



UNIVERSITÉ DES  
MASCAREIGNES  
SAVOIR, C'EST POUVOIR

Journées de Recherche des ISTs et de leurs partenaires internationaux - 2 et 3 décembre 2020, Antsiranana  
« *L'innovation et le développement durable : perspectives, enjeux et défis sociétaux* »

## **Article 13 : Evolution du contenu en gaz à effet de serre par kWh du mix-électrique du Réseau Interconnecté d'Antananarivo de 2017 à 2018**

**M. P. Randrianarison<sup>1</sup>, N. Randrianandrasana<sup>1</sup>, J. K. Binguira Anderson<sup>1</sup>,  
B. Raheliarilalao<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, B.P. 1500

Correspondant : mino.randrianarison@gmail.com

### **Résumé**

Le but de cette étude est de cerner l'évolution du contenu en gaz à effet de serre par kilowattheure d'électricité produit par le Réseau Interconnecté d'Antananarivo de 2017 à 2018. Ce réseau est un des trois réseaux interconnectés opérés par la JIRAMA. Le mix-électrique produit par ce réseau est d'origines thermique, hydraulique et solaire photovoltaïque.

Des collectes de données auprès de la JIRAMA ont été réalisés afin d'avoir les origines, les structures d'électricité, les productions annuelles, les consommations en gas-oil, en fuel-oil, en lubrifiants des groupes et machines pour le réseau étudié.

Des recherches bibliographiques ont été également effectuées afin d'obtenir les facteurs d'émission en kg équivalent de gaz carbonique par kilowattheure de la combustion des carburants et lubrifiants.

Nous avons calculé en premier lieu les contenus en gaz à effet de serre des électricités d'origines thermique, hydraulique et solaire. Pour l'électricité d'origine thermique, ce contenu est obtenu à partir des quantités de fuel-oil, de gas-oil et de lubrifiants consommés lors de la production d'électricité et des facteurs d'émissions de ces

produits hydrocarbonés. Concernant les électricités d'origines hydraulique et solaire photovoltaïque, les émissions sont déduites des études bibliographiques.

Le contenu en gaz à effet de serre d'un kWh d'électricité du Réseau Interconnecté d'Antananarivo a été calculé à travers les ratios des trois origines du mix-électrique du réseau ainsi que les émissions respectives.

En 2017, ce contenu est de 0,59kg éq CO<sub>2</sub> contre 0,42kg éq CO<sub>2</sub> en 2018. Cette évolution est due à une injection de production d'électricité d'origine solaire ainsi que l'augmentation de la production d'hydroélectricité et enfin la substitution du gas-oil par du fuel lourd pour la production d'électricité d'origine thermique.

**Mots clés :** Gaz à effet de serre, réseau interconnecté d'Antananarivo, hydroélectrique, solaire, thermique, gas-oil, fuel-oil.

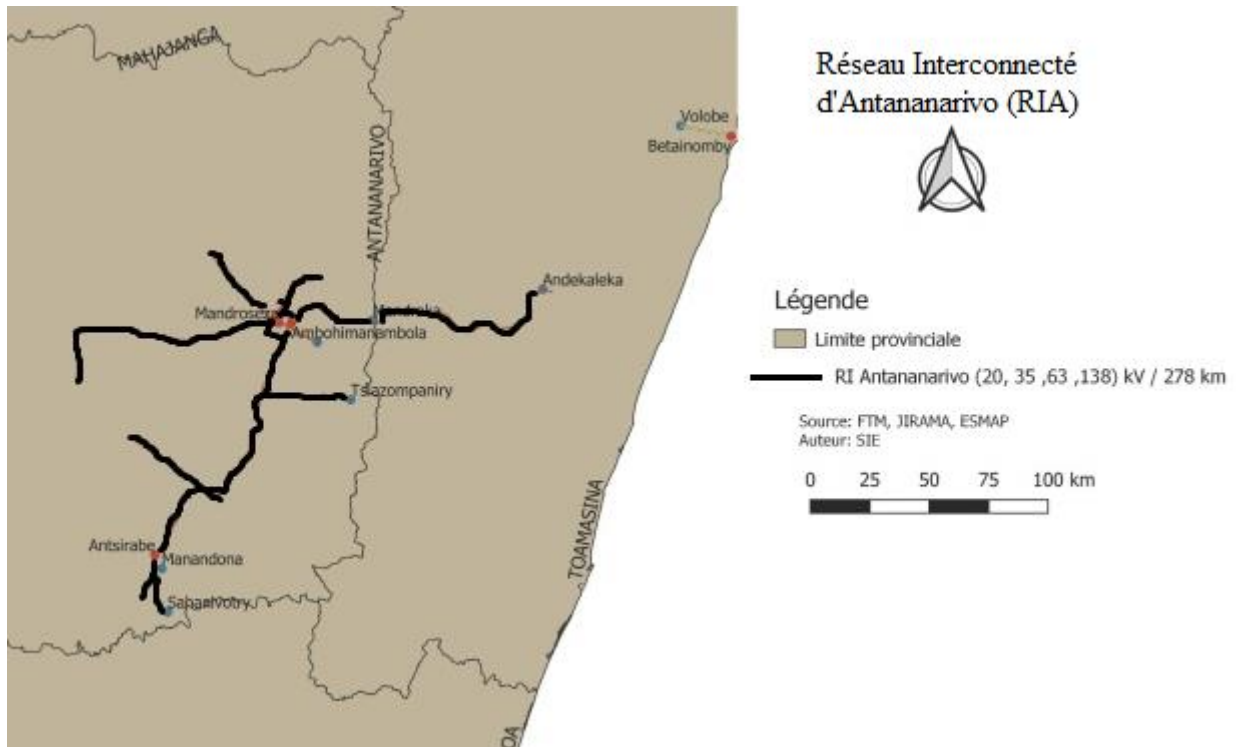
## 1. INTRODUCTION

L'énergie constitue l'une des bases de l'économie et du développement d'un pays. Des études effectuées révèlent que l'accès à l'énergie électrique reste faible à Madagascar [1], [2]. L'enquête effectuée par l'Institut National de la Statistique a relevé un pourcentage de 13,3% des ménages en 2010 [1] et le bilan énergétique national en 2017 stipule un pourcentage de 16% et dont la moitié de ce dernier est attribuée à la Région Analamanga [2].

Presque la totalité des installations de production, de transport, de répartition et de distribution d'électricité à Madagascar est assurée par le réseau de la société d'Etat JIRAMA (littéralement Electricité et Eau de Madagascar), qui approvisionne les milieux urbains, et via les actions de l'ADER (Agence pour le Développement de l'Electrification Rurale), une structure chargée par le Ministère en charge de l'Energie de promouvoir et développer l'électrification en milieu rural [3].

La JIRAMA opère sur trois principaux réseaux interconnectés :

- Le Réseau Interconnecté d'Antananarivo (RIA)
- Le Réseau Interconnecté de Toamasina (RIT) et
- Le Réseau Interconnecté de Fianarantsoa (RIF).



**Figure 1** : Réseau Interconnecté d'Antananarivo (source : JIRAMA)

Madagascar a pour but de donner accès à 70% de la population d'ici 2030 avec des services énergétiques fiables, durables, modernes et abordables [2]. C'est une politique énergétique voulant accélérer l'électrification tout en protégeant l'environnement et réduire l'émission de gaz à effet de serre (GES).

Pour mettre en place une planification énergétique durable, une connaissance du contenu en GES pour chaque kWh d'électricité est nécessaire. Des valeurs ont été publiées dans un ouvrage de l'Agence Internationale de l'Energie [4] fournissant des facteurs d'émission par kWh d'électricité par pays. Pour le cas de Madagascar, son facteur d'émission n'y est pas encore répertorié.

Notre étude a pour objectif alors de contribuer à l'estimation du contenu en gaz effet de serre de l'électricité à Madagascar, en commençant par l'étude du plus important réseau interconnecté, le Réseau Interconnecté d'Antananarivo (RIA).

## 2. CONTENU

### 2.1. Présentation du domaine d'étude

En 2017, ce réseau est constitué d'hydroélectricité, de l'électricité d'origine thermique en 2018. En 2018, l'état a lancé une nouvelle politique énergétique en introduisant de l'électricité d'origine solaire photovoltaïque (PV) (Tableau 1).

**Tableau 1** : Origines de la production du mix-électrique du RIA en 2017 et 2018

	<b>Année 2017</b>	<b>Année 2018</b>
<b>Hydroélectricité</b> [kWh]	710 789 374	885 964 153
<b>Electricité de source thermique</b> [kWh]	476 879 146	359 909 351
<b>Electricité de source solaire (PV)</b> [kWh]		15 042 640
<b>Production Brute Totale</b> [kWh]	<b>1 187 668 520</b>	<b>1 260 916 144</b>

Source : JIRAMA

## 2.2. Méthode

Que ce soit dans une centrale avec une éolienne ou un barrage hydroélectrique ou autre, l'électricité est toujours produite à partir d'une énergie dite "primaire" déjà disponible dans la nature (produits pétroliers, solaire, ...). [5], [6], [7]

Les émissions en gaz à effet de serre pour la production d'électricité sont issues :

- des émissions de combustion, de l'énergie primaire utilisée,
- des émissions amont liées à la mise à disposition de cette énergie primaire à la centrale électrique,
- des émissions qui ont été engendrées par la construction de l'installation de production (qu'il s'agisse d'une centrale produisant en masse ou d'un panneau solaire),
- des pertes en ligne car cette énergie perdue a conduit à des émissions [5].

Pour notre étude, les émissions en amont liées à la mise à disposition de cette énergie primaire à la centrale électrique et celles engendrées par la construction de l'installation de production ne sont pas considérées.

Toutefois, le contenu en gaz à effet de serre d'un kilowattheure du mix-électrique produit par le RIA tient compte des émissions liées à :

- l'énergie livrée par le réseau ;
- l'énergie consommée par les auxiliaires (lors de la production de l'électricité) et,
- aux pertes primaires (Tableau 2).

**Tableau 2** : Productions d'électricité par le RIA pour les années 2017 et 2018

	<b>Année 2017</b>	<b>Année 2018</b>
Auxiliaires [kWh]	3 662 552	6 933 113
Production nette [kWh]	1 184 005 968	1 253 983 031
Energie livrée par RIA [kWh]	1 099 995 427	1 148 227 247
Pertes primaires [kWh]	84 010 542	105 755 784
<b>Production Brute Totale</b> [kWh]	<b>1 187 668 520</b>	<b>1 260 916 144</b>

Source : JIRAMA

La production nette (PN) est constituée par l'énergie livrée ( $E_{iv}$ ) par le réseau et les pertes ( $p$ ), tandis que la production brute (PB) englobe la production nette (PN) et la quantité d'électricité consommée par les auxiliaires (Aux).

Les structures de la production du mix-électrique du RIA sont présentés par le tableau 3 suivant.

**Tableau 3** : Structures de la production du mix-électrique du RIA

	Hydroélectricité [%]	Electricité de source thermique [%]	Electricité de source solaire (PV) [%]
Année 2017	59,85	40,15	0
Année 2018	70,26	28,54	1,19

Source : JIRAMA

Le contenu en gaz à effet de serre d'un kWh de mix-électrique du RIA est donné par la formule (1) suivante :

$$CGES_{RIA} = (p_h \cdot CGES_h) + (p_{th} \cdot CGES_{th}) + (p_{sol} \cdot CGES_{sol}) \quad (1)$$

Avec :

$CGES_{RIA}$  : Contenu en gaz à effet de serre d'un kWh d'électricité produit par le RIA (en g éq.C/kWh) ;

$CGES_h$  : Contenu en gaz à effet de serre d'un kWh d'hydroélectricité, produit par le RIA (en g éq.C/kWh) ;

$CGES_{th}$  : Contenu en gaz à effet de serre d'un kWh d'électricité d'origine thermique, produit par le RIA (en g éq.C/kWh) ;

$CGES_{sol}$  : Contenu en gaz à effet de serre d'un kWh d'électricité d'origine solaire (PV), produit par le RIA (en g éq.C/kWh) ;

$p_h$ ,  $p_{th}$  et  $p_{sol}$  : sont respectivement les ratios de l'hydroélectricité, et des électricités d'origines thermique et solaire (PV).

### 2.2.1. Calcul du contenu en gaz à effet de serre d'un kWh d'électricité d'origine thermique

Le mix électrique du RIA exploite de plus en plus les sources thermiques fonctionnant essentiellement avec des fiouls importés.

Notre calcul est basé sur les consommations données par le tableau 4.

**Tableau 4** : Consommations spécifiques en gasoil, fuel-oil et lubrifiant par kWh d'électricité de source thermique, produit par le RIA

	<b>Année 2017</b>	<b>Année 2018</b>
<b>Production Brute Totale</b>	<b>1 187 668 520</b>	<b>1 260 916 144</b>
Consommation Spécifique en GO [g/kWh]	236,42	239,23
Consommation Spécifique en FO [g/kWh]	224,90	219,93
Consommation Spécifique en lubrifiant [g/kWh]	0,040	0,065

Source : JIRAMA

Le contenu en GES d'un kWh d'électricité d'origine thermique, produit par le RIA est donné par la formule (2) suivante :

$$CGES_{th} = (CS_{GO} * FE_{GO}) + (CS_{FO} * FE_{FO}) + (CS_{lub} * FE_{lub}) \quad (2)$$

Avec :

$CGES_{th}$  : Contenu en gaz à effet de serre d'un kWh d'électricité de source thermique, produit par le RIA (en g éq.C/kWh) ;

$CS_{GO}$  : Consommation Spécifique en gasoil (en g/kWh d'électricité d'origine thermique du RIA) ;

$FE_{GO}$  : Facteur d'émission en gaz à effet de serre du gasoil = 3,15kg éq CO<sub>2</sub>/kg [5]

$CS_{FO}$  : Consommation Spécifique en fuel-oil (en g/kWh d'électricité d'origine thermique du RIA) ;

$FE_{FO}$  : Facteur d'émission en gaz à effet de serre du fuel-oil = 3,12kg éq CO<sub>2</sub>/kg [5]

$CS_{lub}$  : Consommation Spécifique en lubrifiant (en g/kWh d'électricité d'origine thermique du RIA) et

$FE_{lub}$  : Facteur d'émission en gaz à effet de serre du lubrifiant = 2,93kg éq CO<sub>2</sub>/kg [5].

Les valeurs des facteurs d'émissions ne tiennent compte que de la phase de combustion de l'hydrocarbure, et ne prennent pas en compte les émissions "amont", c'est-à-dire les émissions de la filière qui a permis leur production à partir des sources primaires. Les émissions non prises en compte dans les valeurs ci-dessus sont associées à l'extraction, au transport, et au raffinage éventuel de ces combustibles.

2.2.2. Calcul du contenu en gaz à effet de serre d'un kWh d'électricité d'origine hydraulique et solaire photovoltaïque

Les valeurs des contenus en gaz à effet de serre sont déduites des études effectuées par Pehnt en 2006 [8] : 0,013kg éq CO<sub>2</sub>/kWh pour l'électricité d'origine solaire photovoltaïque et : 0,010kg éq CO<sub>2</sub>/kWh pour l'hydroélectricité.

### 2.3. Résultats

Les émissions en gaz à effet de serre en 2017 et 2018 s'élèvent respectivement à  $697,93 \cdot 10^3$  t éq CO<sub>2</sub> et  $527,31 \cdot 10^3$  t éq CO<sub>2</sub>.

En 2017 et en 2018, les émissions en gaz à effet de serre du mix-électrique du RIA sont issues principalement de l'émission de l'électricité d'origine thermique (98,98% en 2017 et 98,28% en 2018) (Figure 2).

En terme de contenu en gaz à effet de serre, une valeur de 0,59 kg éq CO<sub>2</sub>/kWh est obtenue pour l'année 2017 tandis que 0,42 kg éq CO<sub>2</sub>/kWh pour l'année 2018 (Figure 3).

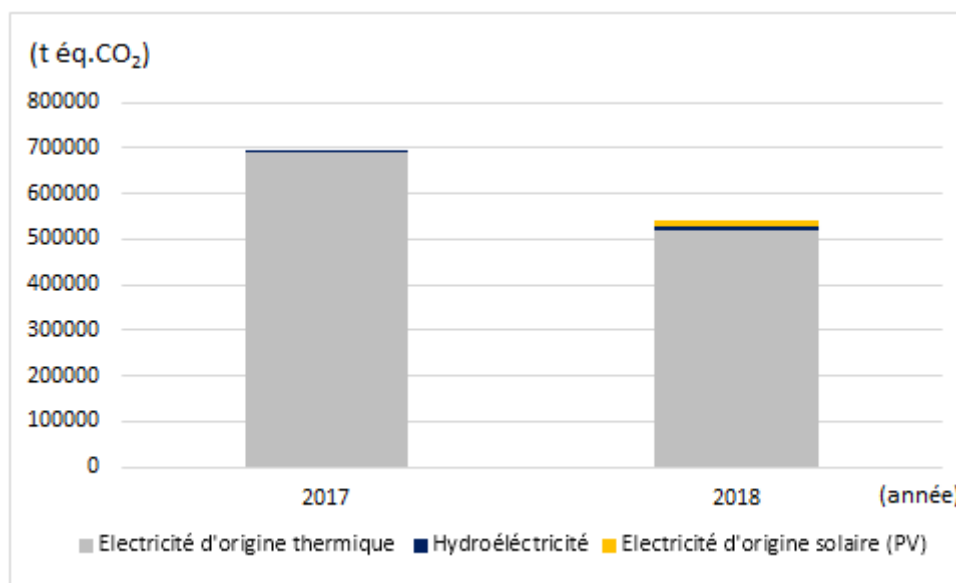


Figure 2 : Emission en gaz à effet de serre du mix-électrique du RIA en 2017 et 2018

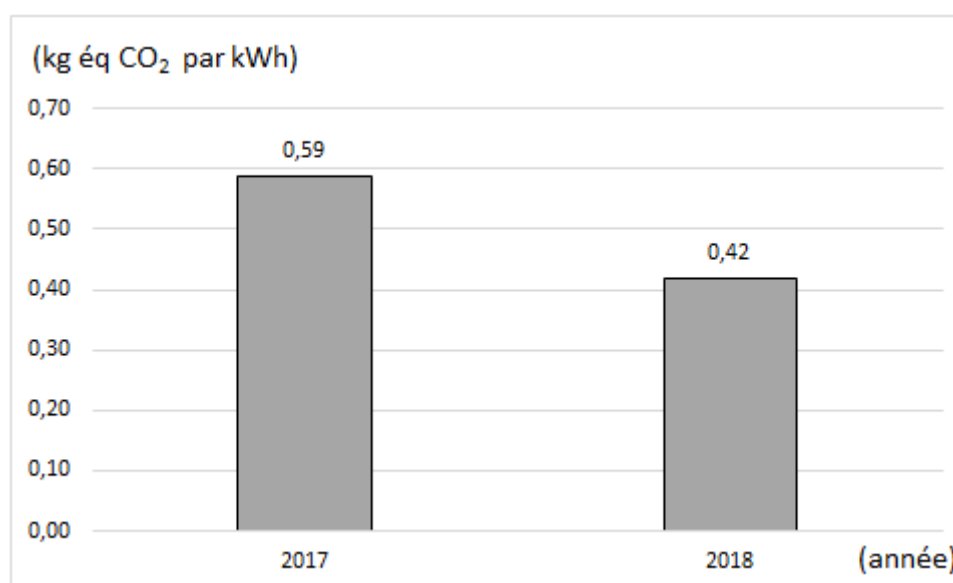


Figure 3 : Contenu en gaz à effet de serre de 1kWh de mix-électrique du RIA en 2017 et 2018

## 2.4. Discussions

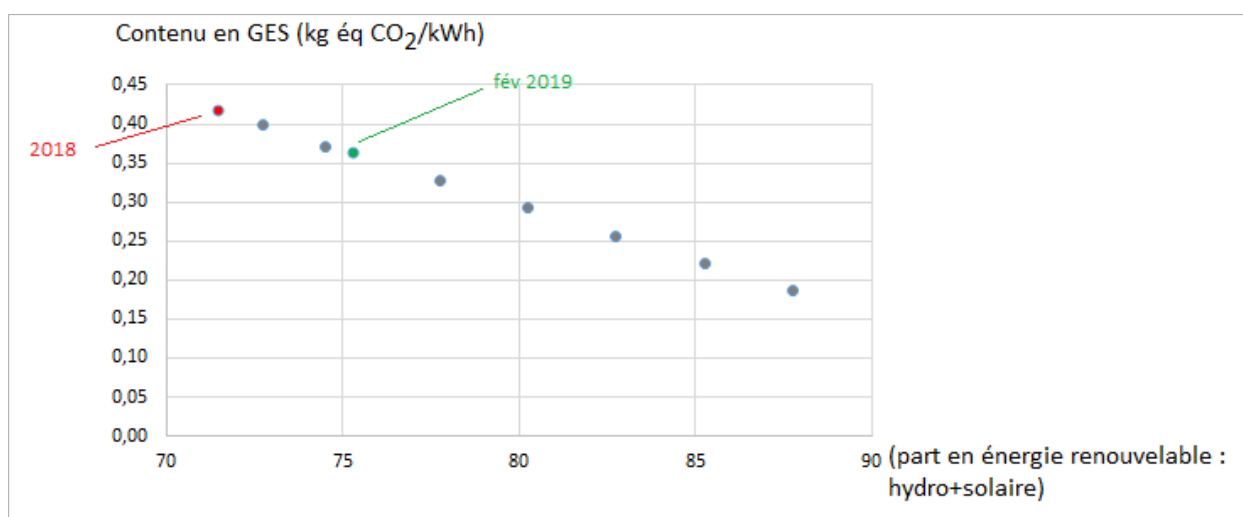
Une diminution de la valeur du Contenu en gaz à effet de serre de 1kWh de mix-électrique produit par le RIA en 2018, comparée à celle de 2017 est constatée. Cette évolution est due à une injection de production d'électricité d'origine solaire ainsi que l'augmentation de la production d'hydroélectricité et aussi en substituant le gas-oil par du fuel lourd pour la production d'électricité d'origine thermique. Il est à rappeler que la combustion de gas-oil est plus émissive en gaz à effet de serre que celle du fuel-oil. L'émission est de 3,15kg éq CO<sub>2</sub>/kg de gas-oil tandis qu'elle s'élève à 3,12kg éq CO<sub>2</sub>/kg de fuel-oil.

En 2018, une politique énergétique a été adoptée en 2018, utilisant une autre source renouvelable pour la production d'électricité : source solaire (PV). Ce fait a permis de diminuer le facteur d'émission de 28,73%.

Par comparaison avec d'autres pays, le contenu de GES du mix-électrique du RIA est 5 fois plus que celui de la France avec une valeur de 0,083kg éq CO<sub>2</sub>/kWh [4] utilisant comme énergies primaires : gaz, fioul, charbon, l'hydraulique, l'éolienne et le nucléaire [5]. Madagascar pourra diminuer le contenu en gaz à effet de serre de son électricité en utilisant davantage d'autres sources renouvelables dont nous disposons : la biomasse (la balle de riz), l'éolienne, le solaire thermique et/ou à concentration, ...

Une projection du contenu en GES par kWh du mix-électrique du RIA en fonction de la part en énergie renouvelable (hydroélectricité et solaire) est illustrée par la Figure 4.

Une augmentation de 17,34% de la part d'énergie renouvelable permettra une diminution de 50% de l'émission de GES par kWh.



**Figure 4** : Projection du contenu en GES par kWh du mix-électrique du RIA en fonction de la part en énergie renouvelable.



### 3. CONCLUSION

Le Réseau Interconnecté d'Antananarivo (RIA), un des trois réseaux interconnectés opérés par la JIRAMA, produit de la mix-électricité utilisant des thermique, hydraulique et solaire.

De 2017 à 2018, une diminution du contenu en gaz à effet de serre par 1kWh de mix-électricité produite par ce réseau est constatée, 0,59kg éq CO<sub>2</sub>/kWh en 2017 et 0,42kg éq CO<sub>2</sub>/kWh en 2018. Ces émissions sont dues principalement à la combustion des énergies primaires (gas-oil et fuel oil) nécessaires pour la production d'électricité.

Cette étude nous permet de prendre des mesures dans l'avenir et de mettre en place une planification énergétique adéquate en termes d'émission de gaz à effet de serre. Celle-ci est également un outil de décision donnant réflexion sur la dépendance croissante aux produits pétroliers grevant fortement le coût de l'électricité à Madagascar.

Le choix sur les énergies primaires pour produire de l'électricité est déterminant pour la viabilité du système énergétique de demain et la continuité du progrès socio-économique de notre pays. Et pourquoi pas envisager d'offrir de l'électricité « verte », dont le contenu est censé être intégralement à base d'énergies renouvelables ?

### Références

- [1] Institut National de la Statistique (INSTAT), Enquête périodique auprès des ménages. Rapport principal, 2010
- [2] Ministère de l'Energie et des Hydrocarbures, Bilan énergétique National 2017, 2017
- [3] R. Rabearivelo, Réforme du secteur électrique à Madagascar, Multi-year meeting on services, development and trade : the regulatory and institutional dimension, Geneva, 2010
- [4] Agence Internationale de l'Energie, CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion, 2008
- [5] ADEME, Guide des facteurs d'émissions. Version 6.1. Calcul des facteurs d'émissions et sources bibliographiques utilisées. Chapitre 2 – Facteurs associés à la consommation directe d'énergie, 2010
- [6] A. H. Jafar, A. Q. Al-Amin, C. Siwar, Environmental impact of alternative fuel mix in electricity generation in Malaysia, Renewable Energy 33, pp.2229–2235, 2008
- [7] P. J. Luickx, L. F. Peeters, L. M. Hellsen, W. D. D'haeseleer, Influence of massive heat-pump introduction on the electricity-generation mix and GHG effect-Belgium case study, International Journal of Energy Research, 32:57–67, 2008

[8] M. Pehnt, Dynamic Life Cycle Assesment of renewable energy technologies, Renewable Energy, vol 31, issue 1, pp.55-71, 2006