; Sat: Rats that received 2 ml/100 g of boiled water and observed 14 days more, after the end of the experiment, BW 0.5, BW1 and BW 2 represent groups of rats that received boiled water at doses of 0.5 ml/100 g, 1 ml/100 g and 2 ml/100 g bw respectively.

**Table 3.** Hematological profile of male rats given different doses of boiled water for 28 days.

Parameter	Control	0.5 ml/100 g	1 ml/100 g	2 ml/100 g	Satellite (2 ml/100 g)
Red blood cell ( $10^6/\mu\text{L}$ )	4.58±0.28	4.66±0.19	4.23±0.42	5.01±0.37	4.57±0.24
Haemoglobin (g/dL)	15.50±0.34	15.53±0.48	15.77±0.34	13.70±0.82	14.67±0.54
Hematocrit (%)	49.63±1.33	41.30±0.73	49.77±1.56	43.07±1.01	47.03±0.48
MCV (fL)	88.33±0.68	86.67±0.68	88.33±0.26	85.33±2.46	86.00±1.55
MCH (pg)	31.10±1.70	34.83±0.79	32.13±1.01	27.30±1.22	32.17±0.92
MCHC (g/dL)	31.87±0.16	33.93±0.61	33.70±1.28	32.70±0.95	32.90±0.99
White blood cell ( $10^3/\mu\text{L}$ )	7.97±0.14	7.93±0.25	8.30±0.35	8.83±0.96	7.93±0.29
Lymphocytes ( $10^3/\mu\text{L}$ )	2.63±0.36	3.73±0.52	3.57±0.29	4.77±1.12	4.00±0.65
Monocytes ( $10^3/\mu\text{L}$ )	0.25±0.05	0.37±0.20	0.30±0.18	0.27±1.31	0.37±0.05
Granulocytes ( $10^3/\mu\text{L}$ )	3.20±0.08	3.47±0.21	4.37±0.72	4.23±0.36	3.30±0.97
Platelets ( $10^3/\mu\text{L}$ )	356.0±19.3	360.7±4.5	362.3±29.4	446.3 ±3.2*	368.0±5.5

there was no significant difference on several parameters such as red blood cell counts, haemoglobin, hematocrit, mean corpuscular volume, mean corpuscular haemoglobin, mean corpuscular haemoglobin concentration, white blood cell counts, lymphocytes, and platelet. On the other hand, for monocytes the analyses showed a significant increase at the 2 ml/100 g dose ( $P < 0.05$ ). The number of granulocytes also increased significantly ( $P < 0.05$ ) at all doses when compared with

the control.

#### Histopathology study

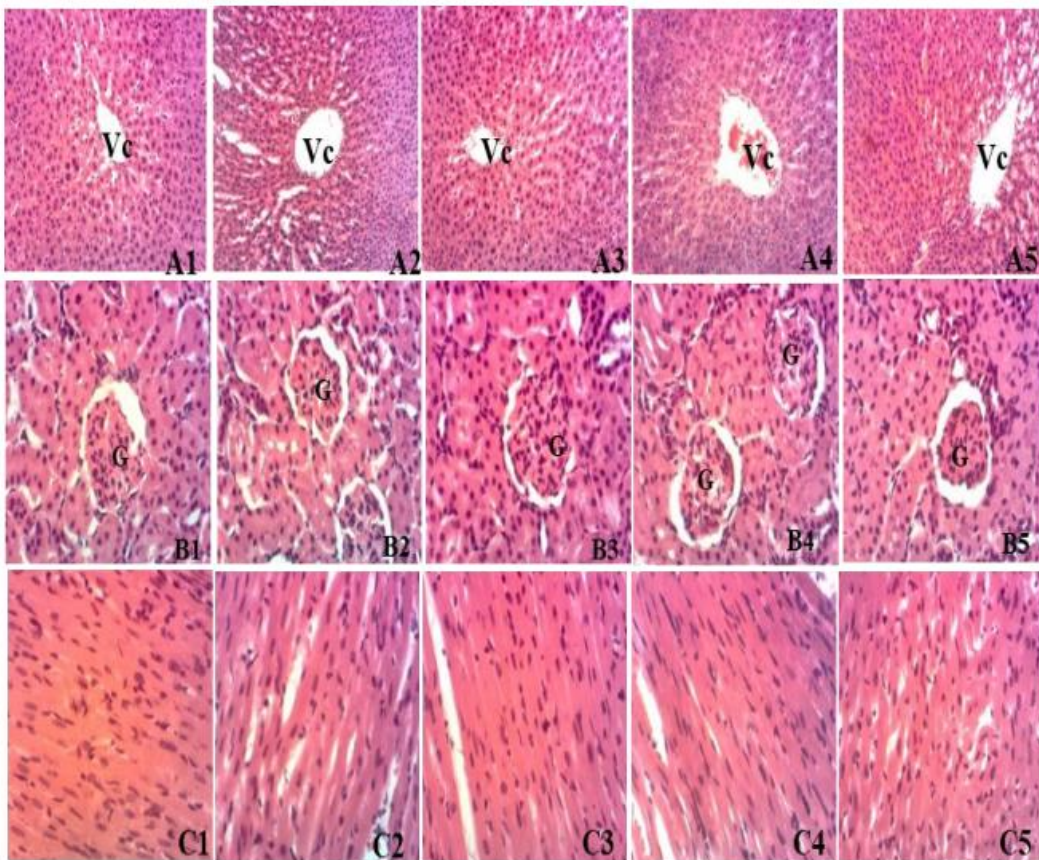
Figures 4 and 5 show the histopathology profile of male and female rats, respectively after 28 days of administration of the water sample. Light microscopic examination of sections of the kidney, liver, and heart of



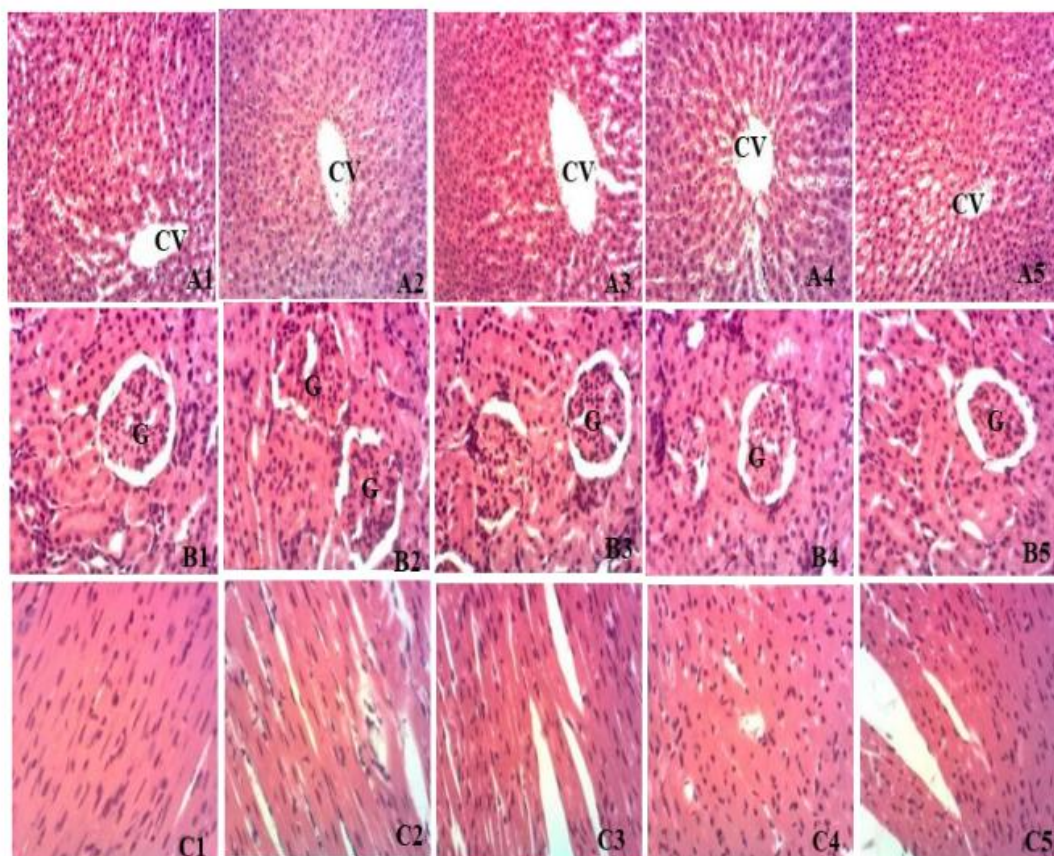
**Table 4.** Hematological profile of female rats given different doses of boiled water for 28 days.

Parameter	Control	0.5 ml/100 g	1 ml/100 g	2 ml/100 g	Satellite (2 ml/100 g)
Red blood cell ( $10^6/\mu\text{L}$ )	4.48±0.21	4.56±0.39	4.40±0.26	4.25±0.12	4.15±0.11
Haemoglobin (g/dL)	14.80±0.12	15.10±0.28	13.67±0.39	14.17±0.54	12.57±0.38
Hematocrit (%)	42.87±1.27	43.47±3.45	41.63±0.72	45.70±1.20	40.30±0.13
MCV (fL)	86.00±0.89	86.00±1.18	87.00±1.34	88.00±2.37	87.67±0.68
MCH (pg)	30.07±0.52	31.33±0.52	33.03±3.07	32.00±1.72	29.90±0.45
MCHC (g/dL)	31.83±0.68	32.40±1.95	32.23±1.19	31.10±0.85	31.90±0.18
White blood cell ( $10^3/\mu\text{L}$ )	7.80±0.20	7.77±0.23	7.63±0.09	8.33±0.35	7.95±0.31
Lymphocytes ( $10^3/\mu\text{L}$ )	2.07±0.49	2.87±0.42	3.13±0.63	2.97±0.23	2.50±0.24
Monocytes ( $10^3/\mu\text{L}$ )	0.37±0.14	0.32±0.08	0.30±0.11	0.49±0.31*	0.39±0.09
Granulocytes ( $10^3/\mu\text{L}$ )	1.80±0.29	2.70±0.76*	2.53±0.07 *	2.47±0.30*	1.93±0.11
Platelets ( $10^3/\mu\text{L}$ )	393.7±22.76	455.7±21.99	341.3±3.36	436.0±24.19	399.3±56.66

Values are expressed as mean ± SD; \* and \*\* = significantly different from the control group ( $p < 0.05$  and  $p < 0.001$ , respectively). MCV: Mean corpuscular volume, MCH: mean corpuscular haemoglobin, MCHC: mean corpuscular haemoglobin concentration, WBC: white blood cell, n = 4 corresponding to number of rats per sex. Control : Healthy rats given distilled water; Sat: Rats that received 2 ml/100 g of boiled water and observed 14 days more, after the end of the experiment, BW0.5, BW1 and BW 2 represent groups of rats that received boiled water at doses of 0.5 ml/100 g, 1 ml/100 g and 2 ml/100 g bw, respectively.



**Figure 3.** Histopathological examination of organs of male rats in a sub-chronic oral toxicity study. (A-C) the liver, kidney, and heart, respectively; and (1-5) the control, the low, middle, high dose and the satellite (highest) dose groups, respectively. G, Glomerulus; CV, Central Vein.



**Figure 4.** Histopathological examination of organs of female rats in a sub-chronic oral toxicity study. (A-C) the liver, kidney, and heart respectively; and (1-5) the control, the low, middle high dose and the satellite (highest) dose groups, respectively. G, Glomerulus; CV, Central Vein.

rats from the control group and those given a low dose (0.5 ml/100 g bw), medium dose (1 ml/100 g bw) and high dose (2 ml/100 g bw), showed a normal histology.

## DISCUSSION

As an initial step, an oral acute toxicity study was conducted. It was observed that irrespective of the sex and the treatment, an increase in weight of the same amplitude was observed with no statistical differences ( $p < 0.05$ ) between the test groups. Weight increase is an indication of growth. The reasonable homogeneous increasing trend of body and organ weight in all the groups of rats can be taken as an indication of the low effect of the different treatments on the animals' feeding and health. Njayou et al. (2010) observed that body weight may increase or decrease in relation to the sex, absence of toxicity or induced anorexia. The results show

that there was no mortality or abnormal behaviour or signs of toxicity after administration of the highest dose (2 ml/100 g bw) for up to 14 days. This shows that, according to the labeling and classification of acute systemic toxicity recommended by the OECD, the lethal dose may be above this dose limit, known as Class 5 status (OECD, 2001). Further investigation was conducted to evaluate the sub-chronic toxicity of rice husk boiled water for 28 days in rats.

Previous studies have shown that substances administered in chronic disease conditions may need toxicological evaluation of repeated doses (sub-chronic toxicity study), since daily use may result in accumulation in the body with gradual effects on tissues and organs (Abotsi et al., 2011; Bariweni et al., 2018). In this study, 28 days of oral toxicity evaluation of water boiled with rice husks, at doses of 0.5, 1 and 2 ml/100 g bw, did not show any adverse clinical signs or negative influences on behaviour and mortality in the test groups. Changes in

feed and water intake and body weight gain have been used as an indicator of the general health status of experimental animals (El Hilaly et al., 2004). Feed consumption is regulated through several complex biological mechanisms can ensure relatively constant body weight over long periods of time (Kuriyan et al., 2007). No significant difference in body weight gain of the male and female rats compared to the control was recorded. Again, in toxicity studies, changes in the weight of organs are sensitive indicators of toxicity, effects on enzymes, physiologic disturbances and target organ injury (Michael et al., 2007). An increase in organ weight suggests the occurrence of hypertrophy while a decrease suggests necrosis in the target organ (Teo et al., 2002). In this study, the relative organ weight of the liver and kidneys, heart, lungs and spleen evaluated in the test groups did not show a significant difference in both sexes at all doses compared to the control.

The study of biochemical parameters is an indicator of toxicity, raising the effectiveness or the installation of toxicity on vital organs. In this study, parameters like creatinine in male, total bilirubin, and uric acid in female rats showed significant differences between the test groups and controls. The dose of 1 ml/100 g in males significantly increased creatinine and at 2 ml/100 g bw administered in females, uric acid was also significantly increased ( $P < 0.05$ ) but total bilirubin significantly decreased. Creatinine is an excretion product of muscle activity, which circulates in blood. Its elimination is exclusively renal, so there is a correlation between creatinine levels and renal function. Most creatinine that is eliminated by the kidneys is freely filtered in renal glomeruli, and a small fraction is filtered by the tubular component, which is a good indicator of renal-glomerular function (Bohinski, 1991; Raju et al., 2016; Ghorbel et al., 2016; Belhadj et al., 2018). The decrease of these parameters would show the hepatoprotective action of boiled water sample at this dose. Uric acid is a waste product of nucleic acid metabolism (Wallace, 2004). It is formed by the liver and mainly excreted by the kidneys (65-75%) and intestines (25-35%) (Alvarez et al., 2010). In the present study, blood uric acid was high in female rats (2 ml/100 g), suggesting kidney malfunction (Raju et al., 2015, 2016; et al., 2018). The functioning of the liver was assessed by the serum total protein, bilirubin and albumin. An increase in these parameters is usually seen in cancerous conditions, or following high protein diet (Tietz et al., 1994). Our study showed a significant decrease in total bilirubin in the female rats at the dose of 2 ml/100 g suggesting the toxic effect of the boiled water on the liver of the animals. The total protein serum level did not differ significantly from the control group. This shows that the effect on the liver could be a mild toxic effect affecting only the female rats. Generally, it appeared that the water affected the females at a lower dose than the males, which were not affected.

Haematopoiesis is the process of blood cell formation.

Analysis of the hematological parameters is important in assessing the toxic effects of test substances, as well as in determining the physiological and pathological status of the body, as variations in these parameters may indicate toxicity associated with the test substances and various diseases and conditions, including anaemia, leukaemia, reactions to inflammation and infections (Olson et al., 2000; Martini et al., 2012). There was no significant difference in several parameters such as red blood cell counts, haemoglobin, hematocrit, mean corpuscular volume, mean corpuscular haemoglobin, mean corpuscular haemoglobin concentration, white blood cell counts, lymphocytes, and platelets between the treated groups and the control group, indicating that the boiled water had no effect on the circulating blood cells of the tested animals. For monocytes, the analyses showed a significant increase at the dose of 2 ml/100 g, the number of granulocytes also significantly increased ( $P < 0.05$ ) at all the doses when compared with the control in females. However, these differences obtained in this study do not show a hematological change, since they are within the normal range of these parameters for good health in this animal species (Giknis et al., 2008).

These differences obtained between the tested animals and the control could be explained by the presence of suspended matter such as the rice husk ash (RHA) in this boiled water. This RHA is found in the boiled water through the ventilation by the fan. According to Xu et al. (2012), ash has the highest proportion of silica content among all plant residues. The average composition of well-burnt RHA is 90% amorphous silica. The findings of this study are in line with those of Wai et al. (2017) who investigated the *in vivo* toxicity of Silica nanoparticles (SiNPs) of 150 nm in various dosages via intravenous administration in mice and showed that SiNPs were biocompatible and safe for *in vivo* use in mice.

The histology of the kidneys, liver and heart in the male and female rats did not produce any toxic changes, despite presenting some changes in biochemical tests; the histological study suggests the safety of the rice husk boiled water in these organs. This shows that rice husk used as fuel in PO150 gasifier stove is non-toxic, and therefore safe for cooking food.

## Conclusion

The results obtained in this work suggested that rice husk used as fuel is not toxic at all the doses studied (0.5, 1 and 2 ml/100 g bw) and did not produce any evident symptoms in the acute and sub-chronic oral toxicity studies in both male and female rats. The histological examination revealed no changes in the internal organs, like kidneys, liver and heart of the rats, in both the control and test groups. However, more studies are required to evaluate the safety of using rice husk for a longer period of time.

## CONFLICT OF INTERESTS

The authors have not declared any conflict of interests.

## ACKNOWLEDGEMENT

The authors are very grateful to the Laboratory of Animal Physiology, Department of Animal Biology, University of Yaoundé I – Cameroon, for providing the facilities for carrying out this research work.

## REFERENCES

- Abotsi WK, Ainooson GK, Gyasi EB, Abotsi WKM (2011). Acute and subacute toxicity studies of the ethanolic extract of the aerial parts of *Hillieria latifolia* (Lam.) H. Walt. (Phytolaccaceae) in rodents. *West African Journal of Pharmacy* 22:27-35.
- Alvarez-Lario B, Macarron-Vicente J (2010). Uric acid and evolution. *Rheumatology (Oxford)*, 49(11):2010–2015.
- Anderson PS, Wendelbo P, Reed TB, Belonio AT (2008). Super-clean combustion of solid biomass fuels in affordable TLUD cookstove. *Beyond Firewood: Exploring alternative fuels and energy technologies*.
- Baravalle C, Salvetti NR, Mira GA, Pezzone N, Ortega HH (2006). Microscopic characterization of follicular structures in letrozole-induced polycystic ovarian syndrome in the rat. *Archives of Medical Research* 37(7):830-839.
- Bariweni MW, Yibala OI, Ozolua RI (2018). Toxicological studies on the aqueous leaf extract of *Pavetta crassipes* (K. Schum) in rodents. *Journal of Pharmacy Pharmacognosy Research* 6 (1):1-16.
- Belhadj Benziane A, Dilmi Bouras A, Mezaini A, Belhadri A, Benali M (2018). Effect of oral exposure to acrylamide on biochemical and hematologic parameters in Wistar rats. *Drug and Chemical Toxicology* 42(2):157-166.
- Bhupinder Singh, in *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*, (2018). <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/rice-husk-ash>.
- Black RE, Cousens S, Johnson HL, Lawn JE, Rudan I, Bassani DG, Jha P, Campbell H, Walker CF, Cibulskis R, Eisele T, Liu L, Mathers C (2010). Global, regional, and national causes of child mortality in: a systematic analysis. *Lancet* 375(9730):1969–1987.
- Bohinski C. 5th ed. Editorial Addison – Wesley Iberoamericana; Wilmington: (1991). *Bioquímica*.
- Brown JR., Thornton JL (1957). Percivall Pott (1714-1788) and chimney sweepers' cancer of the scrotum. *British Journal of Industrial Medicine* 14:68–70.
- Dherani M, Pope D, Mascarenhas M, Smith KR, Weber M, Bruce N (2008). Indoor air pollution from unprocessed solid fuel use and pneumonia risk in children aged under five years: A systematic review and meta-analysis. *Bulletin of the World Health Organization* 86(5):390–398.
- El Hilaly J, Israïli ZH, Lyoussi B (2004). Acute and chronic toxicological studies of Ajuga iva in experimental animals. *Journal of Ethnopharmacology* 91(1):43–50.
- GEMS: Global Environment Monitoring System (1990). Assessment of Urban Air Quality. United Nations Environment Programme/World Health Organization, 1998. (Unpublished document cited in Chen BH, Hong CJ, Pandey MR, Smith KR. Indoor air pollution in developing countries. *World Health Statistics Quarterly* 43(3):127.
- Ghorbel I, Maktouf S, Fendri N, Jamoussi K, Ellouze Chaabouni S, Boudawara T, Zeghal N (2016). Co-exposure to aluminum and acrylamide disturbs expression of metallothionein, roinflammatory cytokines and induces genotoxicity: Biochemical and histopathological changes in the kidney of adult rats. *Environmental Toxicology* 9:1044-1058.
- Giknis MLA, Clifford CB (2008). Clinical laboratory parameters for Crl: CD (SD) rats Charles River Laboratories.
- IRRI World Rice Statistics Online Query Facility (2019). Results generated on Dec 29, 2019 19:01. Los Baños: International Rice Research Institute; <http://ricestat.irri.org:8080/wrsv3/entrypoint.htm>
- Kuriyan R, Raj T, Srinivas SK, Vaz M, Rajendran R, Kurpad AV (2007). Effect of *Caralluma fimbriata* extract on appetite, food intake and anthropometry in adult Indian men and women. *Appetite* 48(3):338-344.
- Lim SS, Vos T, Flaxman AD, Danaei G, Shibuya K., Adair-Rohani H, et al. (2012). A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: A systematic analysis for the global burden of disease study. *Lancet* 380:2224–2260.
- Martini FH, Nath JL, Bartholomew EF (2012). *Fundamental of Anatomy and Physiology*, 9th ed.; Pearson: San Fransisco, CA, USA; pp. 642–645, 776.
- Michael B, Yano B, Sellers RS, Perry R, Morton D, Roome N, Johnson JK, Schafer K (2007). Evaluation of organ weights for rodent and non-rodent toxicity studies: A review of regulatory guidelines and a survey of current practices. *Toxicologic Pathology* 35(5):742-750.
- Naeher LP, Brauer M, Lipssett M, Zelikoff JT, Simpson CD, Koenig JQ, Smith KR (2007). Wood smoke health effects: A review. *Inhalation Toxicology* 19(1):67-106.
- Ndindeng SA, Mbassi JEG, Mbacham WF, Manful J, Graham-Acquaah S, Moreira J, Dossou J, Futakuchi K (2015). Quality optimization in briquettes made from rice milling by-products. *Energy for Sustainable Development* 29:24-31.
- Ndindeng SA, Marco W, Sidi S, Koichi F (2019). Evaluation of fan-assisted rice husk fuelled gasifier cookstoves for application in sub-Saharan Africa. *Renewable Energy* 925-937.
- Njayou FN, Moundipa PF, Donfack JH, Djamen Chuisseu JH (2010). Hepato-protective, antioxidant activities and acute toxicity of a stem bark extract of *Erythrina senegalensis* DC. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 4(3):738-747.
- OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development (2001). *Guidelines for The Testing of Chemicals: Acute Oral Toxicity—Fixed Dose Procedure*, OECD/OCDE 423. Adopted: 17th December 2001.
- OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development (2008). *Guidelines for The Testing of Chemicals: Repeated Dose 28-Day Oral Toxicity Study in Rodents, Updated with Parameters for Endocrine Effects*, Guideline 407, Head of Publications Service, Paris, France.
- Olson H, Betton G, Robinson D, Thomas K, Monro A, Kolaja G, Lilly P, Sanders J, Sipes G, Bracken W, Dorato M, Van Deun K, Smith P, Berger B, Heller A (2000). Concordance of the toxicity of pharmaceuticals in humans and in animals. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 32:56–67.
- Raju J, Kocmarek A, Roberts J, Taylor M, Patry D, Chomyshyn E, Caldwell D, Cooke G, Mehta R (2016). Lack of adverse health effects following 30-weeks of dietary exposure to acrylamide at low doses in male F344 rats. *Toxicology Reports* 3:673–678.
- Raju J, Roberts J, Taylor M, Patry D, Chomyshyn E, Caldwell D, Cooke G, Mehta R (2015). Toxicological effects of short-term dietary acrylamide exposure in male F344 rats. *Environmental Toxicology and Pharmacology* 39:85–92.
- Reitman S, Frankel S (1957). A colorimetric method for the determination of serumglutamic oxalacetic and glutamic pyruvic transaminases. *American Journal of Clinical Pathology* 28(1):56-63.
- Rodier J, Mallein R (1983). *Enzymologie. Transaminases sériques (S.G.O.T et S.G.P.T)*. In: *Manuel de Biochimie Pratique*, Maloine SA (ed). Paris. pp. 396-400.
- Smith KR, Balakrishnan K, Butler C, Chafe Z, Fairlie I, Kinney P, Kjellstrom T, Mauzerall DL, McKone TE, McMichael AJ, Schneider M (2012). In: *Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future*, (Johansson TB, Patwardhan A, Nakicenovic N, Gomez-Echeverri L, eds). New York: Cambridge University Press for International Institute for Applied Systems Analysis, pp. 255–324;. *Energy and Health*.
- Teo S, Stirling D, Thomas S, Hoberman A, Kiorpes A, Khetani V (2002). A 90-day oral gavage toxicity study of d-methylphenidate and d, l-methylphenidate in Spraguee Dawley rats. *Toxicology* 179(3):183-196.
- Tietz WN, Prude EL, Sircgard-Anderson O (1994). *Tietz Textbook*

- of Clinical Chemistry. WB Saunders London, UK.
- Timothy SY, Helga BI, Bomai HI, Musa AH (2015). Acute and sub-chronic toxicity study of the aqueous and ethanolic extracts of *Mitragyna inermis* bark in albino rats. *International Journal of Pharmacology and Toxicology* 5(1):24-32.
- Torres-Duque C, Maldonado D, Pérez-Padilla R, Ezzati M, Viegi G (2008). Biomass fuels and respiratory diseases. A review of the evidence. *Proceedings of the American Thoracic Society* 5:577–590.
- Wai TC, Cheng CL, Jen S, Shang TT, Chih KL, Mei LC, Hung CL, Chun YY, Shao YH (2017). In vivo toxicologic study of larger silica nanoparticles in mice. *International Journal of Nanomedicine* 12:3421-3432.
- Wallace KL, Riedel AA, Joseph-Ridge N, Wortmann R (2004). Increasing prevalence of gout and hyperuricemia over 10 years among older adults in a managed care population. *Journal of Rheumatology* 31:1582–1587.
- Wei-Yen L, Seow A (2012). Invited review series: Air pollution and lung health: Biomass fuels and lung cancer. *Respirology* 17:20–31.
- Xu W, Lo TY, Memon SA (2012). Microstructure and reactivity of rich husk ash. *Construction and Building Materials* 29:541-547.