

Flux Des Emissions Aériennes Et De Gaz A Effet De Serre Du Charbon De Bois Par La Méthode d'Analyse De Cycle De Vie

M.P. Randrianarison^{1,2}, N. Randrianandrasana^{1,2}, B. Rahelilarilao^{1,2}

¹ Ecole Doctorale (Ingénierie et Géoscience) INGE

² Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA) – BP 1500 Antananarivo Madagascar



Résumé – Le charbon de bois est un combustible de cuisson privilégié des ménages malgaches. Des gaz à effet de serre et d'autres gaz sont émis lors de la carbonisation, du transport et de l'utilisation de ce combustible solide. Cet article a pour objectif de quantifier les flux des émissions aériennes et de gaz à effet de serre du charbon de bois. L'Analyse de Cycle de Vie est la méthode adoptée depuis l'exploitation du bois jusqu'à l'utilisation de charbon de bois avec 1MJ d'énergie utilisée pour la cuisson prise comme Unité Fonctionnelle. Cette étude stipule des émissions aériennes de $763,08.10^{-6}$ éq SO₂/UF et de gaz à effet de serre 1,74 kg éq CO₂/UF dont environ 75% de celles-ci sont issues de la phase de production de charbon de bois et plus précisément de la carbonisation.

Mots-Clés – Bois-Energie, Eucalyptus, Pin, Carbonisation, Meule Traditionnelle, Combustion.

Abstract – The charcoal is a solid fuel mainly used for Malagasy household cooking. Greenhouse gases and other gases are emitted during the carbonization, transporting and cooking. The aim of this study is to quantify air emissions and greenhouse gases of charcoal. Life Cycle Assessment is adopted for this study since wood exploitation to charcoal utilization and 1MJ of useful energy from charcoal is taken as functional unit. This paper shows $763,08.10^{-6}$ éq SO₂/FU of air emissions, 1,74 kg éq CO₂/FU of greenhouse gases emissions and 75% of these are from charcoal manufacturing especially the carbonization.

Key Words – Wood Fuel, Eucalyptus, Pine, Carbonization, Traditional Kiln, Combustion.

I. INTRODUCTION

Le bois énergie est un produit de première nécessité (PPN) qu'il convient de gérer pour assurer l'approvisionnement des centres urbains dont la vie économique et la paix sociale dépendent. Ce combustible permet également aux populations rurales qui vivent de l'exploitation du bois d'obtenir des revenus suffisants [1]. L'approvisionnement durable en combustibles domestiques est au centre des récentes politiques énergétiques et environnementales de l'État à Madagascar [2] car la diminution de la couverture forestière de Madagascar estimée actuellement à 13 millions d'hectares, est évaluée à 1,39% par an et est considérée comme étant l'une des plus alarmantes par rapport aux autres pays tropicaux [3].

Les combustibles d'origine ligneuse tel le charbon de bois et le bois de chauffe demeureront longtemps les sources d'énergie domestique pour la plupart des familles malgaches et cette énergie traditionnelle ne pourra, pour de multiples raisons économiques, sociales ou simplement culturelles être concurrencée par celle des autres types tels que le gaz, le pétrole lampant, l'électricité, l'éolienne et le solaire [3]. Malgré la prolifération des recherches et actions sur les tentatives de substitution des combustibles ligneux par la valorisation des biomasses et des déchets d'origine végétale, le charbon de bois constituera la principale source d'énergie pour la satisfaction, à court et moyen terme, des besoins en énergie domestique [3].

Le volume de bois transformé en charbon chaque année à Madagascar est estimé à 6,3 millions de mètres cube et 18 000 000 mètres cubes de bois sont exploités chaque année pour être transformés en bois-énergie dont la moitié est associée à la production de charbon de bois [4].

Le processus de transformation du bois en charbon résulte d'une perte d'énergie considérable, nécessitant beaucoup plus de ressources forestières pour produire la même quantité d'énergie, les gaz produits par la carbonisation et la combustion ont une teneur élevée en gaz à effet de serre, les goudrons et l'acide pyroligneux peuvent avoir à la longue des effets nocifs sur le système respiratoire [4]. Le but de cette étude est alors d'évaluer les flux des émissions aériennes et de gaz à effet de serre du charbon de bois par la méthode d'ACV (Analyse de Cycle de Vie).

II. METHODOLOGIES

L'Analyse de Cycle de Vie est une technique d'évaluation des aspects environnementaux et des impacts environnementaux potentiels associés à un système de produits ISO 14040 (1997). Pour cette étude, nous suivons le cadre méthodologique (figure 1) normalisé par les ISO 14040 à 14043 (qui ont été ensuite revues et remplacées par la norme ISO 14044 en 2006 [5], [6], [7], [8] et [9]).

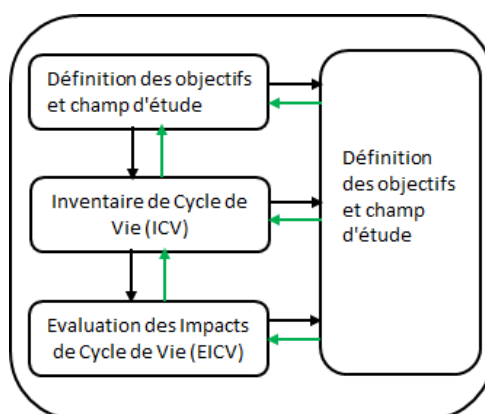


Figure 1 : Cadre méthodologique de l'ACV [5], [6], [7], [8] et [9].

II.1. Définition de l'objectif et champ d'étude

L'objectif de cette étude est de quantifier les flux des émissions aériennes et de gaz à effet de serre tout au long du cycle de vie du charbon de bois par la méthode d'ACV (Analyse de Cycle de Vie). Les émissions aériennes seront exprimées en kg équivalent de SO₂ tandis que les gaz à effet de serre en kg équivalent de CO₂.

II.1.1. Zone d'étude

Une étude relative à la filière bois-énergie concernant la région administrative d'Analamanga est déjà effectuée par Charpin M. *et al* [2]. L'Analyse de Cycle de Vie du charbon de bois est effectuée dans la Grande Agglomération d'Antananarivo (GAA) (figure 2). Le périmètre d'étude est situé dans la zone géographique des Hautes Terres de Madagascar, dans la région Analamanga (s'étend sur environ 3 % du territoire national : 17 442 km²). Près de 18 % de la population nationale, soit environ 4,6 millions d'habitants, vivent dans cette zone. Elle se démarque des autres régions du pays par son fort taux d'urbanisation (69 %) et une densité de population relativement élevée (264 habitants/km²). La population, en 2018 est estimée à 4 586 864 habitants et consomme près des trois quarts de la production nationale en charbon de bois [2] avec 100 kg/personne/an [10].

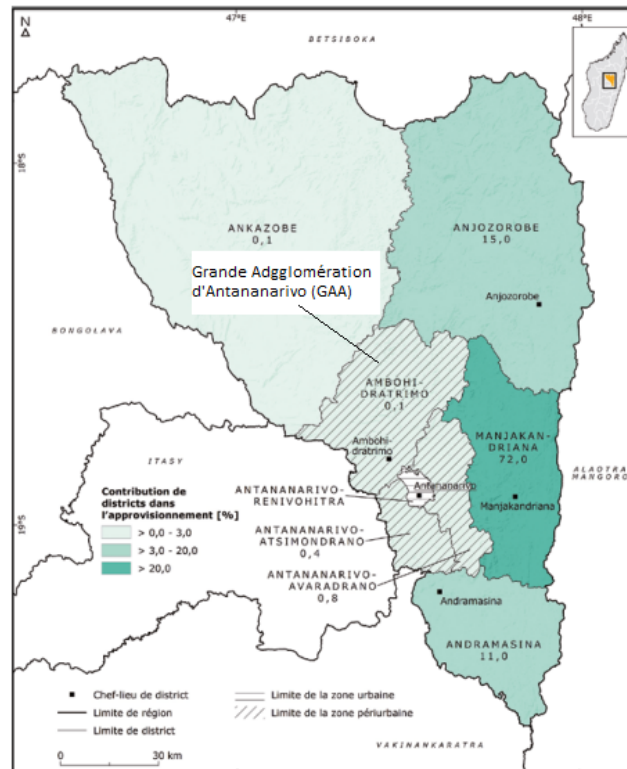


Figure 2 : La Grande Agglomération d'Antananarivo (GAA) [2].

II.1.2. Unité Fonctionnelle

Pour permettre une comparaison homogène avec d'autres combustibles, 1MJ d'énergie issue du charbon de bois, utilisée pour la cuisson est prise comme Unité Fonctionnelle (UF) dans cette étude.

II.1.3. Frontières du système

L'Analyse de Cycle de Vie est effectuée « du berceau à la fin de l'utilisation » c'est-à-dire depuis l'exploitation du bois, principale matière première pour la production du charbon de bois jusqu'à l'utilisation de ce combustible. Le système de produits, regroupant les différentes étapes considérées dans ce travail est présenté par la figure 3. Les impacts environnementaux relatifs aux fabrications de véhicule, des machines et la filière de production de carburant (gas-oil) qui font partie du processus de second plan ne sont pas tenus en compte.

Les techniques traditionnelles de carbonisation sont prédominantes à Madagascar [2], dans cette étude, les différentes étapes de production de charbon de bois (à part le transport du lieu de carbonisation vers les grossistes) sont intégralement manuelles qui se traduit par l'absence de mécanisation.

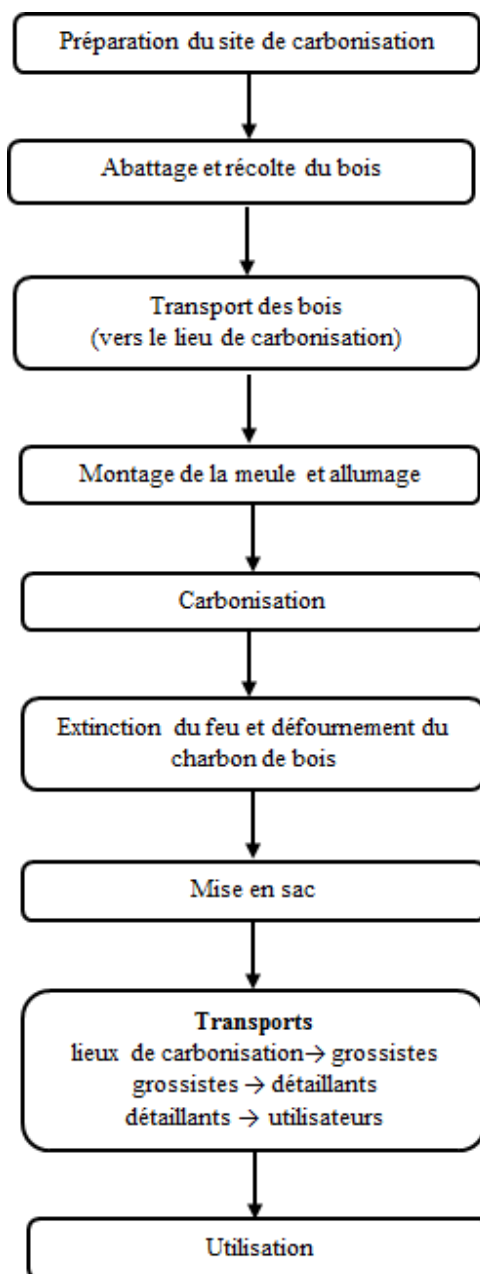


Figure 3 : Système de produits du charbon de bois.

- Préparation du site de carbonization

Le charbonnier doit nettoyer et dégager un layon tout autour de la forêt à exploiter pour la production de charbon de bois : nettoyage (débroussaillage) sur une partie de 1 à 2 m autour du four et dégagement d'un rayon de 50 m autour du site est prévu par les textes réglementaires. Ensuite, il y a le creusement du four sur une profondeur de 50 à 75cm de profondeur (photo 1).

Le choix du site est en fonction de la disponibilité en bois.



Photo 1 : Délimitation du four [11].

- Abattage et récolte des bois

L'abattage des arbres doit se faire au ras du sol, à une hauteur maximale de 15 à 20 cm, pour permettre aux souches des arbres abattus de se régénérer plus facilement et pour éviter aux charbonniers de se blesser lorsqu'ils travaillent dans la zone d'exploitation.

- Montage de la meule – carbonisation

Les longerons sont disposés dans le sens de la longueur de la meule.

La disposition des bois sur le plancher dans la meule traditionnelle se fait par diamètre décroissant dans le sens de la longueur (photo 2).



Photo 2 : Chargement [11]

On entame ensuite la construction des événements d'allumage et événements d'aération constitués de trous pratiqués sur les parois. Il devait y avoir également de la cheminée à partir des piquets de chargement.

Il existe un système « coffrage » sur les parois latérales du four : les feuilles sont recouvertes de la terre soutenue par des bois ronds. La bouche d'allumage situé sur la partie inférieure d'un côté (photo 3).



Photo 3 : Mise à feu [11].

- Extinction du et défournement du charbon de bois

L'absence de fumée sortant des événements ou la présence de fumée de couleur "bleue transparente" indique que la carbonisation est achevée. A ce moment, le charbonnier devra :

- boucher tous les événements avec de la terre pour qu'il n'y ait plus d'entrée ni de sortie d'air dans la meule ;
- bien recouvrir de terre toute les autres sorties ou entrées d'air qui ont pu apparaître (fentes au niveau du recouvrement) ;
- bien tasser la partie supérieure de la meule à l'aide d'une pelle ou une tige de bois pour supprimer le vide qui s'est créé par voutage entre le toit de la meule ayant séché et la charge de bois carbonisée ayant fortement diminué de volume. La carbonisation dure environ 15 jours. Il faut alors laisser refroidir la meule. La durée d'extinction et de refroidissement du four est d'environ 2 à 3 jours.

L'utilisation d'eau est nécessaire pour l'extinction d'éventuelles braises.

- Mise en sac du charbon de bois

Le charbon est entassé dans les sacs à l'aide d'une fourche, en évitant de mettre du sable et de la terre dans les sacs (photo 4).



Photo 4 : Sacs de charbon de bois [11].

- Transports

Les exploitants n'étant pas en possession d'un camion font appel à des transporteurs pour l'acheminement du charbon vers les grossistes (Antananarivo) où les détaillants s'approvisionnent. Les ménages achètent du charbon de bois chez les détaillants environnants.

- Utilisation

Le charbon de bois est destiné pour la cuisson domestique et la restauration (restaurant, gargote, ...)

II.2. Inventaire de cycle de vie (ICV)

Les données relatives aux caractérisations des filières, de l'approvisionnement, des flux et du potentiel de production en bois-énergie dans la région Analamanga (agglomération d'Antananarivo) sont issues des études effectuées par Charpin M *et al* [2], AIDES [12] [13], Land Ressources [14] et de GEMIS (Global Emission Model of Integrated Systems), logiciel d'ACV.

II.2.1. Carbonisation et types de meule (four)

La carbonisation en meule traditionnelle est très répandue et adoptée à Madagascar à cause de la simplicité de sa mise en œuvre. Le coût d'installation est faible, comparé à celui de fours plus sophistiqués, comme les meules dites « casamançaises », qui nécessitent l'achat de fûts métalliques [3].

II.2.2. Provenance du charbon de bois

En 2017, la quantité de charbon destinée pour la grande agglomération d'Antananarivo (GAA) est estimée à 225 515 tonnes [2]. L'approvisionnement venant de la Région Analamanga est présenté par le tableau 1.

Tableau 1 : Provenance du charbon de bois approvisionnant la ville d'Antananarivo en 2017 (par quelques districts de la région Analamanga)

District (nom)	Quantité de charbon	
	(t/an)	Pourcentage massique par rapport à la quantité totale
Manjakandriana	76 381	33,87
Anjozorobe	15 685	6,96
Andramasina	11 933	5,29
Antananarivo Avaradrano	861	0,38
Antananarivo Atsimondrano	452	0,20
Ankazobe	153	0,07
Ambohidratrimo	140	0,06

Source : [11]

Les quantités de charbon provenant des régions hors Analamanga et à destination de la GAA atteignent près de 120 000 tonnes de charbon de bois. Avec respectivement 45% et 5 %, les régions Alaotra Mangoro et Vakinankaratra fournissent la moitié des volumes recensés [15] (tableau 2).

Tableau 2 : Provenance du charbon de bois approvisionnant la ville d'Antananarivo, par d'autres régions hors Analamanga (2017).

Région	Quantité de charbon	
	(t/an)	Pourcentage massique par rapport à la quantité totale
Diana	96	0,04
Sofia	419	0,19
Boeny	1 319	0,58
betsiboka	75	0,03
Melaky	3	0,00
Alaotra Mangoro	101 989	45,22
Vakinankaratra	10 288	4,56
Menabe	130	0,06
Itasy	337	0,15
Bongolava	25	0,01
Atsinanana	1 701	0,75
amoron'i mnia	1 121	0,50

Haute Matsiatra	2 267	1,01
Ihorombe	30	0,01
Atsimo andrefana	98	0,04
Anosy	8	0,00
Androy	4	0,00

Source : [14]

II.2.3. Transport du charbon de bois vers le lieu d'utilisation

L'acheminement du charbon de bois sont effectué par voie routière avec des camions et camionnettes de 3,51 t à 5 t de PTAC (photo 5) [2].



Photo 5 : Enquêteurs interrogeant un transporteur de charbon de bois à l'entrée de l'agglomération d'Antananarivo (Photo UCP ASA) [2].

Les distances entre les districts et les chefs-lieux des Régions approvisionnant la GAA en charbon de bois sont données par le tableau 3.

Tableau 3 : Distances entre les districts et les chefs-lieux des Régions approvisionnant la GAA en charbon de bois.

District /région	Distance (km)	District /région	Distance (km)
Manjakandriana	44,40	Betsiboka	253,40
Anjozorobe	91,19	Alaotra Mangoro	274,00
Andramasina	40,80	Vakinankaratra	211,00
Antananarivo Avaradrano	29,00	Menabe	653,40
Antananarivo Atsimondrano	12,00	Itasy	86,00
Ankazobe	99,00	Bongolava	210,00
Ambohidratrimo	21,00	Atsinanana	353,20
Diana	1108,60	Amoron'i Mania	264,00
Sofia	689,30	Haute Matsiatra	413,80
Boeny	565,00	Ihorombe	605,10
		Atsimo Andrefana	929,40

Source : [2].

II.2.4. Essences forestières exploitées

Les essences forestières majoritairement exploitées pour la production de charbon de bois à Madagascar sont :

- les eucalyptus (74 %), provenant principalement de reboisements privés ;
- les pins (22 %), provenant principalement des rebus d'exploitation de la société Fanalamanga située dans la région d'Alaotra Mangoro et
- la part des essences provenant des forêts naturelles s'élève à 4 % [2].

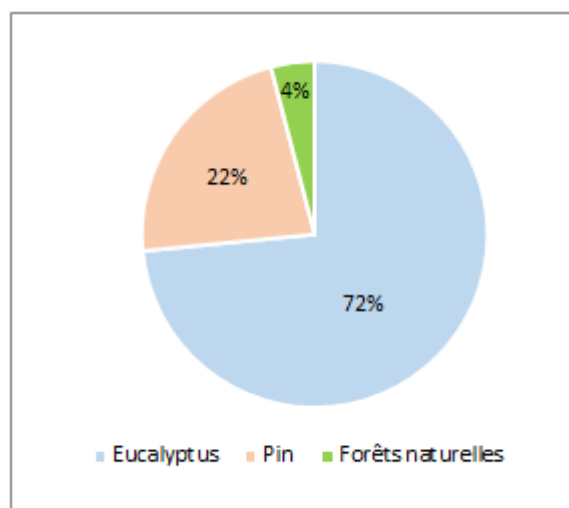


Figure 4 : Essences forestières exploitées [2]

II.2.5. Caractéristiques du charbon de bois

D'après Charpi M. *et al* [2], le rendement pondéral moyen de la carbonisation est de l'ordre de 12%. La masse volumique apparente du charbon de bois ne dépend pas seulement de la densité, mais aussi par la répartition des tailles, et se situe dans une fourchette de 180 à 220 kg / m³.

Le charbon de bois a une teneur relativement faible en humidité (de l'ordre de 3 à 10 %). La teneur calorifique du charbon de bois est liée à la quantité de carbone fixée et dépend fortement de la température de carbonisation. Elle varie entre 27 et 33 MJ / kg. Les températures de carbonisation donnent un rendement plus élevé du charbon de bois, mais ce charbon de bois est de qualité inférieure, corrosif en raison de sa teneur en goudrons acides et produit beaucoup de fumée noire [16] [17].

Pourtant avec la technique traditionnelle, il est nécessaire de couper en moyenne 100 kg de bois pour produire 10 kg de charbon [1].

Lors de la manipulation et le transport du charbon de bois, il se forme du poussier ou fine de charbon, un résidu solide présentant un pourcentage de 10% à 20% du poids du charbon [18]. Les pouvoirs calorifiques des bois utilisés et du charbon sont issus du logiciel GEMIS (Global Emission Model of Integrated Systems).

Tableau 4 : Pouvoirs calorifiques des bois et du charbon de bois.

	PCI (MJ/kg)
Eucalyptus	9,66
Pin	19
Forêts naturelles	14,4
Charbon de bois	30,09

Source : GEMIS

II.3. Evaluation d'impacts de Cycle de Vie (EICV)

II.3.1. Postes d'émission

Dans ce travail, les postes d'émission de gaz à effet de serre prises en compte sont :

- la carbonisation ;
- le transport du charbon de bois vers les grossistes.
- l'utilisation du charbon c'est-à-dire la phase de combustion du charbon de bois lors de la cuisson.

II.3.2. Approches et hypothèses

➤ Emissions de combustion : pour le calcul, nous suivons le guide méthodologique [20] stipulant que quand la 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), 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. [19]. D'après Global Forest Watch, en 2017 [21] Madagascar se classe quatrième pays en terme de déforestation avec 510 000 hectares détruits en une année, soit la disparition de 3,8% de forêts. Comme il manque d'indications permettant de nous orienter sur la valeur à adopter pour le cas de déforestation à Madagascar, nous retenons la valeur moyenne de 35% dans cette étude.

➤ Pour le transport, il est imposé par l'Analyse de Cycle de Vie dans les calculs relatifs aux transports un retour à vide avec un taux de charge moyen de 50%. La consommation en gas-oil de 18,5 litres par 100 kilomètres relative aux camions et camionnettes de 3,51 t à 5 t de PTAC est également optée. Ce sont des données issues du Guide des facteurs d'émission de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) [20].

Les calculs sont effectués à l'aide de GEMIS (Global Emission Model of Integrated Systems).

➤ Carbonisation : nous tenons compte des types et pourcentages des essences exploitées (§ II.2.4.) pour le calcul des émissions issus de cette étape.

Le processus crée pour le charbon de bois est présenté par la figure 5.

Les émissions aériennes totales sont données par la formule suivante :

$$E_a = E_{a(carb)} + E_{a(trans)} + E_{a(comb)} \quad (1)$$

Avec :

E_a : émissions aériennes totales (kg éq SO₂)

$E_{a(carb)}$: émissions aériennes issues de la carbonisation du bois (kg éq SO₂)

$E_{a(trans)}$: émissions aériennes issues du transport de charbon de bois (kg éq SO₂)

$E_{a(comb)}$: émissions aériennes issues de la combustion du charbon de bois (kg éq SO₂)

Les émissions en gaz à effet de serre (GES) totales sont obtenues par la formule suivante :

$$E_{GES} = E_{GES(carb)} + E_{GES(trans)} + E_{GES(comb)} \quad (2)$$

Avec :

E_a : émissions en GES totales (kg éq SO₂)

$E_{a(carb)}$: émissions en GES issues de la carbonisation du bois (kg éq SO₂)

$E_{a(trans)}$: émissions en GES issues du transport de charbon de bois (kg éq SO₂)

$E_{a(comb)}$: émissions en GES issues de la combustion du charbon de bois (kg éq SO₂)

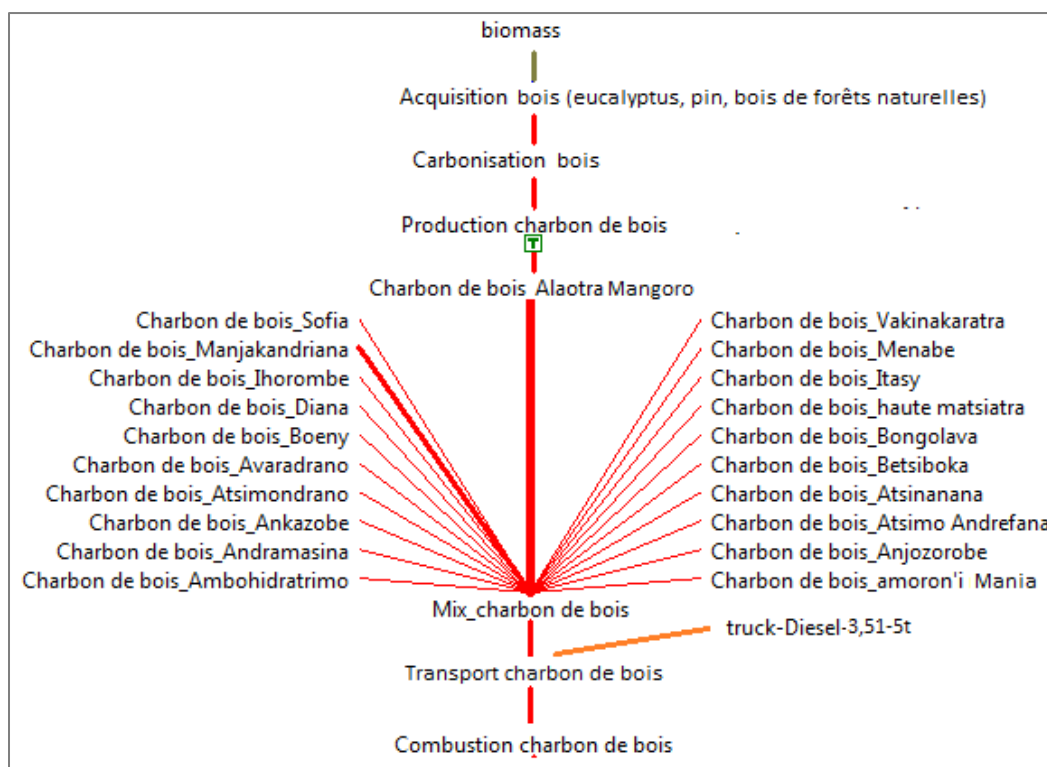


Figure 5 : Processus du charbon de bois

III. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. Emissions aériennes

Les quantités d'émissions aériennes (kg éq SO₂/UF) obtenues par GEMIS sont données par la figure 6.

émissions aériennes		
	direkt Vorkette	somme
équivalent SO ₂	763,08*10 ⁻⁶	763,08*10 ⁻⁶ kg
TOPP-Äquivalent	35,247*10 ⁻³	35,247*10 ⁻³ kg
SO ₂	101,57*10 ⁻⁶	101,57*10 ⁻⁶ kg
NO _x	139,26*10 ⁻⁶	139,26*10 ⁻⁶ kg
HCl	642,61*10 ⁻⁶	642,61*10 ⁻⁶ kg
HF	3,6560*10 ⁻⁹	3,6560*10 ⁻⁹ kg
poussière	9,4878*10 ⁻³	9,4878*10 ⁻³ kg
CO	313,15*10 ⁻³	313,15*10 ⁻³ kg
NM VOC	4,1922*10 ⁻⁶	4,1922*10 ⁻⁶ kg
H ₂ S	-37,00*10 ⁻¹⁵	-37,00*10 ⁻¹⁵ kg
NH ₃	-2,620*10 ⁻¹²	-2,620*10 ⁻¹² kg
As (air)	752,4*10 ⁻¹⁵	752,4*10 ⁻¹⁵ kg
Cd (air)	438,3*10 ⁻¹⁵	438,3*10 ⁻¹⁵ kg
Cr (air)	3,652*10 ⁻¹²	3,652*10 ⁻¹² kg
Hg (air)	1,151*10 ⁻¹²	1,151*10 ⁻¹² kg
Ni (air)	2,973*10 ⁻¹²	2,973*10 ⁻¹² kg
PAH (air)	10,09*10 ⁻¹⁸	10,09*10 ⁻¹⁸ kg
Pb (air)	22,97*10 ⁻¹²	22,97*10 ⁻¹² kg
PCDD/F (air)	36,65*10 ⁻¹⁸	36,65*10 ⁻¹⁸ kg

Figure 6 : Emissions aériennes totales par unité fonctionnelle (UF).

Le long du cycle de vie du charbon de bois, depuis l'acquisition des bois jusqu'à la combustion du charbon de bois, il y a une émission de 763,08. 10⁻⁶ kg éq de SO₂/UF réparties comme suit (figure 7).

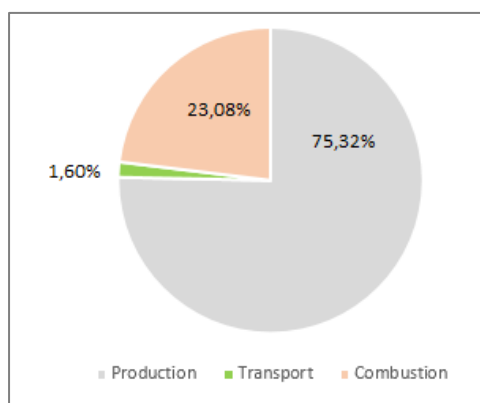


Figure 7 : Ratios d'émissions aériennes par poste d'émission.

III.2. Emissions de gaz à effet de serre

Les quantités d'émissions de gaz à effet (en kg éq CO₂/UF) obtenues par GEMIS sont présentées par la figure 8.

GES		
	direkt Vorkette	somme
équivalent CO2	1,7147878	1,7147878 kg
CO2	$596,37 \cdot 10^{-3}$	$596,37 \cdot 10^{-3}$ kg
CH4	$44,736 \cdot 10^{-3}$	$44,736 \cdot 10^{-3}$ kg
N2O	$87,805 \cdot 10^{-9}$	$87,805 \cdot 10^{-9}$ kg
perfluorométhane	$68,86 \cdot 10^{-15}$	$68,86 \cdot 10^{-15}$ kg
éthane perfluoré	$8,639 \cdot 10^{-15}$	$8,639 \cdot 10^{-15}$ kg

Figure 8 : Emissions totales de gaz à effet de serre par unité fonctionnelle (UF).

Depuis l'acquisition des bois jusqu'à la combustion du charbon de bois, il y a une émission en GES de 1,74 kg éq de CO₂/UF, réparties comme suit (figure 9).

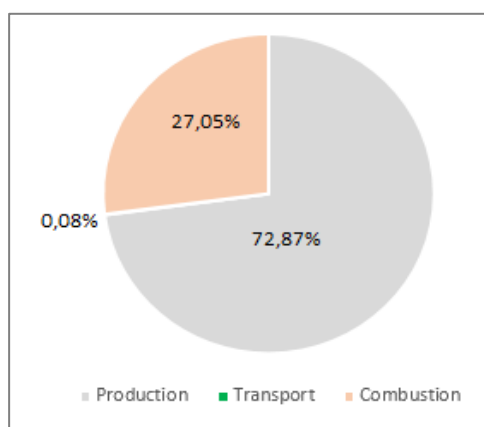


Figure 9 : Ratios d'émissions de gaz à effet de serre par poste d'émission.

Les émissions quantifiées tout au long du cycle de vie du charbon de bois dans cette étude sont prédominées par celles relatives à la production du charbon et plus exactement de la carbonisation. Presque 75% des émissions sont imputées à cette étape. Les parts du transport au point de vue émissions aériennes et de gaz à effet de serre sont négligeables, elles ne représentent respectivement que 1,6% et 0,08%.

Ces fortes émissions associées à la carbonisation sont dues à la technique traditionnelle considérée dans cette étude et également à la majoration de 25% (à cause du taux de déforestation) préconisée par le Guide des facteurs d'émission en Analyse de Cycle de Vie [21]. La technique traditionnelle utilise encore du bois vert, c'est-à-dire absence de séchage.

Des études relatives à l'Analyse de Cycle de Vie de différents combustibles domestiques au Ghana [21] stipule un Potentiel de Réchauffement Global de 1,45kg éq CO₂/MJ pour le charbon, valeur voisine trouvée dans cette étude, qui s'explique par le fait que la technique traditionnelle est encore persistante dans les pays en développement et dont le mode de fabrication se distingue par l'absence de mécanisation.

Concernant les émissions aériennes, une étude effectuée par Afrane G., Ntiamoah A. sur une étude comparative d'ACV de combustibles domestiques (charbon de bois, gaz naturel et biogaz) au Ghana [21], donne une valeur de $16,9 \cdot 10^{-6}$ éq SO₂/MJ alors que pour Madagascar, on a une émission de $763,08 \cdot 10^{-6}$ éq SO₂/MJ. Cette grande différence est due aux compositions chimiques des bois (avec un pourcentage massique de 0,14% pour l'eucalyptus et 0,007% pour les forêts naturels) , données utilisées et fournies par GEMIS.

Dans le cas où ce taux de chlore, dans la composition du bois diminue, par exemple de l'ordre de 0,0014% pour l'eucalyptus, les émissions aériennes deviennent $205,22 \cdot 10^{-6}$ éq SO₂/MJ. Une analyse élémentaire des bois s'avère alors nécessaire pour de plus amples précisions sur les émissions aériennes.

Pour diminuer l'émission de gaz à effet de serre, l'adoption de technique améliorée s'avère nécessaire, l'utilisation de bois secs, la réalisation de meules améliorées en l'occurrence sur la disposition des bois et sur l'utilisation combinée de cheminées et d'évents métalliques.

REFERENCES

- [1] Montagne P., Razafimahatratra S., Rasamindisa A., Crehay R. 2010. Arina Le charbon de bois à Madagascar, entre demande urbaine et gestion durable. Antananarivo, CITE, 187 p.
- [2] Charpin M., Legeay D., Rabemanantsoa N., Richter F. 2019. Caractérisation des filières bois-énergie et élaboration du schéma d'approvisionnement en bois-énergie de la région Analamanga, Madagascar. *Bois et Forêts des Tropiques*, 340 : 13-25. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2019.340.a31704>
- [3] FOFIFA. Bonnes pratiques de carbonisation à Madagascar carbonisation à Madagascar. Projet caramcodec, Commission européenne- Executive agency for competitiveness and Innovation (EacI) Unit 1 - Renewable Energy
- [4] Minten B., Sander K., Stifel D. 2013. Forest management and economic rents: Evidence from the charcoal trade in Madagascar. *Energy for Sustainable Development*, 17, 106–115
- [5] ISO. 1997. Management environnemental - Analyse de Cycle de Vie - Principes et cadre. International. Organisation for Standardisation (ISO 14040), Genève, Suisse.
- [6] ISO. 1998. Management environnemental – Analyse de Cycle de Vie - Définition de l'objectif et du champ d'étude et analyse de l'inventaire. International Organisation for Standardisation (ISO 14041), Genève, Suisse.
- [7] ISO. 1998. Management environnemental – Analyse de Cycle de Vie - Évaluation d'impact du cycle de vie. International Organisation for Standardisation (ISO 14042), Genève, Suisse.
- [8]. ISO. 2000. Management environnemental – Analyse de Cycle de Vie – Interprétation. International Organisation for Standardisation (ISO 14043), Genève, Suisse.
- [9]. ISO. 2006. Management environnemental- Analyse du cycle de vie- Exigences et lignes directrices. International Organisation for Standardisation (ISO 14044), Genève, Suisse.
- [10] AIDES. 2012. Diagnostic du secteur énergie à Madagascar. Quantification de la demande en charbon de bois.
- [11] RASAMINDISA A. M. 2013. La production du charbon de bois d'eucalyptus : les techniques d'amélioration du rendement
- [12] AIDES. 2018a. Étude des flux de bois-énergie entrant dans la ville d'Antananarivo. Antananarivo, Madagascar, Cabinet AIDES, 54 p.
- [13] AIDES, 2018b. Étude des prix du bois-énergie (charbon de bois et bois de feu) dans la ville d'Antananarivo. Antananarivo, Madagascar, Cabinet AIDES, 34 p.
- [14] Land Ressources, 2018. Étude du potentiel de production en bois-énergie dans le bassin d'approvisionnement de la ville d'Antananarivo. Antsakaviro, Madagascar, Land Ressources, 36p.
- [15] MEEF-ONE, 2015. Changement de la couverture de forêts naturelles à Madagascar : 2005-2010-2013. Ministère de l'Environnement, de l'Écologie et des Forêts, Office national de l'environnement, Madagascar, 18 p.
- [16] Pennise, D. M., K. R. Smith, J. P. Kithinji, M. E. Rezende, T. J. Raad, J. Zhang, and C. Fan. 2001. Emissions of greenhouse gases and other airborne pollutants from charcoal making in Kenya and Brazil. *Journal of Geophysical Research* 106(D20): 24143–24155.
- [17] Kammen, D. M., and J.L. Debra. 2005. Review of technologies for the production and use of charcoal: Renewable and appropriate energy laboratory report. Berkeley, CA, USA: *Energy and Resources*, Group & Goldman School of Public Policy, University of California, Berkeley.
- [18] FAO. 1983. Techniques simples de carbonisation, Chap.11 : Briquettes de charbon. Département des Forêts.
- [19] ADEME. 2010. Guide des facteurs d'émissions. Version 6.1 Calcul des facteurs d'émissions et sources bibliographiques utilisées.
- [20] Global Forest Watch. 2017 was the second lost-worst year on Record for Tropical Tree Cover Loss, 2018.
- [21] Afrane G., Ntiamoah A. 2011. Comparative Life Cycle Assessment of Charcoal, Biogas, and Liquefied Petroleum Gas as Cooking Fuels in Ghana, *Research and analysis*. Volume 15, Number 4.