

**COLLOQUE INTERNATIONAL FRANCOPHONE
D'ENERGETIQUE ET MECANIQUE**

CIFEM 2012

2, 3 et 4 Mai 2012

OUAGADOUGOU, BURKINA FASO

COMITE SCIENTIFIQUE

PRESIDENT :

Thierry Maré IUT Saint Malo (France)

VICE-PRESIDENTS :

Yao Azoumah 2iE (Burkina Faso)

Ousmane Sow ESP (Sénégal)

MEMBRES :

Assiongbon Kankoe	Delaware State University (USA)	Menézo Christophe	CETHIL (France)
Azilinon Dorothé	ESP (Sénégal)	Miriél Jacques	IUT Rennes (France)
Azoumah Yao	2iE (Burkina Faso)	Muselli Marc	Université de Corse (France)
Benhamou Brahim	UCA Marrakech (Maroc)	Nasr George J.	Université de Libanaise (Liban)
Besq--Santa Cruz Alina	LUSAC (France)	Neveu Pierre	Université de Perpignan (France)
Blin Joel	CIRAD (Burkina Faso)	Nguyen Cong Tam G.	Université de Moncton (Canada)
Byrne Paul	INSA de Rennes (France)	Niang Fadel	UT (Sénégal)
Cissé Ibrahima Khalil	EPT (Sénégal)	Orfi Jamel	ENIM Monastir (Tunisie)
Colda Iolanda	UTCB (Roumanie)	Py Xavier	Université de Perpignan (France)
Coulibaly Yézouma	2iE (Burkina Faso)	Rousse Daniel	ETS Montréal (Canada)
Coulibaly Arona	ENI Bamako (Mali)	Roy Gilles	Université de Moncton (Canada)
Cristofari Christian	Université de Corse (France)	Sambou Vincent	ESP (Sénégal)
Fadel kébé Mouhamed	ESP (Sénégal)	Sayon Sidibé Dit	2iE (Mali)
Faye Mactar	U Bambey (Sénégal)	Sido Mariam	2iE (Burkina Faso)
Galanis Nicolas	Université de Sherbrooke (Canada)	Stouffs Pascal	Université de Pau (France)
Ganaoui Mohamed El	Université de Limoges (France)	Tahakourt Abdelkader	Université de Béjaïa (Algérie)
Gaye Salif	UT (Sénégal)	Talla André	Ecole Polytechnique de Yaoundé (Cameroun)
Hollmuler Pierre	Université de Genève (Suisse)	Tiffonnet Anne-Lise	LUSAC (France)
Lartigue Béangère	UPS Toulouse (France)	Toguyeni D.Y.K	U.O (Burkina Faso)
Lassue Stéphane	Université d'Artois (France)	Vaerenberg Stéfan Van	ULB (Belgique)
Le Pierres Nolwenn	Université de Savoie (France)	Zacharie Koalaga	U.O (Burkina Faso)

COMITE D'ORGANISATION

Eric Lépinasse	IUT Cherbourg Manche (France)
Ousmane Sow	EPT (Sénégal)
Daniel Yamegueu	2iE (Burkina Faso)
Henri Kottin	2iE (Burkina Faso)
Madieumbe Gaye	2iE (Burkina Faso)
Sylvain Thiombiano	2iE (Burkina Faso)
Yao Azoumah	2iE (Burkina Faso)

COORDINATION :

Yao Azoumah	2iE (Burkina Faso)
-------------	--------------------

PARTENAIRES

L'organisation a bénéficié du soutien des organismes suivants :



2iE Fondation 2iE

Ecole Polytechnique de Thiès



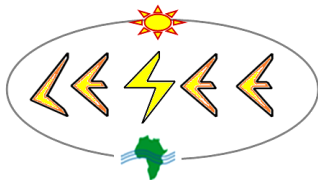
Ecole Polytechnique de Thiès



IUT de Saint Malo



Université de Rennes 1



Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE)



Sous le haut patronage de l'UNESCO



Union Européenne



Banque Africaine de Développement – Fonds
Africain de Développement



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

**Ambassade de France
au Burkina Faso**

Ambassade de France au Burkina Faso

PREFACE

La Fondation 2iE à travers son laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE), l'Ecole Supérieure Polytechnique de Thiès (EPT), l'Université de Rennes1 et le laboratoire LGCGM de l'INSA de Rennes ont la joie d'accueillir tous les participants du deuxième Colloque International Francophone en Energétique et Mécanique CIFEM 2012 qui se tient du 02 au 04 mai 2012 sur le campus de Ouagadougou de la Fondation 2iE au Burkina Faso.

Le CIFEM créé en 2009 est une occasion pour les chercheurs des pays du Sud, qui éprouvent souvent des difficultés à participer à des colloques de niveaux internationaux de mieux valoriser les résultats de leurs travaux de recherche. Le CIFEM se veut également une occasion de rapprochement entre chercheurs, enseignants-chercheurs, du nord et du sud et de création d'opportunités d'échanges et de collaborations, surtout pour les jeunes doctorants africains.

Dans le contexte énergétique actuel marqué en particulier par le retard (faible taux d'accès à l'électricité, inefficacité des modes de production, etc...) qu'accusent les pays du Sud par rapport au reste du monde, cette deuxième édition du CIFEM a été consacrée à la question de «**L'Energie et le développement au Sud** ». Plusieurs thématiques sont abordées, entre autres : l'énergie solaire, les transferts thermiques, les systèmes et procédés énergétiques, la thermique du bâtiment, l'efficacité énergétique, etc... 89 résumés ont été reçus et les actes du colloque contiennent 54 communications sur les thèmes ci-dessus cités. Nous osons croire que cette nouvelle édition du CIFEM sera, pour tous, l'occasion d'échanges scientifiques fructueux, et de partenariats nombreux.

Nos remerciements vont à l'endroit des membres du comité scientifique qui ont bien voulu assurer l'évaluation des différents articles contenus dans ces actes.

L'organisation de cette deuxième édition du CIFEM et la qualité de l'accueil qui vous a été réservé ont été rendus possibles avec le concours de nos différents partenaires cités dans les documents joints à ces actes. Cette édition du colloque comme la précédente a reçu le haut patronage de l'UNESCO.

En vous remerciant pour vos travaux et votre présence, nous vous souhaitons un bon colloque et un agréable séjour à Ouagadougou.

Yao AZOUMAH & Thierry MARE
Au nom du comité local d'organisation

SOMMAIRE

Procédés énergétiques et systèmes solaires photovoltaïques

COMMUNICATIONS ORALES

ART-5-3	Mamadou L. NDIAYE - Aminétou Mint M. FDIL - Boudy O. BILAL - Papa A. NDIAYE <i>Dimensionnement optimisé et simulation des systèmes électriques hybrides</i>	1
ART-10-24	M.C. AbdelFettah TOUABTI - A. SMATI <i>Modélisation et simulation des risques de défaillance des gazoducs en régimes dynamiques et transitoires</i>	7
ART-5-33	Marcel B. KEBRE - François ZOUGMORE - Soumaila OUEDRAOGO - Raguilignaba SAM - Zacharie KOALAGA <i>Modélisation numérique d'une cellule solaire en couches minces CIGS avec couche tampon alternative graduée</i>	15
ART-10-58	Cheikh MANSOUR - Abdelkader ADJA - Abdelhamid BOUNIF <i>Etude expérimentale et numérique de la conversion d'un moteur Diesel en DUAL FUEL</i>	21
ART-10-66	Daniel YAMEGUEU - Yao AZOUMAH - Xavier PY <i>Analyse énergétique et exergétique d'un système hybride PV/Diesel de cogénération d'électricité et de froid : Application au prototype Flexy Energy</i>	27
ART-5-67	Leon GAILLARD - Stéphanie GIROUX-JULIEN - Hervé PABIOU - Christophe MENEZO <i>Expérimentation à l'échelle 1 de composants Photovoltaïques Intégrés au Bâtiment (PVIB) en configuration double-façade naturellement ventilée</i>	33
ART-5-77	Leon GAILLARD - Christophe MENEZO <i>Modélisation et validation expérimentale des effets de mismatch thermiques sur les systèmes photovoltaïques intégrés aux bâtiments (PVIB)</i>	39
ART-13-84	Christophe DAVERAT - Hervé PABIOU - Hassan BOUIA - Shihe XIN - Christophe MENEZO <i>Caractérisation d'un écoulement de convection naturelle en canal vertical : Application aux double-peaux photovoltaïques</i>	44

ART-5-95 **Macaire Bienvenu AGBOMAHENA - Basile KOUNOUHEWA -
Théophile HOUNGAN - Olivier DOUHERET - Roberto
LAZZARONI - Norbert AWANOU - Antoine VIANOU** **50**
*Caractérisation du mécanisme de dégradation de dispositifs
photovoltaïques organiques fabriqués à l'air*

ART-14-92 **Daniel ROUSSE - Yvan DUTIL - Sadok BEN JABRALLAH -
Hassan HAMDI** **56**
Sadi Carnot : Une source d'inspiration toujours d'actualité

COMMUNICATIONS PAR POSTERS

ART-13-1 **Dalal LAAOUINA - Brahim BENHAMOU - Amin BENNOUNA** **62**
*Modélisation dynamique d'un habitat type villa à Marrakech muni
de systèmes passifs*

ART-5-35 **S. Sosthène TASSEMBEDO - S. Zacharie KAM - Zacharie
KOALAGA - François ZOUGMORE** **67**
*Modélisation, dimensionnement et simulation d'un système
photovoltaïque autonome : Cas d'un centre multimédia rural
burkinabé*

ART-3-71 **David B. TSUANYO - Yao AZOUMAH - Bruno BOUTEILLE** **73**
Modélisation et caractérisation d'une turbine de Tesla

ART-13-81 **Anne-Lise TIFFONNET - Eric LÉPINASSE - Florent
BOUCARD** **81**
*Modélisation de l'influence du rayonnement solaire sur la
transformation d'un COV émis par un matériau*

ART-5-89 **Mostafa MEHRTASH - Guillermo QUESADA - Yvan DUTIL -
Daniel ROUSSE** **86**
*Énergie photovoltaïque résidentielle: Implantation dans divers
pays*

ART-5-96 **Lucas WEISS - Mohamed AMARA - Christophe MENEZO** **91**
*Modélisation du potentiel de gain d'efficacité dans un module
photovoltaïque en silicium cristallin au travers d'une étude de
transfert de chaleur*

ART-2-36 **Sabiha AKLOUCHE-BENOUAGUEF - Belkacem ZEGHMATI -
Cheikh MBOW** **97**
*Les solutions multiples dans une cavité inclinée totalement
poreuse*

ART-5-34	Marcel B. KEBRE - François ZOUGMORE - Daouda OUBDA - Soumaila OUEDRAOGO - Zacharie KOALAGA <i>Influence de l'épaisseur de la couche tampon et de la température sur les propriétés d'une photopile en couches minces à base de CIGS</i>	103
ART-5-78	Lassina SANOU - David B. TSUANYO - Daniel YAMEGUEU - Yao AZOUMAH <i>Gestion des flux énergétiques d'un système de production d'énergie hybride PV/Diesel sans stockage : Cas du prototype "Flexy Energy"</i>	109

Transferts thermiques, efficacité énergétique et stockage

COMMUNICATIONS ORALES

ART-10-5	Noara IBRAHIMRASSOUL - Elkhider SIAHMED <i>Contribution à l'étude thermo hydraulique dans les procédés industriels : Cas d'un réacteur de recherche type MTR</i>	114
ART-6-10	Ghjuvan Antone FAGGIANELLI - Marc MUSELLI - Philippe POGGI - Christian CRISTOFARI - Philippe LACLAU - Ludovic FILIPPI <i>Retour d'expérience d'une installation de climatisation solaire intégrée à un bâtiment de recherche dans le bassin méditerranéen</i>	120
ART-1-48	Paul BYRNE - Jacques MIRIEL - Laurent SERRES - Redouane GHOUBALI <i>Etude simulée d'un système de dessalement d'eau de mer et de production de froid par thermofrigopompe couplée à des panneaux solaires</i>	126
ART-13-53	Aurélien OLISSAN - Clément KOUCHADE - Philippe ANDRE - Cossi Norbert AWANOU <i>Le confort thermique des bâtiments en région tropicale : Cas de quelques bureaux du rectorat de l'université d'Abomey Calavi (Cotonou-Bénin)</i>	132
ART-4-54	Gédéon CHAFFA - Emile A. SANYA - Mohamed Koïta SAKO - Yao N'GUESSAN <i>Analyse de l'efficacité énergétique des bâtiments climatisés en région chaude</i>	138
ART-10-76	Kokouvi Edem N'TSOUKPOE - Nolwenn LE PIERRÈS - Lingai LUO <i>Stockage de chaleur solaire à long terme basé sur l'absorption de l'eau par le bromure de lithium</i>	144

ART-6-82	Redouane GHOUBALI - Paul BYRNE - Jacques MIRIEL - Frédéric BAZANTAY <i>Simulation du couplage d'une thermofrigopompe à différents types de bâtiments – Intérêt de la production simultanée</i>	150
ART-9-91	Patrick BELZILE - Stanislaw KAJL - Daniel ROUSSE - Louis LAMARCHE - Yvan DUTIL <i>Stockage thermique dans l'eau pour des applications de chauffage au Québec</i>	156
ART-5-73	Hamed SANKARA - Yao AZOUMAH <i>Méthodologie de sélection des sites pour la production durable d'électricité aux services des populations rurales et périurbaines en Afrique : Application au concept « Flexy-Energy »</i>	162
ART-1-97	Anouar RICH - Youssef MANDRI - Denis MANGIN - Mohamed EL GANAOUI - Jean-Paul KLEIN - Tijani BOUNAHMIDI - Ahmed BOUHAOUSS - Stéphane VEESLER <i>Procédé de dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froide : Influence des conditions opératoires</i>	168
ART-3-80	Gavin G.W. LEE - William D.E. ALLAN - Kiari GONI BOULAMA <i>Étude numérique et expérimentale sur l'écoulement dans le tube diffuseur d'une turbine à gaz Allison 250</i>	174
ART-10-52	Manuel Alejandro FULA ROJAS - Fabio Emiro SIERRA VARGAS - Pascal STOUFFS <i>Étude paramétrique globale de l'influence des transferts thermiques au travers des parois des cylindres d'un moteur ERICSSON</i>	180
ART-7-51	Salma HALELFADL - Thierry MARÉ - Stephan VAN VAERENBERGH - Patrice ESTELLÉ - Mohamed MOJAHED <i>Caractérisation expérimentale des propriétés physiques et évaluation des performances thermohydrodynamiques du nanofluide à base de nanotubes de carbone</i>	186
<u>COMMUNICATIONS PAR POSTERS</u>		
ART-15-68	Yannick A. KEDOWIDE - Monika WOLOSZYN - Nolwenn LE PIERRES <i>Synthèse sur les dispositifs expérimentaux d'étude des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les parois des bâtiments</i>	192
ART-4-99	Alexis KEMAJOU - Léopold MBA - Gaël PAKO MBOU <i>Efficacité énergétique dans les bâtiments climatisés en zones tropicales</i>	198

ART-13-102	Jacques Rémy MINANE - Yézouma COULIBALY <i>Evaluation du confort thermique dans différents secteurs de la ville de Ouagadougou</i>	204
ART-10-90	Nicolas LACROIX - Daniel ROUSSE - Robert HAUSLER <i>Analyse des techniques de valorisation énergétique des boues d'épuration municipales</i>	208
ART-10-25	M.C. AbdelFettah TOUABTI - Messaoud GUELLAL <i>Analyse transitoire de la phase de conception d'un réseau complexe de gazoducs</i>	212
ART-13-44	Youness AJAJI - Philippe ANDRÉ <i>Evaluation de la qualité de ventilation d'un système double flux avec récupération de chaleur, par la méthode de décroissance du gaz traceur</i>	221

Matériaux et transferts thermiques

COMMUNICATIONS ORALES

ART-7-4	Sébastien FERROUILLAT - André BONTEMPS - Olivier PONCELET - Olivier SORIANO - Jean-Antoine GRUSS <i>Influence de la nature du matériau et du facteur de forme de nanoparticules sur les performances énergétiques de nanofluides. Cas de nanoparticules de ZnO et de SiO₂</i>	227
ART-12-20	Benoît MERCKX - Patrick DUDOIGNON - Jean-Philippe GARNIER - Damien MARCHAND - Claude LAFOREST <i>Application de la méthode du fil chaud pour suivre l'évolution de conductivité thermique d'éco-matériaux : Exemple de bétons de chaux-chanvre</i>	233
ART-4-39	Eric Serges NOUMI - Marie-Hélène DABAT - Joël BLIN <i>Développement durable de la transformation traditionnelle du karité en valorisant énergétiquement les résidus organiques</i>	239
ART-2-47	Benoît Fanou Z. FAGLA - Michel GRADECK - Michel LÉBOUCHÉ <i>Etude expérimentale de la thermique des suspensions « solide-liquide » non newtoniennes de grosses sphères dures à base de Tylose en écoulement dans une conduite complexe horizontale</i>	247
ART-13-65	Damien SGORLON - Julien RAMOUSSE - Gilles FRAISSE - Ye Weon KIM <i>Etude comparative de différents systèmes de couplage d'une PACTE Air-Air à un bâtiment basse consommation</i>	253

ART-15-70	Issiaka TRAORE - David LACROIX - Gérard JEANDEL - Helisoa RAFIDIARISON - Romain REMOND - Eric MOUGEL <i>Etude numérique et expérimentale des transferts de chaleur et de masse dans une paroi de construction bois avec une lame d'air</i>	259
ART-15-72	Aristide Comlan HOUNGAN - Malahimi ANJORIN - Alain ADOMOU - Léandre Mathias VISSOH - Patrick PERRE - Antoine VIANOU <i>Détermination de la diffusivité massique de deux matériaux locaux de construction au Bénin</i>	265
ART-13-93	David TOGUYENI - Ousmane COULIBALY - Abdoulaye OUEDRAGO - Jean KOULIDIATI - Yvan DUTIL - Daniel ROUSSE <i>Étude de l'influence de matériaux locaux isolants de toiture sur les charges de climatisation d'une maison individuelle en argile-paille</i>	271
ART-13-83	Laurie KARIM - Laurent ROYON - André BONTEMPS <i>Intégration de Matériaux à Changement de Phase (MCP) dans les planchers pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère du bâtiment</i>	275
ART-14-101	Clément AHOUANNOU - Chakirou A. TOUKOUROU - Séfiou J. AVAMASSE - Emile A. SANYA - Yves JANNOT <i>Caractérisation thermomécanique des blocs de terre comprimée avec ajout de sciure de bois</i>	280

COMMUNICATIONS PAR POSTERS

ART-10-26	William FOTSEU - Joel BLIN - Lassana SANA - Sayon SIDIBE <i>Caractérisation et amélioration d'un foyer à cuisson de «Dolo» équipé d'un bruleur à huile végétale (Jatropha)</i>	286
ART-15-23	Messaoud GUELLAL - Mohamed CHARIFI - M.C. Abdelfettah TOUABTI <i>Estimation par méthode inverse des propriétés thermophysiques d'un matériau composite</i>	292
ART-15-28	Eric ODUNLAMI - Malahimi ANJORIN - Aristide C. HOUNGAN - Elisabeth ALLOGNON - Armand A. DJOSSOU - Antoine VIANOU <i>Détermination de la diffusivité thermique du composite ciment-sciure de bois en fonction de sa teneur en eau par les méthodes du régime régulier et inverse</i>	298

ART-13-29	Valery K. DOKO - Aristide C. HOUNGAN - Edmond ADJOVI - Dany Y. AYITE - Koffi BEDJA <i>Béton léger à base de balles de riz : Etude de la conductivité thermique</i>	304
ART-5-27	Jean-Louis CANALETTI - Christian CRISTOFARI - Gilles NOTTON <i>Un concentrateur solaire autonome à lames orientables</i>	310
ART-14-100	Atef MAZIOUD - Jean Félix DURASTANTI - Youcef SFAXI <i>Détermination expérimentale des coefficients d'échange d'un tube corrugué</i>	315
ART-9-103	Pierre SORVIL - Stefan VAN VAERENBERGH - Carlo S. IORIO <i>Projet d'hydrogène hydroélectrique, quelques éléments d'analyse économique de la production à la distribution</i>	320

DEVELOPPEMENT DURABLE DE LA TRANSFORMATION TRADITIONNELLE DU KARITE EN VALORISANT ENERGETIQUEMENT LES RESIDUS ORGANIQUES

Eric Serghes NOUMI^a, Marie-Hélène DABAT^{a,b}, Joël BLIN^{a,b,*}

^a Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), Rue de la Science 01 BP 594, Ouagadougou 01, Burkina Faso

^b Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), avenue Kennedy - BP 596, Ouagadougou - Burkina Faso

RÉSUMÉ

Le karité (arbre fruitier *Vitellaria paradoxa*) est un produit forestier non ligneux donc le beurre extrait est utilisé dans l'alimentation, l'industrie et la pharmacie. La filière karité est promue au Burkina Faso pour diversifier les sources de revenus dans l'ensemble du pays. Le processus de production du beurre est essentiellement artisanal, avec a la fois une très mauvaise gestion de la consommation d'énergie et beaucoup de déchets générés non valorisés. L'article évalue le potentiel et les impacts socio-économiques et environnementaux de pratiques énergétiques économes et de l'utilisation des déchets comme combustibles dans la région Est du Burkina Faso. Il repose sur l'enquête et l'observation d'un échantillon raisonné de collectrices de fruits et de productrices de beurre aux pratiques traditionnelles ; ainsi que sur des mesures de consommation énergétique. Le bois est la seule source d'énergie utilisée dans toute la filière karité. Les modifications de pratiques proposées pour limiter la consommation de bois consistent en l'adoption de foyers améliorés en banco pour la cuisson des noix, de foyers améliorés métalliques et de torréfacteurs à gaz pour le traitement des amandes ; et en l'utilisation des coques et des boues de barattage à la place du bois de feu comme biocombustibles. L'adoption de ces pratiques induit une augmentation conséquente du revenu des agents pour un investissement à leur portée tout en maintenant les habitudes collectives de travail et en contribuant à la préservation de la forêt.

Mots Clés : efficacité énergétique, beurre de karité, bois de chauffe, durabilité, résidus, Burkina Faso

1. INTRODUCTION

Le karité est un arbre fruitier sauvage des savanes arborées d'Afrique subsaharienne [1]. Son fruit renferme une ou deux noix qui contiennent une amande dure dont est extrait le beurre de karité [1]. Ce dernier est très utilisé localement à des fins alimentaires, médicinales (maladies de la peau et pulmonaire, etc.) et cosmétiques [2-3]. Depuis le début des années 2000, le beurre de karité revêt aussi un intérêt industriel à l'échelle mondiale avec la directive de l'Union Européenne d'autoriser son incorporation jusqu'à 5% comme additif au chocolat [4]. Pour les pays producteurs Africains, dont les principaux sont le Nigéria, le Mali, le Burkina Faso et le Ghana, cet engouement industriel est une aubaine pour leur développement économique et social.

La production de beurre de karité au Burkina Faso est une activité essentiellement féminine, et 300 000 à 400 000 femmes s'y consacraient à l'échelle nationale [5]. Dans les zones les plus productrices, les produits dérivés du karité peuvent fournir 20% du revenu d'une famille rurale [5]. Le beurre est extrait de manière traditionnelle et il est principalement destiné aux usages locaux. Deux types de groupements sont impliqués dans la valorisation du karité dans le pays. Il existe un petit nombre de groupements de femmes bien organisés (moins d'une dizaine à l'échelle du pays), qui ont mécanisé une partie

de leurs activités et sont présentes sur le marché international du karité conventionnel voire biologique et/ou équitable. Les autres groupements utilisent des techniques traditionnelles ; ils dégagent de faibles revenus et rencontrent des difficultés à développer leurs marchés. L'activité s'y déroule généralement en deux phases. La première phase est la collecte des fruits de karité dont sont extraites les amandes. Ce travail est effectué par des « collectrices » durant une période de récolte qui s'étale pendant la saison des pluies, de juin à septembre, en même temps que les travaux sur les cultures vivrières (sorgho, arachide...) et de rente (coton). La seconde phase est la transformation de ces amandes en beurre, elle se déroule généralement au sein de groupement de femmes appelées « transformatrices ». La méthode la plus répandue pour transformer l'amande de karité en beurre est celle qui implique un barattage manuel.

Les principaux appuis des ONG et des projets de coopération pour appuyer les groupements impliqués dans la filière karité ; portent sur l'organisation sociale des groupements et la modernisation du travail des femmes, pour mieux tirer parti de leurs savoir-faire locaux ; ou encore l'amélioration de la qualité de leur produit pour mieux se positionner sur les marchés [1, 6-11]. Mais les innovations proposées coûtent trop cher, ou sont inadaptées aux pratiques locales. Certaines ont échoué du fait qu'elles n'ont pas tenu compte de la fonction

* auteur correspondant

Adresse électronique : joel.blin@cirad.fr

sociale du travail collectif ou alors du fait que l'accès à l'énergie (électricité ou force motrice) est très difficile et onéreux en milieu rural [10, 12-13].

La filière karité traditionnelle fait face à de multiples problèmes, à la fois environnementaux, techniques, et socio-économiques : la pression sur la ressource en bois de feu, qui se traduit par la pénibilité de la recherche du bois de plus en plus loin du village ou par des dépenses importantes à l'achat [14] ; les maladies respiratoires causées par les fumées de foyers [15] ; la faiblesse des revenus liée à l'impossibilité d'accéder aux marchés rémunérateurs à cause de la faible qualité du beurre. Il paraît donc essentiel pour l'avenir de cette filière de rationaliser les processus de transformation et l'utilisation raisonnée et durable des ressources énergétiques.

Malgré la multitude d'actions menées sur la filière karité en Afrique de l'Ouest et les nombreux travaux sur la gestion de cette ressource [16-18] aucune proposition d'innovation n'a portée sur l'optimisation de la consommation d'énergie et sur la valorisation énergétique des sous-produits. Suite à ces constats, cet article présente les résultats d'une étude focalisée sur l'efficacité énergétique de la production du beurre de karité au Burkina Faso. Tirant parti des échecs des précédentes tentatives de modernisation de la filière [13, 19], les auteurs considèrent que trois conditions doivent être remplies pour assurer les meilleures chances d'appropriation du changement technique par les acteurs locaux: (i) la préservation du caractère social du travail collectif, (ii) la modération du saut technologique de façon à ce qu'il reste à la portée des femmes (iii) et la disponibilité locale des équipements proposés. Dans ce but, des techniques énergétiques potentiellement durables et faciles d'accès ont été explorées, elles répondent aux trois critères suivants : consommant moins d'énergie que les pratiques traditionnelles, permettant le recyclage des déchets, et augmentant la rentabilité de la transformation.

La méthode employée repose sur des travaux d'enquêtes et d'observations des techniques utilisées et des pratiques d'un échantillon raisonné de collectrices de fruits et de productrices de beurre ; ainsi que sur des mesures de flux (matière et énergie) chez ces dernières. L'article présente d'abord les résultats de l'étude de référence de la filière sur la base de critères technique (organisation du travail, identification des étapes, bilan énergétique), économique (coût de production et rentabilité initiale) et environnementale (Ha déboisés, CO₂ non renouvelable émis). Il propose ensuite l'introduction de nouveaux outils (techniquement « simples ») de conversion et transmission de chaleur dans la filière permettant entre autres de valoriser les résidus de la filière et analyse les impacts potentiels de la mise en œuvre de ces propositions. Enfin, l'article évalue et compare l'introduction de ces outils techniques sous forme de divers scénarii à la situation de référence (impact financier et environnemental sur la filière).

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. SITUATION DE REFERENCE

Les données nécessaires ont été recueillies par enquêtes, observations et mesures auprès des productrices. Une enquête préliminaire a permis de choisir le site d'étude et de définir un échantillon pour le sondage de la situation de référence.

2.1.1. Site d'étude

L'étude a été conduite dans la région Est du Burkina Faso, sur un territoire incluant la ville de Fada N'Gourma et deux villages proches : Diapangou (située à 18 km à la sortie Ouest de Fada) et Bomouana (située à 40 km à la sortie Est de Fada). Cette zone, moyennement peuplée en karité avec une densité approximative de 20 arbres/ha [20], est représentative de la filière karité burkinabé, en termes de type d'acteurs impliqués, de techniques utilisées, de qualité du beurre produit et de gestion énergétique. Diancoumba et al. [20] ont pu estimer que la production d'amande et de beurre de karité dans cette région était de 10 000 tonnes et concernait 52 000 ménages (production nationale d'amandes de karité 2005 : 122 100 tonnes). D'après ces mêmes auteurs, 18% de la production nationale d'amandes étant en moyenne destinés à l'exportation, la quantité d'amandes exportée à partir de la région Est serait d'environ 1 800 t, et 8 200 tonnes seraient donc transformées localement en beurre.

2.1.2. Enquête auprès d'un groupement échantillon

Nous avons choisi de façon empirique et raisonnée les personnes à enquêter étant donné la difficulté à connaître la population exhaustive des agents de la filière karité. Un seul groupement de transformatrices a été choisi pour établir la confiance et la précision, le groupement Yemboado de la ville de Fada N'Gourma qui compte 42 membres. L'enquête de 22 opératrices de ce groupement a permis de collecter les données sur la transformation des amandes. Ces amandes viennent essentiellement des deux villages Diapangou et Bamouana. Et c'est dans ces villages que nous avons obtenu les données sur la récolte des fruits de karité par enquête auprès de 30 collectrices.

Les questionnaires de ces deux enquêtes ont porté sur: la description des pratiques de collecte et de transformation, les quantités d'amandes et de beurre obtenus, les équipements (type, durée de vie, coût, fréquence d'utilisation), le temps de travail par étape, les prix de vente des amandes et du beurre. Ces informations ont permis de calculer les coûts de transformation des amandes et du beurre et d'établir les comptes d'exploitation des collectrices et des transformatrices. Le bilan financier a pris en compte l'amortissement des équipements (cuvettes, marmites, charrettes, ânes, foyers, etc.) la main-d'œuvre familiale estimée au salaire agricole local (soit 71.43 FCFA h⁻¹, 7 h j⁻¹), le bois, les autres consommables (eau, paniers, louche de cuisine, sac de jute, étal en plastique) et les taxes.

2.1.3. Mesures énergétiques des étapes de transformation

Les consommations énergétiques et l'efficacité des équipements de cuisson, de séchage ou de torréfaction ont été mesurées expérimentalement. Ces mesures ont concerné les étapes utilisant l'énergie thermique facilement quantifiable — combustion de bois, séchage solaire. Nous avons appliqué le test d'ébullition, dit WBT (Water Boiling Test) [21] pour déterminer l'efficacité des foyers de combustion et pour estimer l'énergie consommée pour les étapes utilisant la combustion de bois. Nous avons utilisé pour la mesure du WBT : une balance précision à 1% (marque Soehnle et série 63558) pour les différentes masses, un thermocouple et une centrale d'acquisition (343 Dual K-type thermometer) pour les températures et un chronomètre (Hanhart, digital décompte multifonctions Delta E 200) pour la durée des manipulations.

2.1.4. Détermination du potentiel énergétique des résidus

Les coques des noix de karité et les boues de barattage séchées, qui sont des résidus traditionnellement jetés, ont été analysées en tant que biocombustible solide de substitution au bois de feu. Les échantillons analysés ont été prélevés chez les collectrices et dans le groupement enquêtés. L'analyse immédiate coques et des boues de barattage a été réalisée suivant la norme AFNOR NF ISO 665 [22]. Nous avons ainsi obtenu la teneur en humidité, le taux de matière volatiles, le taux de cendre, et le taux de carbone fixe de ces deux biocombustibles solides. Leur pouvoir calorifique inférieur anhydre (PCI) a été mesuré selon la norme AFNOR NF M 03-005 [22]. La bombe calorimétrique utilisés pour la mesure du PCI est de modèle K 61265 USA de marque Parr Instrument. Le rapport entre les PCI du bois et PCI d'un type de résidu de karité permet de calculer la masse nécessaire de chaque type de combustible pour fournir la même énergie qu'une masse de bois donnée :

$$\text{masse résidu karité} = \frac{\text{PCI}_{\text{bois}}}{\text{PCI}_{\text{résidu karité}}} * \text{masse du bois}$$

Nous avons ensuite identifié le mode de valorisation énergétique entre toutes celles applicables à la biomasse (combustion, méthanisation, pyrolyse, etc.), la plus adéquate pour chacun des deux types de résidus.

2.2. LES COMPOSANTES ANALYTIQUES DE LA SITUATION DE REFERENCE

La situation de référence correspond à celle observée sur le terrain durant les enquêtes, c'est la situation actuelle de femmes qui utilisent des techniques traditionnelles. L'organisation du travail, les étapes de production, les outils utilisés et le produit obtenu, sont propres au savoir-faire des productrices. Toutes les mesures ont été prises pour un même volume des ressources initiales en karité chez les productrices. C'est-à-dire 100 kg de fruits pour les collectrices et 100 kg d'amandes pour les transformatrices.

2.2.1. Analyse des flux de matière et d'énergie

Les flux de matière des productrices donnent l'évolution quantitative des intrants et des résidus générés. Elles permettent de calculer le rendement de production de différentes étapes et d'établir le rapport entre les masses des résidus générés à la masse de matière premières. Les flux d'énergie est correspondent à la consommation en énergie calorifique pour les étapes énergétiques des transformations (cuisson, torréfaction, clarification, séchage).

2.2.2. Analyse financière

A partir des données financières recueillies par enquête, nous avons calculé le coût de revient total (pour 100 kg de fruits frais ramassés pour les collectrices, ou pour 100 kg d'amandes transformées pour les transformatrices) puis le coût de revient unitaire au kilo. La marge a été calculée par différence entre les produits et les coûts. Le taux de rentabilité financière de l'activité a été calculé par le rapport entre la marge et les coûts totaux de production. Ces indicateurs financiers (coût de revient, marge, taux de rentabilité), ont d'abord été calculés pour la situation de référence de la filière et ensuite pour les différents scénarios analysés.

2.2.3. Analyse d'impact environnemental

Les étapes de production d'amandes puis de transformation en beurre émettent du dioxyde de

carbone (CO₂) issu de la combustion du bois, ainsi que du méthane (CH₄) issu de la décomposition anaérobie des coques laissées à l'abandon. L'analyse environnementale a déterminé la surface (ha) déboisée et la quantité de CO₂ non renouvelable émis par les activités dans la filière. Nous avons fait l'hypothèse que tout le CO₂ émis lors de la combustion du bois de feu était d'origine non renouvelable. En effet, au Burkina Faso, les taux de prélèvement de bois de feu sont beaucoup plus élevés que les taux d'accroissement naturel des forêts, et la déforestation qui en résulte est accentuée à proximité de zones urbaines [23]. Nous nous sommes basés sur le rapport du programme régional des promotions des énergies domestiques et alternatives au Sahel (PREDAS) [24], qui précise que la production forestière de la région Est du Burkina Faso est de 6.2 t ha⁻¹.

Les séquestrations de CO₂ par les arbres à karité n'ont pas été quantifiées ni prises en compte car les parcs à karité constituent un couvert végétal pérenne. De même, nous n'avons pas quantifié les émissions de CH₄ issues de la fermentation des coques et des boues de barattage car la littérature est pauvre sur ce paramètre.

Les émissions de CO₂ ont été calculées en multipliant les quantités de vecteur énergétique utilisé (bois, coques, boues, gaz butane) par leur facteur d'émission. Le calcul du facteur d'émission du bois a été fondé sur deux hypothèses : (i) le bois utilisé pour la cuisson étant issu de plusieurs essences, nous avons utilisé un facteur d'émission spécifique moyen ; (ii) ce bois a une humidité moyenne de 10% et contient en moyenne 50% de carbone [25] qui se transforme en totalité en CO₂ au cours d'une réaction de combustion. Le facteur d'émission spécifique moyen du bois ainsi estimé a été de 1.65 kgeqCO₂ kg⁻¹ matière sèche bois. Pour les coques et des boues, nous avons considéré que les gaz de combustion étaient de même nature que ceux du bois (CO₂). Les facteurs d'émission ont donc été calculés sur le même principe. L'analyse chimique élémentaire de ces biocombustibles solides ayant permis d'obtenir leur teneur en carbone, les facteurs d'émission appliqués ont été de 1.72 kg eqCO₂ kg⁻¹ matière sèche coques et de 2.11 kg eqCO₂ par kg⁻¹ matière sèche boues de barattage. Pour le gaz butane, nous avons utilisé le facteur d'émission de 2.12 t eqCO₂ m⁻³ butane [25].

2.3. PROPOSITIONS ET EVALUATION DES TECHNIQUES ALTERNATIVES

Sur la base de l'analyse des données collectées, la situation de référence est établie et fait ressortir plusieurs contraintes techniques. Suit une identification des alternatives techniques pour lever ces contraintes. Ces alternatives sont évaluées à flux d'énergie fixes, c'est-à-dire égaux à ceux de la situation de référence. Une fois le besoin en énergie connu, la nouvelle consommation de combustible bois se détermine en tenant compte de l'amélioration qualitative des outils de transmission de chaleur (rendement) et de l'introduction de nouveaux combustibles (coques, boues de barattage). Les indicateurs de performance financière ont été mesurés à partir de la simulation de nouvelles situations qui mettent en jeu des propositions de changements de pratiques énergétiques et de valorisation de résidus ou des combinaisons de ces propositions. Ces indicateurs ont ensuite été comparés avec les indicateurs de référence pour apprécier les effets des modifications suggérées. L'estimation des techniques alternatives s'inspire de la méthode

d'analyse d'impact économique et environnemental de Morin [27] et Daskalopoulos [28]. Cette méthode néglige les variations liées aux conditions expérimentales du scénario de référence.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. ANALYSE DE LA SITUATION DE REFERENCE

3.1.1. Production d'amandes de karité à partir des fruits frais

Les femmes ramassent d'abord les fruits tombés des arbres dans leurs propres parcelles de cultures et, selon leur disponibilité, elles peuvent aussi récolter les fruits sur des terres plus éloignées – forêt, jachère... Chaque femme transforme individuellement sa récolte de fruits en amandes par des étapes successives. Les fruits sont d'abord laissés en tas au champ sous un arbre, trois jours au plus: ils se dépulpent ainsi naturellement pour donner des noix. Toutefois, la pulpe peut être manuellement enlevée et occasionnellement consommée. La pulpe fraîche, très sucrée, est très appréciée comme friandise. Les noix obtenues sont ensuite transportées à la maison par les femmes, en ballot sur la tête, ou plus rarement à dos d'âne ou en charrette. Pour stopper la germination, les noix sont bouillies dans des mammites chauffées par des foyers à bois constitués de trois pierres, la fin de cuisson étant jugé « empiriquement » par le changement de couleur des noix qui initialement marron clair deviennent marron vif. Cette cuisson sert aussi à stabiliser les noix, c'est-à-dire à inactiver les enzymes lipolytiques responsables de leur éventuelle dénaturation [11]. Les noix sont ensuite étalées sur le sol et séchées au soleil pendant 4 à 10 jours. Elles sont alors décortiquées, par pilonnage dans un mortier ou par battage avec un morceau de bois. Les coques sont jetées en tas dans un coin où elles se décomposent en dégageant du méthane, comme toute matière végétale en décomposition [26]. Les amandes obtenues sont conservées jusqu'en saison sèche dans un coin de la case, à l'abri de l'humidité et pour les femmes les plus nanties dans des sacs.

Avec 100 kg de fruits frais, les collectrices obtiennent en moyenne 50.00 kg ± 1.05 de noix brutes fraîches et environ 50.00 kg de pulpe fraîche. Après cuisson, séchage et décorticage des noix, elles obtiennent 19.75 kg ± 0.78 d'amandes, ce qui est cohérent avec les rares résultats publiés [27] ; et 7.25 kg ± 1.42 de coques de noix. Avec un pouvoir calorifique inférieur (PCI) anhydre de 19 962 kJ kg⁻¹ (tableau 1), les coques sont de bons biocombustibles, meilleurs que le bois, dont le PCI anhydre est de 18 000 kJ kg⁻¹ [21] : 0.84 kg de coques sèches peut remplacer 1 kg de bois (tableau 1).

Biocombustible	Humidité (%)	Matière volatile (%)	Cendre (%)	Carbone fixe (%)	Pouvoir calorifique anhydre PCI (kJ kg ⁻¹)	Pouvoir calorifique anhydre PCS (kJ kg ⁻¹)	Teneur en
Coque	18.0 ±0,2	77.2± 0.4	1.1± 0.1	21.6 ±0.5	19 962	20 707	57
Boue de barattage	33.1 ±0.4	63.7± 0.1	6.6± 0.8	29.6 ±0.9	30 158	30 903	85

*PCI bois [28]

Tableau 1. Pouvoir calorifique des résidus issu de la filière de transformation des fruits de karité en beurre (région Est, Burkina Faso).

La cuisson des noix issues de 100 kg de fruits frais au bois de feu sur foyer à trois pierres consomme en

moyenne 28.34 kg de bois, soit 20 857 kJ. Cette consommation de bois est élevée et s'explique par le fait que les rendements moyens calculés des foyers sont de l'ordre de 5%. Pour le séchage la durée réelle d'exposition au soleil des noix issues des 100 kg de fruits frais étant 49 h ± 2 étalé sur 7 jours, la consommation énergétique est évaluée à 2 611.57 kJ, soit une puissance fournie de 14.81 W. Cependant, le karité est récolté en saison humide au moment de la mise en place de la campagne agricole. Les femmes n'ont pas le temps de contrôler le séchage des noix, que le manque d'ensoleillement rend long et difficile. Or des études sur la qualité du beurre ont montré qu'un séchage rapide des noix empêche d'une part l'oxydation et l'acidification du beurre et d'autre part la contamination par des mycoses et des bactéries, qui altèrent encore la qualité du beurre [29-30]. Pour avoir un beurre de bonne qualité, il est conseillé d'avoir une teneur en eau dans les amandes obtenues inférieure à 7% [30]; valeur difficilement atteinte par les collectrices avec le séchage solaire. Le plus souvent, après conditionnement, elles retrouvent leurs amandes moisies du fait qu'elles ont mal séchées à cause des difficultés de l'hivernage. Cependant certaines collectrices moins astreintes aux contraintes sociales, procèdent à un second séchage dit de finition à la fin de l'hivernage afin d'assurer la qualité de leurs amandes. Sur le plan financier, la main-d'œuvre et l'énergie représentent les deux principales charges de l'activité de transformation des fruits frais de karité en amandes séchées. Pour le traitement de 100 kg de fruits frais, les coûts totaux s'élèvent à 2 227 FCFA et la marge bénéficiaire à 933 FCFA, soit un taux de rentabilité de 42%. Le coût de production des amandes est en moyenne de 113 FCFA kg⁻¹ dont 94% dus à la fourniture en énergie et à la main-d'œuvre à hauteur respectivement de 46 FCFA et 60 FCFA. Toute action permettant de réduire le coût de l'énergie améliorerait considérablement la rentabilité de la transformation. Pour un prix de vente des amandes séchées de 160 FCFA.kg⁻¹ aux transformatrices, la marge des collectrices s'élève à 47 FCFA.kg⁻¹. Les 28.34 kg de bois consommés pour la transformation des 100 kg de fruits frais correspondent à 0.0045 ha de couvert forestier déboisé et s'accompagne d'une émission moyenne en dioxyde de carbone issu de la combustion du bois de 46.8 kgeqCO₂. A l'échelle régionale, pour les 10 000 t d'amandes produites annuellement, 14 350 t an⁻¹ de bois sont consommées qui correspondent à 2314 ha an⁻¹ de couvert forestier déboisé et 23 677 teqCO₂ an⁻¹ émis.

3.1.2. Extraction du beurre de karité

La matière grasse est extraite des amandes en saison sèche, période durant laquelle les femmes n'ont plus de travaux aux champs. Pour cette extraction, qui comprend plusieurs longues étapes, les femmes se regroupent au sein d'associations, afin de réduire les charges et de bénéficier d'entraide. Les amandes sont d'abord lavées : elles sont introduites dans un mortier avec une petite quantité d'eau, puis pilées doucement. Au bout de 5 à 10 mn, elles sont rincées à l'eau propre et étalées sur une natte posée à même le sol. Les amandes sont ensuite triées, celles qui sont germées, noires ou molles, sont retirées. Celles qui sont conservées sont séchées sur la natte et sont ensuite concassées à l'aide d'un petit pilon en bois qui fractionne l'amande déposée préalablement sur une pierre plate. Les amandes concassées sont torréfiées par chauffage pendant 40 à 60 mn à 80-90°C dans un cylindre métallique perforé (le torréfacteur) que

les opératrices font tourner au-dessus d'un foyer à bois de feu. Les amandes torréfiées sont ensuite réduites en mouture grossière par le meunier du village.

Le barattage se fait à partir de la mouture d'amande torréfiée, mélangée à un peu d'eau tiède puis battue vigoureusement à la main pendant environ 2 heures dans des cuvettes de 30 litres jusqu'à ce qu'une émulsion pâteuse et blanchâtre surnage, le beurre brut. Cette émulsion est collectée dans des récipients. Le résidu boueux (constitué d'eau et de tourteau de karité, reste de poudre d'amandes dont la majeure partie de la matière grasse a été extraite), est jeté à même le sol dans un coin : ces boues de barattage fermentent rapidement en dégageant du méthane [31]. Afin de laver l'émulsion de beurre brut, d'enlever les résidus solides et les substances hydrosolubles, de l'eau froide est ajoutée à raison de 2 volumes d'eau pour 1 volume de beurre. Le lavage est répété 3 à 4 fois. Enfin, la matière grasse obtenue après lavage est clarifiée, décantée et séchée. Pour cela, elle est mise à cuire avec un peu d'eau dans une marmite sur un foyer à bois. Au fil de la cuisson qui dure environ 1 heure et demi, l'écume grisâtre ou beurre pur, qui surnage, est enlevée et mis à décanter dans des récipients. Après refroidissement, le beurre est filtré.

Avec 100 kg d'amandes, les transformatrices obtiennent $33.25 \text{ kg} \pm 0.25$ de beurre et 52.20 ± 0.31 kg de résidu de barattage sous forme de boue très humide (33 % d'eau) équivalant à 17.20 kg de boue séchée (Fig.2). Ces valeurs sont des valeurs moyennes de plusieurs mesures réalisées chez les transformatrices. Le rendement en beurre dépend fortement de la dextérité des transformatrices, théoriquement elles pourraient récupérer 50 kg de beurre, avec un rendement de 66.5% elles sont comparables aux systèmes améliorés (extraction à la presse) qui ont un rendement aux alentours de 75%. Les boues contiennent 15% de teneur résiduelle en beurre, qui favorise leur pouvoir énergétique comme combustible. Après séchage au soleil, ces boues ont donc un fort pouvoir calorifique qui les rend intéressantes comme biocombustible en substitution du bois de feu puis que 1 kg de bois peut être remplacé par 0.55 kg de boues séchées (tableau 1). Les flux d'énergie nécessaires aux étapes de triage, de lavage, torréfaction et clarification, ont été quantifiés sur le terrain. L'énergie nécessaire pour la transformation de 100 kg d'amande est en moyenne de 239 629 kJ, soit une consommation de 119 kg de bois. Les rendements des foyers de combustion traditionnels utilisés varient de 4.34% à 9.09%, ce qui traduit un grand gaspillage de chaleur.

Pour 100 kg d'amandes transformées, les charges de la transformation s'élèvent à 29 316 FCFA et la marge bénéficiaire à 7 874 FCFA, soit une rentabilité de 28 %. Le coût de production du beurre de karité est de 882 FCFA kg^{-1} incluant le coût d'achat des amandes (160 FCFA) et le coût de l'énergie de 106 FCFA qui représente 12% du coût total. Ce beurre étant vendu 1 000 FCFA kg^{-1} sur le marché local, la marge des transformatrices s'élève à 118 FCFA kg^{-1} . Le coût de l'énergie a donc un impact élevé sur la rentabilité et toute action permettant de le réduire améliorerait cette rentabilité.

La combustion de 119 kg de bois utilisés pour la transformation de 100 kg d'amandes représentent environ 0.019 ha de couvert forestier déboisé, et s'accompagne d'une l'émission moyenne de 196 kg eqCO_2 de dioxyde de carbone (CO_2). A l'échelle régionale, pour les 8 200 t d'amandes transformées

annuellement, 9 758 t an^{-1} de bois sont consommés soit 1573.9 ha an^{-1} de couvert forestier déboisé et 16 100 $\text{teqCO}_2 \text{ an}^{-1}$ émis.

3.1.3. Bilan général de la filière et discussion

Pour 100 kg de fruits frais récoltés, 19.75 kg d'amandes ont été obtenues et par la suite 6.52 kg de beurre ont été extraits. Théoriquement, pour 100 kg de fruits frais récoltés, 9.8 kg de beurre de karité sont escomptés. La filière traditionnelle, avec 6.52 kg de beurre extrait, a un rendement réel d'extraction de 66.5%, certes appréciable mais inférieur à celui des filières industrielles, qui ont un taux d'extraction autour de 75%.

Au cours des étapes de transformation du fruit de karité jusqu'au beurre filtré, de nombreuses opérations ont nécessité un apport d'énergie thermique, issue d'une part du bois de feu — cuisson des noix, lavage des amandes à l'eau chaude, torréfaction des amandes concassées, clarification du beurre — et, d'autre part, du soleil — dépulpage des fruits, séchage des noix, clarification du beurre. Nous avons établi le bilan économique et énergétique de la filière traditionnelle dans la région Est du Burkina Faso : 7.87 kg de bois sont consommés pour produire 1 kg de beurre, ce qui représente un coût total en énergie de 246 FCFA kg^{-1} , soit 31% de l'ensemble des charges. Le coût de l'énergie (bois) pour la production du beurre de karité est finalement supérieur au coût de même nature d'autres transformations agroalimentaires locales, qui est de 20 à 25 % selon Cecelski [32] (cas du *dolo*, bière de sorgho).

A l'échelle régionale, 24 108 t an^{-1} de bois serait ainsi utilisé pour la production de beurre de karité, et cela concourt à une perte de 3 898 ha an^{-1} de couvert forestier local et à une émission de 39 777 $\text{teqCO}_2 \text{ an}^{-1}$. De plus, la collecte de ce bois dans les espaces de jachères ou de forêts est un travail pénible, effectué par les femmes qui doivent se déplacer de plus en plus loin pour le ramasser. Les pays du Sud du Sahara font d'ailleurs face à un réel problème de déforestation [14]. L'utilisation du bois de chauffe a des impacts négatifs connus sur l'environnement et sur la santé humaine, engendrant notamment des maladies respiratoires infantiles [15]. Toute action visant à réduire la consommation de bois dans la filière karité contribuerait à l'atténuation des effets du changement climatique et de la désertification, à la préservation de la biodiversité, à l'amélioration des revenus et au bien-être des femmes et des enfants. Ces bénéfices directs peuvent favoriser l'acceptation de techniques améliorées d'utilisation de l'énergie par les acteurs de la filière karité ainsi que la prise de conscience et l'appui des acteurs de leur environnement institutionnel.

3.2. PROPOSITIONS DES TECHNIQUES ALTERNATIVES ET COMBINAISONS EN SCENARI

Sur la base de l'analyse de la situation de référence, plusieurs options techniques simples peuvent facilement être envisagées pour optimiser les consommations d'énergie et limiter les dépenses qui en dépendent. Pour l'étape de la transformation des fruits frais en amandes, trois options techniques peuvent être proposées aux collectrices (Table 2) :

- des **foyers en banco** pour la cuisson des noix. C'est un cylindre de 40 cm de haut, avec une ouverture sur la partie frontale pour alimenter le foyer en bois. Le banco est une terre argileuse mêlée d'eau et longuement foulée au pied, parfois enrichie de paille de mil ou de riz.

Ce foyer a un meilleur échange thermique que les foyers traditionnels trois pierres et il est localement accessible ;

- les **coques de noix séchées comme biocombustibles** remplaçant partiellement le bois utilisé. Ces résidus sont faciles à récupérer sur les lieux de production et ont un pouvoir calorifique supérieur à celui du bois ;

- des **séchoirs coquillages** pour le séchage des noix. Ce séchoir n'est pas économique en combustible par rapport à la situation de référence mais elle permet de diminuer de moitié le temps de séchage et d'obtenir une meilleure qualité (homogénéité) des amandes et par conséquent un meilleur prix à la vente.

Pour l'étape de la production de beurre, trois techniques améliorées peuvent être proposées aux transformatrices (Table 2) :

- des **foyers améliorés métalliques** qui sont plus économes en combustibles que les foyers à trois pierres car ils ont de meilleurs échanges thermiques ;

- des **torréfacteurs à gaz butane** qui montent rapidement en puissance et améliorent ainsi la qualité de la torréfaction des amandes [33] ;

- les **boues de barattage sèches comme biocombustibles** remplaçant partiellement le bois utilisé. Ces résidus sont faciles à récupérer sur les lieux de production et ont un pouvoir calorifique supérieur à celui du bois.

Afin d'évaluer les impacts économiques et environnementaux liés à l'introduction de ces techniques, différentes combinaisons en scénarii ont été étudiés. Nous avons identifié trois scénarii pour les collectrices et trois pour les transformatrices. Pour une appropriation locale des innovations techniques apportées, nous avons construit nos scénarii sur la base d'une évolution progressive, suivant l'investissement à mobiliser et la simplicité de mise en œuvre. Ainsi les scénarii sont :

- scénario 1 (collectrices) : substitution partielle du bois par les coques de noix ;
- scénario 2 (collectrices) : scénario 1 + foyer amélioré en banco ;
- scénario 3 (collectrices) : séchoir coquillage pour le séchage des noix ;
- scénario 4 (transformatrices) : substitution partielle du bois par les boues de barattage ;
- scénario 5 (transformatrices) : scénario 4 + foyer amélioré métallique ;
- scénario 6 (transformatrices) : scénario 5 + torréfacteur à gaz.

Techniques	Description	Stade	Coût unitaire (FCFA)	Impact
Collecte				
Foyer amélioré en banco	Réalisé localement à partir de terre cuite - rendement 25%	Cuisson des noix	3 500	diminution de 80% de la quantité de bois utilisée
Coque biocombustible	PCI : 19 962 KJ kg ⁻¹	Cuisson des noix	0	diminution de 24% de la quantité de bois utilisée
Séchoir coquillage	En vente localement peut être aussi construit avec des matériaux de récupération.	séchage	13 000	diminution de la durée de transformation et amélioration de la qualité.
Transformation				
Foyer amélioré métallique	Réalisé localement à partir de terre cuite - rendement 20%	Lavage, séchage et clarification	20 000	diminution de 17% de la quantité de bois utilisé
Torréfacteur à gaz butane	Réalisé localement	Torréfaction des amandes	55 000	diminution de 42% de la quantité de bois utilisé
Boue de barattage biocombustible	Boues pressées en boules à la main et exposées au soleil PCI de 30 158 kJ/kg	Toutes les étapes de cuisson	0	diminution de 26% la quantité de bois

Tableau 2. Propositions techniques et impacts à introduire chez les productrices (description, impacts et coût)

3.3. SIMULATION DES IMPACTS ECONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX DES SIX SCENARII

3.3.1. Impacts économiques

Les six scénarii ont été comparés à la situation traditionnelle actuelle considérée comme situation de référence pour chaque étape de la transformation (Tables 3 and 4).

Pour la production d'amande par les collectrices (Table 3), les scénarii 1 et 2 engendrent la baisse des coûts de production et par conséquent la hausse de la marge brute au kilogramme d'amande produite. Pour le scénario 2, l'augmentation de la marge unitaire atteint 76%. Par contre au scénario 3, il y a diminution de la marge unitaire et ceci à cause de l'investissement nécessaire pour le séchoir qui augmente les coûts de production. Mais cette marge pourra être améliorée parce que le meilleur séchage augmente la qualité des amandes, qui seront vendues plus cher d'après les informations recueillies pendant l'enquête. De plus, le scénario 3 réduit de moitié le temps de séchage et donne une opportunité aux collectrices d'effectuer d'autres activités.

Postes pour le traitement de 100 kg de fruit frais	Situation de référence	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Amortissement*	120	120	122	263
Energie	900	708	193	900
Autres consommables	24	24	24	24
Main-d'œuvre	1 183	1 183	1 183	1 117
Marge brute	933	1 125	1 638	856
Marge brute kg ⁻¹ amande	47	57	83	43

* Achat du nouvel équipement compris

Tableau 3. Simulation de la performance économique des propositions techniques pour la production d'amande (FCFA)

Pour la production de beurre par les transformatrices (Table 4), les trois scénarii 4, 5, and 6 augmentent respectivement la marge unitaire de 25, 30 et 43% du fait de la réduction du coût de l'énergie.

Pour l'ensemble de la filière le scénario le plus avantageux est la combinaison des scénarii 2 et 6 qui permettent de réduire le coût énergétique de 31 à 6% du coût de production du beurre.

Postes traitement d'amande pour de 100 le kg	Situation de référence	Scénario 4	Scénario 5	Scénario 6
Amortissement	983	863	905	1 049
Energie	3 525	1 666	1 194	150
Autres consommables	3 840	3 840	3 840	3 840
Main-d'œuvre	6 783	6 783	6 783	6 783
Taxes	186	186	186	186
Marge brute	7 873	9 852	10 282	11 332
Marge brute kg ⁻¹ beurre	239	299	312	343

Tableau 4. Simulation de la performance économique des propositions techniques pour la production de beurre (FCFA)

3.3.2. Impacts environnementaux

A l'échelle de la région Est du Burkina Faso, les six scénarii ont des impacts environnementaux quantifiables en termes de réduction de la surface déboisée et du CO₂ émis par la combustion du bois (Table 5). Par ailleurs, l'amélioration potentielle de la santé des opératrices et des membres de leurs familles moins exposés à la fumée des foyers traditionnels est un impact supplémentaire.

Scénario	Bois, gaz	Résidu	recyclage	TeqCO ₂ émises	TeqCO ₂ évitées
Collecte					
Situation de référence	Bois 14 350 t	Coques 3 670 t		23 677	-
Scénario 1	Bois 10 901 t	0 t	Coques 3 670 t	24 333	- 656
Scénario 2	Bois 0 t	0 t	Coques 3 670 t	6 346	17 331
Scénario 3	Bois 14 350 t	Coques 3 670 t	0 t	23 677	0
Transformation					
Situation de référence	Bois 9 758 t	Boues 4 264 t		16 100	-
Scénario 4	Bois 4 977 t	0 t	Boues 4 264 t	17 204	- 1 104
Scénario 5	Bois 3 306 t	0 t	Boues 4 264 t	14 447	1 653
Scénario 6	Gaz butane 345 m ³	0 t	Boues 4264 t	9 723	6 277

Tableau 5. Bilan annuel des émissions de CO₂ dues à la collecte et à la transformation pour la région Est du Burkina Faso : simulation de la situation actuelle et des scénarii proposés

Pour la production d'amandes, la combinaison des coques de noix et du foyer en banco (scénario 2) rend la filière autonome en combustible, et par conséquent préserve le couvert forestier. En effet, l'emploi des coques de noix réduit de 24% de consommation en bois (Tables 1 and 2), ce qui équivaudrait à la préservation de 378 ha de couvert forestier local à l'échelle de la région de l'Est. De même, le foyer amélioré en banco, qui réduit de 80% la consommation en bois (Table 2), permettrait d'épargner 1 259 ha de couvert forestier. En revanche, le scénario 3 (introduction du séchoir coquillage) n'a pas d'impact sur l'environnement car son apport se situe au niveau de la qualité des produits et non pas à celui de l'économie d'énergie dans la filière.

Pour la production de beurre, la combustion des boues séchées réduit la consommation en bois de 26 % (Tables 1 and 2). Cette valeur, rapportée à la région de l'Est, équivaudrait à la préservation de 409 ha de couvert forestier local.

Pour l'ensemble de la filière, suivant la combinaison des scénarii 2 et 6 qui sont les plus avantageuses 898 ha par an de forêt préservée pour les 2 706 t de beurre produit.

3.3.3. Discussion des scénarii

Globalement les scénarii envisagés améliorent la rentabilité de la filière et le bien-être des femmes et de leurs familles. Mais ces scénarii ont été construits dans l'hypothèse d'une demande énergétique constante de chaque étape. Cette hypothèse n'est pas toujours vérifiée car beaucoup de paramètres difficilement maîtrisables (climat, technicité), peuvent faire varier la consommation d'énergie. Par conséquent les calculs économiques et environnementaux des différents scénarii doivent être considérés comme des ordres de grandeurs relatives.

Par ailleurs, l'acceptabilité des changements techniques proposés n'a pas été étudiée. Mais certaines techniques alternatives font déjà l'objet de campagnes de vulgarisation dans la région (cas des foyers améliorés et des séchoirs) et n'introduisent pas de changement profond dans l'organisation du travail : leur prise en main devrait s'en trouver facilitée. De plus, l'ensemble des équipements proposés peuvent être fabriqués localement (foyer en banco, foyer métallique, torréfacteur) ou achetés sur le marché local (séchoir coquillage). Cependant, les difficultés d'obtention des crédits bancaires sont très pénalisantes dans la région, du fait de l'inexpérience dans la constitution des dossiers

techniques et financiers, de l'absence de garantie financière, ou encore du délai de traitement des demandes. Mais, la limite économique que les scénarii pourraient rencontrer est réduite du fait que les investissements pour leur application sont faibles, ne dépassant pas 100 000 milles francs CFA pour le plus cher, et peuvent être graduels. Les productrices peuvent donc évoluer suivant l'augmentation de leur capital pour mettre en place les scénarii.

La qualité des amandes et du beurre produits selon chaque scénario n'a pas été étudiée. Nous restons sous l'hypothèse que les six scénarii permettent d'obtenir un produit de qualité au moins identique voir supérieure. Nous pensons en effet que la maîtrise des opérations de cuisson, séchage et de torréfaction améliorera la qualité du beurre, et en particulier l'homogénéité de cette qualité. L'hétérogénéité actuelle de la qualité des produits du karité est une des principales préoccupations des acteurs de la filière dans la région Est. Or le prix du beurre dépend de sa qualité, facteur clé de compétitivité sur les marchés.

Les scénarii les plus intéressants sont le scénario 2 chez les collectrices (substitution partielle du bois par les coques de noix + foyer amélioré en banco) et le scénario 6 chez les transformatrices (substitution partielle du bois par les boues de barattage + foyer amélioré métallique + torréfacteur à gaz). Ils sont plus économes en énergie et présentent le moins d'impact sur l'environnement. La marge brute de ces scénarii est presque le double de celle de la situation de référence. Le caractère cumulatif des techniques de ces scénarios les rend plus attrayants encore pour une mise en place progressive. Les crédits carbonés générés par l'amélioration des pratiques énergétiques pourraient être mis en valeur sur des marchés à compensation volontaire plus propice aux projets MDP à petite échelle dont l'évitement annuelle d'émission de CO₂ est inférieur à 60 kilotonnes d'équivalent CO₂. Finalement, les six scénarii présentent non seulement des réductions de coût et de pollution mesurables et additionnelles pour l'environnement, mais aussi des bénéfices sociaux pour la population. Ces paramètres sont très importants pour le marché à compensation volontaire où les particuliers qui viennent acheter les crédits carbonés veulent améliorer l'image de leur structure.

4. CONCLUSION

Au Burkina Faso, comme dans d'autres pays d'Afrique subsaharienne, unique zone de production de karité au monde, le beurre de karité est extrait des amandes issues des fruits par les femmes de façon traditionnelle. Cette transformation exige beaucoup de travail et comprend de nombreuses étapes de cuisson et de séchage consommant beaucoup d'énergie. Nous avons mené l'analyse exploratoire économique, énergétique, et environnementale de cette filière dans la région Est du Burkina Faso dont les conditions de production sont représentatives du pays. L'énergie la plus utilisée est celle du bois de feu, à raison de 7.87 kg de bois pour produire 1 kg de beurre.

Nous avons montré que les systèmes traditionnels de conversion du bois en énergie ont une faible efficacité car les équipements sont très ouverts et mal isolés. L'énergie affecte donc directement la rentabilité de la transformation mais aussi la qualité du produit. L'amélioration des systèmes énergétiques peut donc permettre de garantir de meilleurs revenus aux femmes,