

Potentiels d'Acidification Et De Réchauffement Climatique Des Bois-Energie A Madagascar

M.P. Randrianarison, N.A.T. Razafiarivony, N. Randrianandrasana, B. Rahelilarilalao

Ecole Doctorale Ingénierie et Géoscience (INGE)

Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA) – BP 1500

Antananarivo - Madagascar



Résumé - Le bois reste la principale source d'énergie à Madagascar. Son utilisation est une origine de déforestation et de pollution atmosphérique. L'objet de ce travail est d'estimer les potentiels d'acidification et de réchauffement climatique du bois de feu par l'Analyse de Cycle de Vie depuis la plantation des arbres jusqu'à son utilisation. Une comparaison entre le charbon et le bois de feu est également effectuée. Un mégajoule d'énergie issu du bois de feu correspond à des émissions de gaz à effet de serre de 0,19kg éq CO₂ et d'émissions aériennes de 177, 98.10⁻⁶ kg éq SO₂. Le charbon de bois émet quatre fois plus d'émissions aériennes et neuf fois plus de gaz à effet de serre que le bois de feu à cause de la carbonisation au cours de sa production.

Mots-clés - Bois de Feu, Charbon de Bois, Gaz à Effet de Serre, Emissions Aériennes, Analyse de Cycle de Vie.

Abstract - Wood remains the principal energy source the in Madagascar. Its use is an origin of and atmospheric pollution. The objective of this paper is to estimate the acification and climate warming potentials of of firewood by Life Cycle Assessment from its cultivation to its use. A comparison between charcoal and firewood is carried out. One mégajoule of energy issue from firewood corresponds to 0,19kg eq CO₂ greenhouse gases emission and 177.98 10⁻⁶ kg eq SO₂ of air emissions. Charcoal emits four times more air emissions and nine times more greenhouse gases than firewood because of carbonization during its production.

Keywords- Firewood, Charcoal, Greenhouse Gases, Air Emissions, Life Cycle Assessment.

I. INTRODUCTION

Plus de 2,4 milliards de personnes, soit environ le tiers de la population mondiale, dépendent encore aujourd'hui des combustibles ligneux pour cuisiner, et un grand nombre d'entreprises se servent du bois de feu et du charbon de bois comme principale source d'énergie pour des activités telle la fabrication de briques [1]. On estime que la moitié du bois extrait des forêts dans le monde est utilisée sous forme de bois de chauffe et de charbon de bois. [2]

Source d'énergie abordable, le bois et le charbon de bois font partie du quotidien de tous les malgaches, qu'ils soient urbains ou ruraux. Plus de 90% des ménages les utilisent pour la cuisson. Les consommations annuelles moyennes par habitant en milieu urbain sont évaluées à 104 kg de charbon de bois et 270 kg de bois de feu contre 513 kg de bois de feu et 91 kg de charbon de bois par personne en milieu rural [3] [4].

La Région Analamanga, caractérisée par un taux d'urbanisation important (69 %), abritant près de 18 % de la population nationale (environ 4,6 millions d'habitants), plus de 98 % des ménages utilisent des combustibles ligneux. Le bois de feu est utilisé

par 83,9 % de la population rurale alors que 84,2 % de la population urbaine privilégient le charbon de bois. Le taux annuel de déforestation est passé de 1,72 % pour la période 2005-2010 à 2,14 % pour la période 2010-2013 pour les régions qui approvisionnent Analamanga en bois-énergie. Ce taux est un des plus élevés du pays [3]. Avec l'expansion démographique, il y aura alors une dépendance vis-à-vis des ressources ligneuses entraînant inexorablement une pression accrue sur les forêts et leur destruction accélérée, en même temps qu'une émission atmosphérique importante.

Dans les régions où la consommation est la plus forte, principalement en Afrique subsaharienne mais aussi en Asie du Sud-Est et en Amérique du Sud, le recours à des pratiques non durables pour la collecte du bois et la production du charbon de bois contribue à la déforestation et à la dégradation des forêts de même qu'aux émissions de gaz à effet de serre (GES) tout au long de la chaîne de valeur. Selon les estimations, l'énergie ligneuse traditionnelle (bois de feu et charbon de bois) utilisée se traduit par environ 1 à 2,4 Gt d'équivalent dioxyde de carbone par an, soit 2 à 7% des émissions anthropiques de GES. L'Afrique subsaharienne est à l'origine du tiers des émissions attribuables à l'énergie ligneuse [2]. Une étude relative aux flux des émissions aériennes et de gaz à effet de serre (GES) du charbon de bois dans la région Analamanga par la méthode d'Analyse de Cycle de Vie a été déjà effectuée, un mégajoule d'énergie issue du charbon de bois correspond à une émission de 1,71kg éq CO₂ et 763,08.10⁻⁶ kg éq SO₂ d'émissions aériennes [5]. Notre but est donc de compléter les études sur le bois-énergie en déterminant les émissions aériennes et de GES du bois de feu d'abord et de comparer ensuite les résultats obtenus avec ceux du charbon de bois.

II. MATERIELS ET METHODE

Selon ISO 14040 (1997) [6], l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est « une technique d'évaluation des aspects environnementaux et des impacts environnementaux potentiels associés à un système de produit., par :

- détermination de l'objectif et du champ d'étude [7] ;
- compilation d'un inventaire des flux élémentaires entrants et sortants pertinents d'un système de produits [8] ;
- évaluation des impacts environnementaux potentiels associés à ces flux entrants et sortants [9] et
- interprétation des résultats d'évaluation d'impact par rapport aux objectifs de l'étude [10] [11].

Dans cette étude, il s'agit des catégories d'impact «potentiel d'acidification » et de «réchauffement climatique », exprimées respectivement par les émissions aériennes (en kg éq SO₂) et les émissions de gaz à effet de serre (en kg éq CO₂).

II.1. Objectif et du champ d'étude

II.1.1. Objectif

Une Analyse de Cycle de vie du bois de feu est effectuée afin d'évaluer le «potentiel d'acidification » et le «potentiel de réchauffement climatique » du bois de feu, se traduisant respectivement par les émissions aériennes (exprimées en kg éq SO₂) et les émissions de gaz à effet de serre (exprimées en kg éq CO₂) et de les comparer avec celles du charbon de bois.

II.1.2. Choix de l'unité fonctionnelle (UF)

Un mégajoule d'énergie fournie est pris comme unité fonctionnelle pour pouvoir comparer les valeurs des émissions aériennes et de GES obtenues avec celles des autres combustibles.

II.1.3. Délimitation des frontières du système

▪ Zone d'étude

L'étude est focalisée sur la Région Analamanga car la demande de cette région en charbon de bois correspond à un volume de 4 775 782 m³ de bois soit près des trois quarts du volume de bois transformé en charbon chaque année sur la Grande Île. En milieu urbain, les consommations annuelles moyennes par habitant sont évaluées à 104 kg de charbon de bois ou 270 kg de bois de feu. En milieu rural, ces consommations sont estimées à 513 kg de bois de feu ou 91 kg de charbon de bois par personne [3].

▪ Frontières de l'étude

L'étude d'ACV est réalisée depuis la plantation du bois jusqu'à son utilisation (combustion). Le système de produit du bois de feu est présenté par la figure 1. Les impacts environnementaux relatifs aux processus de second plan tels que la fabrication des véhicules, des machines et la filière de production et de transport des carburants (gas-oil) ne sont pas pris en compte.

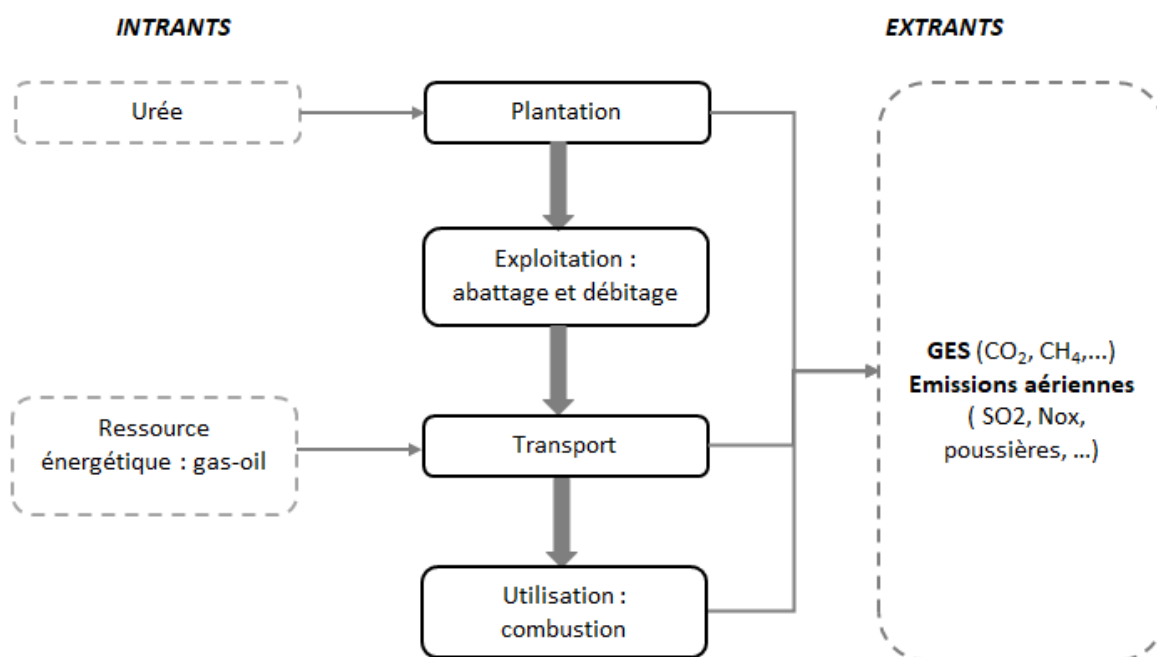


Figure 1 : Système de produit du bois de feu.

II.2. Inventaire du Cycle de Vie

II.2.1. Provenance des bois utilisée

La majeure partie du bois-énergie provient des plantations forestières d'eucalyptus et de pins [12]. La très grande majorité des volumes (93 %) de bois de feu vendue sur les marchés de la capitale provient des espaces forestiers situés dans la région Analamanga. Des volumes plus limités, estimés à 5 510 t par an, proviennent des régions Alaotra Mangoro, Vakinankaratra, Haute Matsiatra et Atsinanana. Ce flux interrégional représente 7% de la consommation de bois de feu (fig. 2).

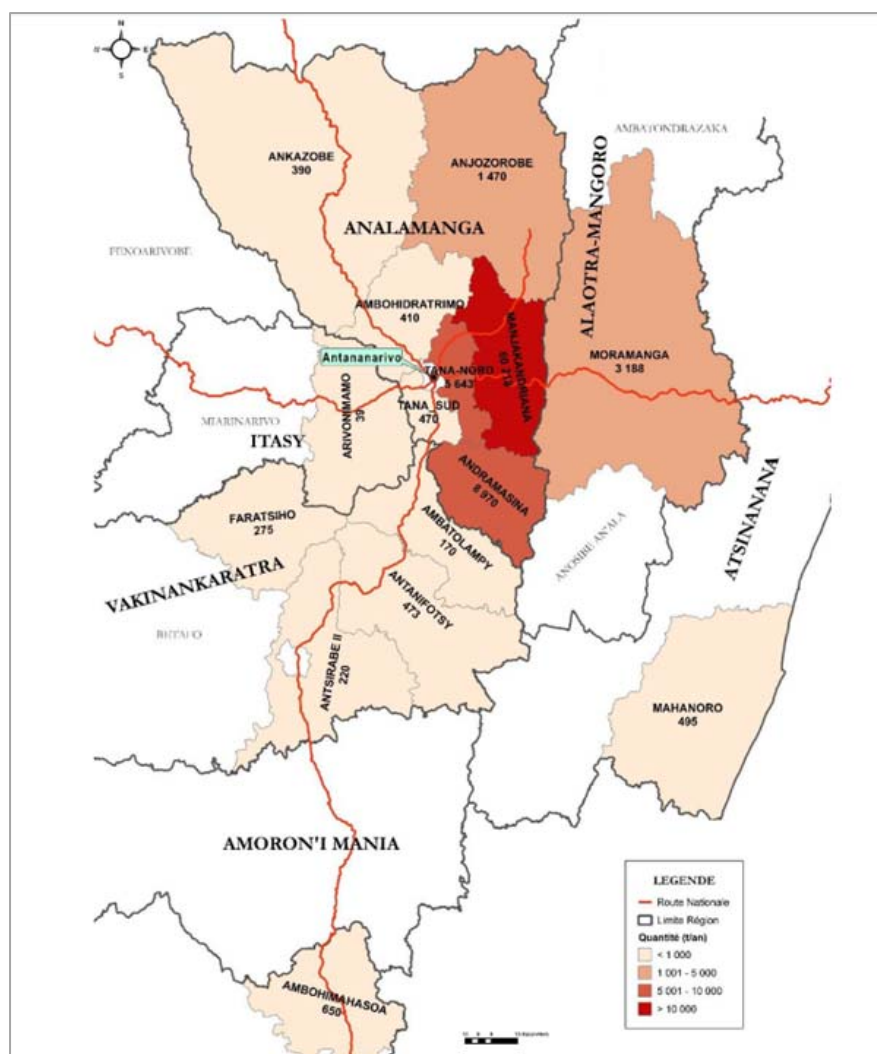


Figure 2 : Provenance du bois-énergie utilisé dans la région Analamanga [3].

Les parts d'Alaotra Mangoro et Vakinankaratra, sont respectivement 44 % et 5 % des volumes recensés (fig.3). Ces prélèvements en provenance de ces régions se sont intensifiés au cours des quinze dernières années. Pour la région Alaotra Mangoro, le taux annuel de déforestation est passé de 1,72 % pour la période 2005-2010 à 2,14 % pour la période 2010-2013. Ce taux est un des plus élevés du pays [13].

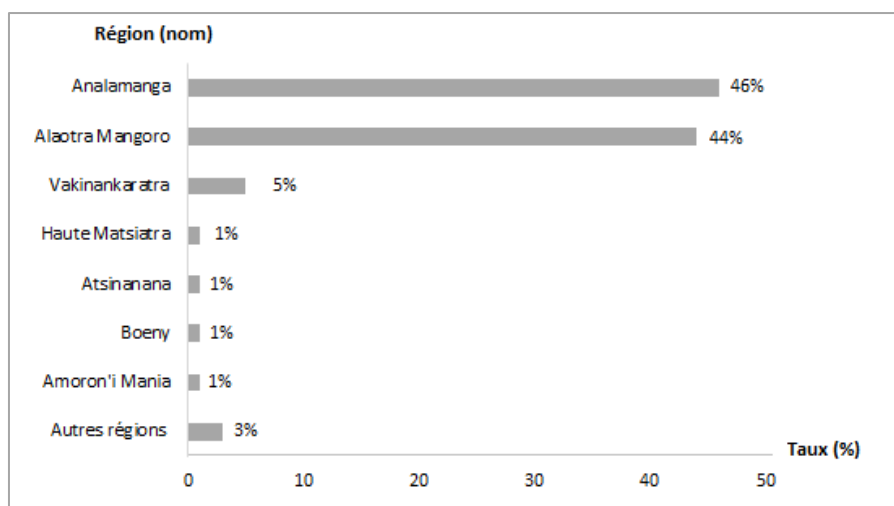


Figure 3 : Parts d'approvisionnement en bois-énergie (pour Analamanga) des différentes régions [12].

Les contributions en approvisionnement en bois-énergie des districts de la région Analamanga sont données par le tableau 1.

Tableau 1 : Contribution des districts de la région Analamanga à l'approvisionnement d'Antananarivo (année 2017)

District (nom)	Quantité de bois de feu	
	(t/an)	(%)
Manjakandriana	60 218	77,6
Andramasina	8 970	11,6
Antananarivo Avaradrano	5 643	7,3
Anjozorobe	1 471	1,9
Antananrivo Atsimondrano	470	0,6
Ambohidratrimo	411	0,5
Ankazobe	390	0,5

Source : [12]

II.2.2. Transport

La grande majorité des produits bois-énergie est transporté par des professionnels du secteur (91 %). Les principaux moyens de transport constatés sont les camionnettes et les camions ayant une charge supérieure à douze tonnes avec respectivement 59 % et 32 % des quantités de charbon entrant dans l'agglomération d'Antananarivo [3].

II.2.3. Caractéristiques du bois-énergie

Le bois-énergie est utilisé sous différentes formes, les plus connues étant les bûches, les plaquettes ou les granulés. Les bûches sont les plus utilisées à Madagascar, proposées en plusieurs longueurs : 25, 33, 50 et 100 cm et sont le plus souvent livrées en stères. Une norme « NF Bois de Chauffage » existe et propose de classer les bûches en fonction de l'essence et de l'humidité [14]. Cependant, la majorité du marché de bûche en stère est en dehors de cette norme.

▪ Composition chimique du bois

La composition chimique du bois est assez proche d'une espèce d'arbre (appelée « essence ») à une autre. En moyenne, elle se structure autour de 50 à 55% de carbone, 35 à 40% d'oxygène, 5 à 7% d'hydrogène, 1% d'azote et 1% de minéraux [15].

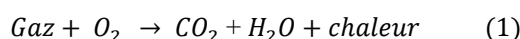
▪ Pouvoir calorifique du bois

Le pouvoir calorifique du bois varie peu selon l'essence, les feuillus ayant un pouvoir calorifique inférieur (PCI) légèrement plus faible que celui des résineux. Celui varie en fonction de l'humidité du bois. Une valeur moyenne de 15MJ/kg (humidité 20%) est prise pour cette étude [16].

▪ Phénomène de combustion

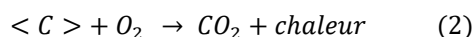
La cuisson est la principale voie de valorisation du bois-énergie à Madagascar. Lors de son utilisation se passe le phénomène de combustion.

Lors de la combustion, le bois est d'abord chauffé (c'est la phase dite de séchage), puis atteint une température supérieure à 300 °C à partir de laquelle la nature et la quantité des gaz libérés (CO, H₂, CH₄, ...) permet l'inflammation. Environ 80 % de la masse de solide est ainsi brûlée sous forme de gaz : c'est ce qu'on appelle la combustion homogène ou vive et qui est représentée sur la figure 4 par l'équation (1) :



Normalement les flammes obtenues sont incolores ou légèrement bleutées. La couleur jaune provient de la combustion partielle de goudrons et caractérise une combustion imparfaite (manque d'air, bois humide), avec dégagement de COV (composés organiques volatils), HAP (Hydrocarbures aromatiques polycycliques), sous forme d'aérosols organiques.

Les 20 % restants sont brûlés lentement par attaque de l'oxygène directement vers le charbon résiduel : ces réactions plus lentes sont appelées combustion hétérogène ou lente et sont représentées par l'autre équation :



De manière pratique, les réactions de la première phase se font dans la flamme alors que celles de la seconde phase se font dans le lit de braises : ce phénomène est visible avec les braises qui rougissent grâce à l'énergie libérée par les réactions d'oxydation.

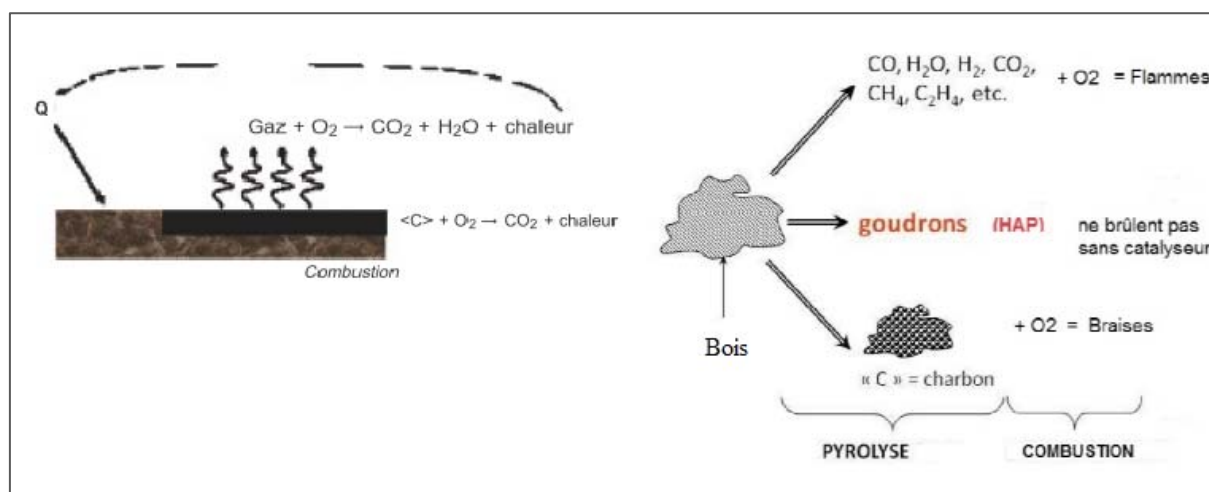


Figure 4 : Mécanisme de combustion du bois [16]

II.3 Evaluation d'impacts environnementaux

Dans cette étude, l'abattage et le débitage sont dépourvus de mécanisation, ces étapes sont effectuées par les paysans eux-mêmes pour leurs usages domestiques ou par des ouvriers pour les fins commerciales. Les postes d'émission tenues compte lors de ce travail sont donc :

- la plantation
- le transport et

- l'utilisation.

Des processus tenant compte des inventaires de Cycle de vie sont créés à l'aide de GEMIS (Global Emission Model of Integrated Systems), un logiciel d'ACV (fig.5).

- « farming wood » : processus relatif à la plantation des arbres, livrant autres produits auxiliaires (fertilisants et pesticides) ;
- « truck-Diesel 7,5-12t Analamanga » pour le transport (T) et
- « Firewood-Analamanga » : processus général englobant le cycle de vie du bois de feu.

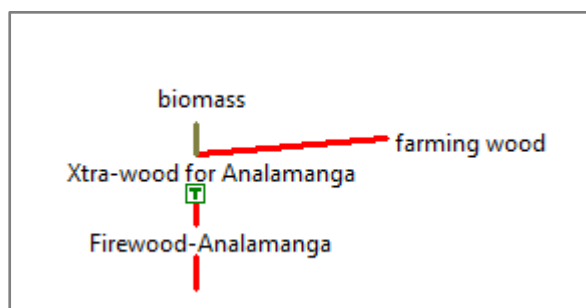


Figure 5 : Processus d'ACV du bois-énergie, créée dans GEMIS.

▪ Hypothèses adoptée pour le calcul

Quand c'est un composé d'origine organique qui est brûlé, deux cas de figure peuvent se présenter :

- la biomasse brûlée n'est pas remplacée : il y a alors lieu de compter les émissions ;
- la biomasse brûlée est remplacée l'année même ou peu de temps après : il n'y alors pas lieu de compter des émissions, car ces dernières sont compensées par la croissance de la biomasse qui prend place par ailleurs. Il faut tenir compte des émissions lors de la combustion de biomasse ou de biocombustibles qui en sont dérivés et
- quand cette biomasse n'est pas replantée (cas de figure fréquent dans tous les pays tropicaux où la déforestation est pour partie liée au prélèvement de bois de feu [17].

Les émissions de CO₂ sont incluses dans l'inventaire d'émissions. Il faut tenir compte à la fois du carbone contenu dans la biomasse brûlée, et de la perte de carbone du sol qui suivra la déforestation, ce qui en pratique consiste à rajouter 20 à 50% de supplément aux émissions de combustion. Dans cette étude, une valeur de 25% est prise.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

III.1. Emissions aériennes et GES totale du bois de feu

Un mégajoule d'énergie issue du bois de feu correspond à une émission aérienne de 177, 98. 10⁻⁶ kg éq SO₂ et une émission de GES valant de 0,187kg éq CO₂ (fig. 6). Ces valeurs pouvant varier en fonction de l'humidité du bois. Dans ce travail, le bois est avec 20% d'humidité .

Die globalen Ergebnisse für '1,000000 MJ heat-Analamanga' geliefert von 'Firewood-Analamanga' sind:

émissions aériennes

	direkt	Vorkette	somme
équivalent SO ₂	151,22*10 ⁻⁶	26,765*10 ⁻⁶	177,98*10 ⁻⁶ kg
TOPP-Äquivalent	632,65*10 ⁻⁶	42,060*10 ⁻⁶	674,72*10 ⁻⁶ kg
SO ₂	34,978*10 ⁻⁶	4,7404*10 ⁻⁶	39,719*10 ⁻⁶ kg
NO _x	166,95*10 ⁻⁶	31,613*10 ⁻⁶	198,56*10 ⁻⁶ kg
HCl		13,868*10 ⁻⁹	13,868*10 ⁻⁹ kg
HF		1,1458*10 ⁻⁹	1,1458*10 ⁻⁹ kg
poussière	233,43*10 ⁻⁶	905,63*10 ⁻⁹	234,33*10 ⁻⁶ kg
CO	951,12*10 ⁻⁶	6,7902*10 ⁻⁶	957,91*10 ⁻⁶ kg
NMVOC	324,36*10 ⁻⁶	2,7315*10 ⁻⁶	327,09*10 ⁻⁶ kg
H ₂ S		604,4*10 ⁻¹⁵	604,4*10 ⁻¹⁵ kg
NH ₃		44,50*10 ⁻¹²	44,50*10 ⁻¹² kg
As (air)		22,33*10 ⁻¹²	22,33*10 ⁻¹² kg
Cd (air)		54,20*10 ⁻¹²	54,20*10 ⁻¹² kg
CFC-11eq		536,2*10 ⁻¹⁵	536,2*10 ⁻¹⁵ kg
Cr (air)		30,11*10 ⁻¹²	30,11*10 ⁻¹² kg
Hg (air)		4,121*10 ⁻¹²	4,121*10 ⁻¹² kg
Ni (air)		1,0814*10 ⁻⁹	1,0814*10 ⁻⁹ kg
PAH (air)		84,50*10 ⁻¹⁵	84,50*10 ⁻¹⁵ kg
Pb (air)		113,9*10 ⁻¹²	113,9*10 ⁻¹² kg
PCDD/F (air)		120,1*10 ⁻¹⁸	120,1*10 ⁻¹⁸ kg

GES

	direkt	Vorkette	somme
équivalent CO ₂	183,82*10 ⁻³	3,3771*10 ⁻³	187,20*10 ⁻³ kg
CO ₂	183,82*10 ⁻³	3,3279*10 ⁻³	187,15*10 ⁻³ kg
CH ₄		983,23*10 ⁻⁹	983,23*10 ⁻⁹ kg
N ₂ O		74,125*10 ⁻⁹	74,125*10 ⁻⁹ kg
perfluorométhane		13,44*10 ⁻¹²	13,44*10 ⁻¹² kg
éthane perfluoré		1,690*10 ⁻¹²	1,690*10 ⁻¹² kg

Figure 6 : Emissions aériennes et de gaz à effet de serre du bois de feu.

III.2. Emissions aériennes et GES du bois de feu par poste d'émission

83,58% des émissions aériennes sont imputées à la plantation, émissions dues aux utilisations des pesticides et de fertilisants (pour les pépinières). 91,31% des émissions en GES sont affectées à l'utilisation. L'émission relative au gaz carbonique lors de la combustion prédomine (99,99%). Les émissions aériennes relatives au transport vaut 6% tandis que les émissions en GES n'est que de 0,72% (fig. 7). La règle de négligeabilité peut être appliquée pour ce dernier cas.

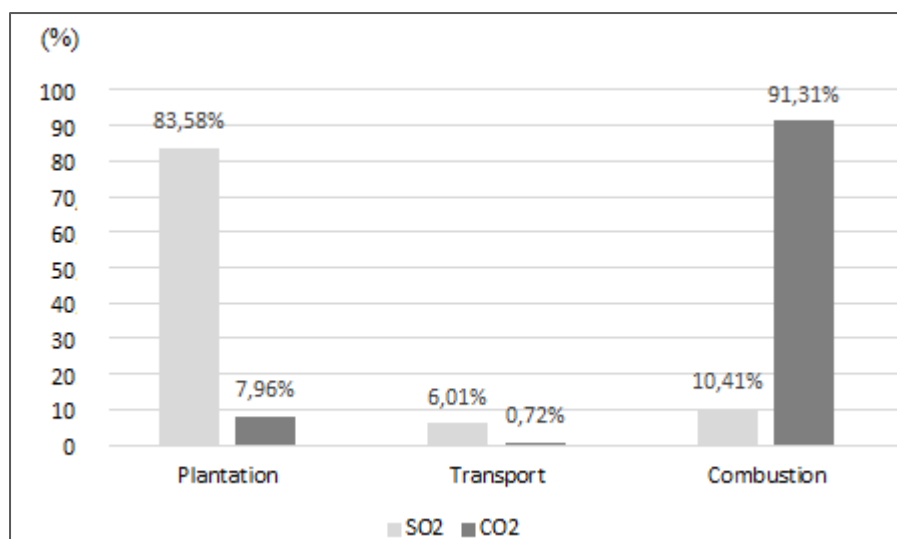


Figure 7 : Emissions aériennes et GES du bois de feu par poste d'émission.

III.3. Comparaison entre charbon de bois et bois de chauffe

En raisonnant par unité fonctionnelle, les émissions aériennes du charbon de bois sont quatre fois que celles du bois de feu. L'écart entre les émissions de GES du charbon de bois et du bois de feu vaut 89% (fig. 8). Ces émissions supplémentaires du charbon de bois sont dues principalement au phénomène de carbonisation pendant sa production. D'après Randrianarison *et al.* [5] ; 72,87% des émissions de GES du charbon de bois et 75,32% de ses émissions aériennes sont causées par sa production (carbonisation).

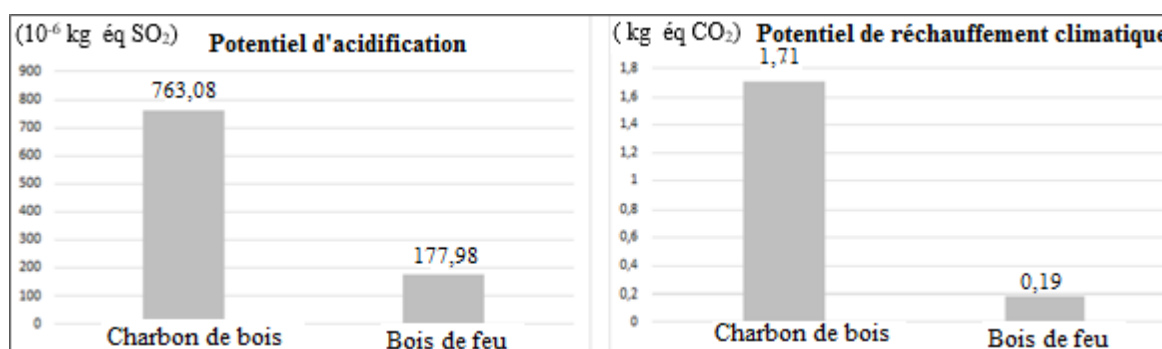


Figure 8 : Potentiels d'acidification et de réchauffement climatique du bois de feu

IV. CONCLUSION

Cette étude stipule qu'un mégajoule d'énergie issue du bois de feu correspond à un potentiel d'acidification équivalant à 177, 98. 10^{-6} kg éq SO_2 et un potentiel de réchauffement de 0,187kg éq CO_2 . Pour le charbon de bois, environ trois quart des émissions aériennes et de gaz à effet de serre sont imputées au phénomène de carbonisation.

A Madagascar, l'utilisation du bois- énergie restera encore importante, la vulgarisation dans tout le pays des techniques améliorées de carbonisation (production de charbon de bois) et des foyers améliorés avec insert en argile (économisant environ 25 % à 30 % par rapport au foyer) [3] s'avère primordiale pour protéger l'environnement. Avec un taux annuel de réduction du couvert forestier (pour la période de 2010-2013), une transition vers d'autres sources d'énergie renouvelable devrait constituer l'orientation forte de la politique énergétique nationale.

REFERENCES

- [1] M.P. Randrianarison, N. Randrianandrasana, A. Tsioritiana, B. Rahelilarilao. « Etude comparative des facteurs d'émission en gaz à effet de serre des produits de terre cuite artisanaux et semi-industriels ». ». International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT) Vol. 24, N° 1, pp 76-86, 2020.
- [2] FAO. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. « La transition du secteur du charbon de bois ». 16934F/1/03.17, 2017.
- [3] M. Charpin, D. Randriamiharisoa., F. Richter, S. Busse., D. Legeay, N. Rabemanantsoa . "SRABE. Schéma régional d'approvisionnement en bois-énergie. Région Analamanga 2019-2030 », 2019
- [4] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH et ECO Consulting Group. « PAGE : Base de données de la filière bois-énergie. Programme d'Appui à la Gestion de l'Environnement, Composante 2 ». Antananarivo, Madagascar, 2015.
- [5] M.P. Randrianarison, N. Randrianandrasana, B. Rahelilarilao. « Flux des émissions aériennes et de gaz à effet de serre du charbon de bois par la méthode d'Analyse de Cycle de Vie ». International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT) Vol. 25, N°2, pp 24-37, 2021.
- [6] Organisation for Standardisation. « Management environnemental - Analyse de Cycle de Vie - Principes et cadre. International (ISO 14040) ». Genève, Suisse, 1997.
- [7] Organisation for Standardisation. « Management environnemental - Analyse de Cycle de Vie Définition de l'objectif et du champ d'étude (ISO 14040) ». Genève, Suisse, 2006.
- [8] Organisation for Standardisation. « Management environnemental – Analyse de Cycle de Vie – Inventaire de Cycle de Vie (ISO 14044) ». Genève, Suisse, 2006.
- [9] Organisation for Standardisation. « Management environnemental – Analyse de Cycle de Vie – Evaluation d'impacts (ISO 14044) ». Genève, Suisse, 2006.
- [10] Organisation for Standardisation. « Management environnemental – Analyse de Cycle de Vie – Interprétation des résultats (ISO 14043) ». Genève, Suisse, 2000.
- [11] Organisation for Standardisation. « Management environnemental – Analyse de Cycle de Vie – Interprétation des résultats (ISO 14044) ». Genève, Suisse, 2006.
- [12] ASA. « Etude des flux de bois-énergie entrant dans la ville d'Antananarivo. Réalisée par AIDES sur financement du Programme Agro-Sylviculture autour d'Antananarivo ». Union Européenne : Antananarivo, Madagascar, 2018.
- [13] MEEF. « Changement de la couverture de forêts naturelles à Madagascar : 2005-2010-2013 ». Ministère de l'Environnement, de l'Ecologie et des Forêts & Office National de l'Environnement : Antananarivo, Madagascar, 2015.
- [14] Norme « NF Bois de Chauffage », AFNOR, mise en place par le CTBA, 2001
- [15] Y. ROGAUME. « La combustion du bois et de la biomasse. Pollution atmosphérique ». p65-81, 2009.
- [16] A. AUTRET, Y. ROGAUME. "Production de Chaleur à partir du bois - Emissions atmosphériques - Notions de base", chapitre BE8750, Techniques de l'Ingénieur, 2011.
- [17] ADEME. « Guide des facteurs d'émission. Version 6.1. Calcul des facteurs d'émissions et sources bibliographiques utilisée. Chapitre 4 – Prise en compte des transports ».2010