HAL
open science

# Évaluation des émissions de gaz à effet de serre du mix électrique de territoires insulaires

Vanessa Rakotoson, Laetitia Adelard, Jean-Philippe Praene

## To cite this version:

Vanessa Rakotoson, Laetitia Adelard, Jean-Philippe Praene. Évaluation des émissions de gaz à effet de serre du mix électrique de territoires insulaires. Conférence IBPSA France - Marne-la-Vallée , May 2016, Paris, France. hal-01486543

**HAL Id: hal-01486543**

**https://hal.univ-reunion.fr/hal-01486543v1**

Submitted on 10 Mar 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Évaluation des émissions de gaz à effet de serre du mix électrique de territoires insulaires

**Vanessa Rakotoson*[1], Laetitia Adélard[1], Jean-Philippe Praene[1]**

[1] **Laboratoire de Physique et Ingénierie Mathématique pour l'Energie, l'environnemeNt et le bâtimenT (PIMENT)**
**Université de La Réunion, 117 rue du Général Ailleret, 97430 Le Tampon, France**
***vanessa.rakotoson@univ-reunion.fr**

*RESUME. Réussir la transition énergétique est un challenge qui revêt une résonance particulière pour les zones non inter-connectées (ZNI), du fait de la forte dépendance aux combustibles fossiles dans leur mix électrique et le transport. Cette étude se focalise sur les impacts générés par la production d'électricité de départements insulaires français. L'évaluation des émissions de gaz à effet de serre (GES) a montré que la phase de production est prépondérante. Une classification a également été effectuée à partir des données socio-économiques et énergétiques afin de mettre en exergue les caractéristiques communes entre les différents territoires étudiés.*

*MOTS-CLÉFS. production électrique, ZNI, émissions de gaz à effet de serre*

*ABSTRACT. Due to the high reliance on fossil fuels in the electricity production and transport sector, to achieve the energy transition holds a particular relevance for the non-interconnected territories. This paper aims to determine the environmental influences through electricity generation of the french overseas departments. The results from the greenhouse gases emission assessment indicated that the operation phase contribution is significant. A classification based on socio-economic and environmental data was also carried out in order to point out the common characteristics among the territories.*

*KEYWORDS. electricity generation, non-interconnected territories, greenhouse gases emissions*

## 1 Introduction

En France, la composition du bouquet énergétique présente une grande disparité : pour illustrer en 2013, le mix électrique de la métropole est dominé par 74% de production d'énergie nucléaire et d'hydraulique, tandis que les départements d'outre-mer (DOM) français ont une moyenne de contribution de 73% de combustion de charbon et de pétrole (Ministère de L'Ecologie du Développement durable et de l'Energie - France (2015), Notton (2015), Praene et al. (2012)). Cette forte proportion d'énergie fossiles dans le mix électrique est expliquée par les inconvénients généraux auxquels les territoires insulaires sont confrontés, notamment l'éloignement (Briguglio (1995)). Les objectifs de la politique énergétique française se focalisent sur la transition énergétique pour la croissance verte. Cette politique vise à parvenir à une réduction de 40% des émissions de GES par rapport à 1990 et une intégration de 40% d'énergies renouvelables (EnR)

dans la production d'électricité d'ici 2030 (Ministère de L'Ecologie du Développement durable et de l'Energie (2015)). Par rapport à ces objectifs nationaux, cette étude propose d'analyser le contexte particulier de l'insularité sur les émissions de GES de la production électrique : La Réunion, Guadeloupe, Martinique et Mayotte. A titre de comparaison, d'autres départements français seront également étudiés : La Guyane n'est pas une ZNI, mais c'est un petit territoire français isolé qui ne bénéficie pas d'interconnexion au réseau. La Corse est également étudiée, dont la particularité réside sur l'interconnexion avec le continent.

La première partie de cet article présentera la composition des mix électriques de chaque département sur la base de l'année 2013. Ensuite seront estimés les impacts potentiels sur l'environnement dus à la production d'électricité dans les départements, par l'application de la méthode de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Les résultats obtenus dans cette section, combinés à d'autres variables économiques et géographiques, seront également exploités pour classifier ces îles.

## 2 Situation énergétique

Afin d'identifier les émissions de GES, les différentes technologies qui entrent dans la production électrique de chaque territoire seront exposées dans la présente section. Dans l'étude précédente de Notton (2015), la répartition de la puissance installée des îles françaises et l'évolution de la production annuelle moyenne sur la période de 2012 ont été mises en évidence. Dans cette étude, l'année de référence 2013 a été prise en compte afin de travailler sur les données disponibles les plus récentes. La figure 1 représente la situation des îles par rapport à la France métropolitaine. Comme l'éloignement et l'isolement sont les principales caractéristiques des DOM, sauf pour la Guyane et la Corse, l'approvisionnement en combustibles se fait généralement sur de longues distances.

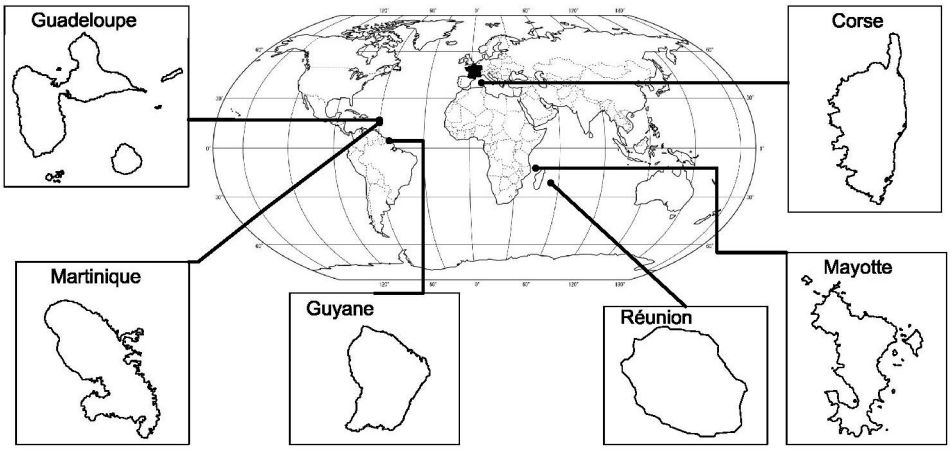


Figure 1. Situation géographique des départements étudiés par rapport à La France métropolitaine

Parmi les départements étudiés, seule la Corse bénéficie de l'interconnexion au réseau continental de l'Italie et de la Sardaigne, qui contribue à 29,7% de la production électrique, les EnR et le thermique conventionnel contribuent respectivement à hauteur de 33,2% et 37,1% (EDF-SEI (2014b)). Martinique et Mayotte présentent les mêmes proportions entre énergies fossiles et renouvelables dans leur mix électrique, respectivement environ 95% et 5% (EDF-SEI (2014c), IEDOM (2015)). La différence entre elles deux réside uniquement sur la contribution de la production éolienne et du biogaz dans le cas de la Martinique, même si les proportions sont faibles. Avec leur fort potentiel en EnR, Guadeloupe et La Réunion diversifient leur mix, en intégrant la bagasse,le biogaz, l'hydraulique et le photovoltaïque ou encore la géothermie (Observatoire Régional de l'énergie et du climat (2014) SPL Energies Réunion (2015), Praene et al. (2012)).

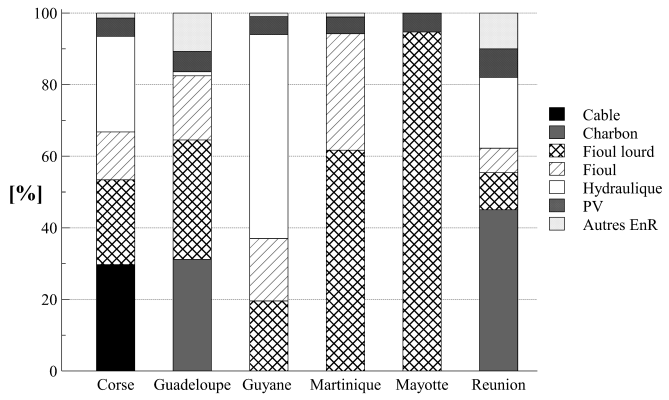


FIGURE 2. Mix électriques des départements d'outre-mers

Malgré cela, la part d'EnR de la Guadeloupe égale près de la moitié de celle de La Réunion (17,5% et 37,8%). La Guyane reste le seul territoire qui exploite le plus d'EnR avec, notamment l'hydroélectricité qui occupe 57% de la production d'électricité totale (EDF-SEI (2014a)). La figure 2 résume la composition des mix électriques des territoires étudiés, en notant que les autres EnR regroupent la production à base de biomasse, éolien, géothermie.
Ces données seront exploitées dans la suite pour l'estimation des émissions de gaz à effet de serre issues de la production électrique.

## 3 Outils et méthodes

Un nombre considérable d'études d'ACV sur la production électrique est disponible dans la littérature, allant de l'état de l'art des différents technologies de production (Asdrubali et al. (2015), Turconi et al. (2013)) aux études sur des systèmes de production de pays ou de territoire insulaire, par exemple le cas du Nigéria (Gujba et al. (2010)) ou de l'île Maurice (Brizmohun et al. (2014)). Le bilan énergétique de la Réunion de l'année 2014 propose une comparaison des ZNI français en évoquant notamment les émissions de $CO_2$ des 2 principaux secteurs de consommation, à savoir l'électricité et le transport (SPL Energies Réunion (2015)). Mais les méthodes d'évaluation ne sont pas explicitement démontrées, de même pour les hypothèses prises. L'intérêt de cette étude sera donc d'apporter une évaluation de la production électrique des départements étudiés, afin de mieux visualiser les émissions issues de chaque phase de la production d'électricité.

La méthodologie de l'ACV appliquée dans cette étude est basée sur les normes ISO 14040 et 14044 (International Standards Organisation (2006a,b)). Les limites de l'étude que nous avons considérées, sont du berceau à la porte de la centrale : l'acquisition des matières premières, le transport inter-pays, la production d'électricité, la construction des infrastructures. La figure 3 représente les frontières de l'étude considérée pour chaque système de production inclus dans les mix électriques.

Relatif au cadre défini précédemment, l'unité fonctionnelle (UF) choisie est la production de 1 $kWh_e$ [1] à la porte de la centrale. L'inventaire des rejets émis par la production d'électricité sera mise en relation à chaque étape du système de produit.

Le contexte insulaire induit naturellement une importation des combustibles fossiles pour la production thermique conventionnelle. Dans la suite, l'évaluation des émissions dues au transport se réfèrera uniquement à l'importation des produits directement utilisables, à savoir les produits pétroliers sortant de la raffinerie. Nous ne considèrerons pas l'acheminement des produits bruts vers le lieu de raffinement. Les distances de transport interne dans chaque département n'ont

1. Dans la suite, 1 $kWh_e$ représente 1 kWh électrique produit

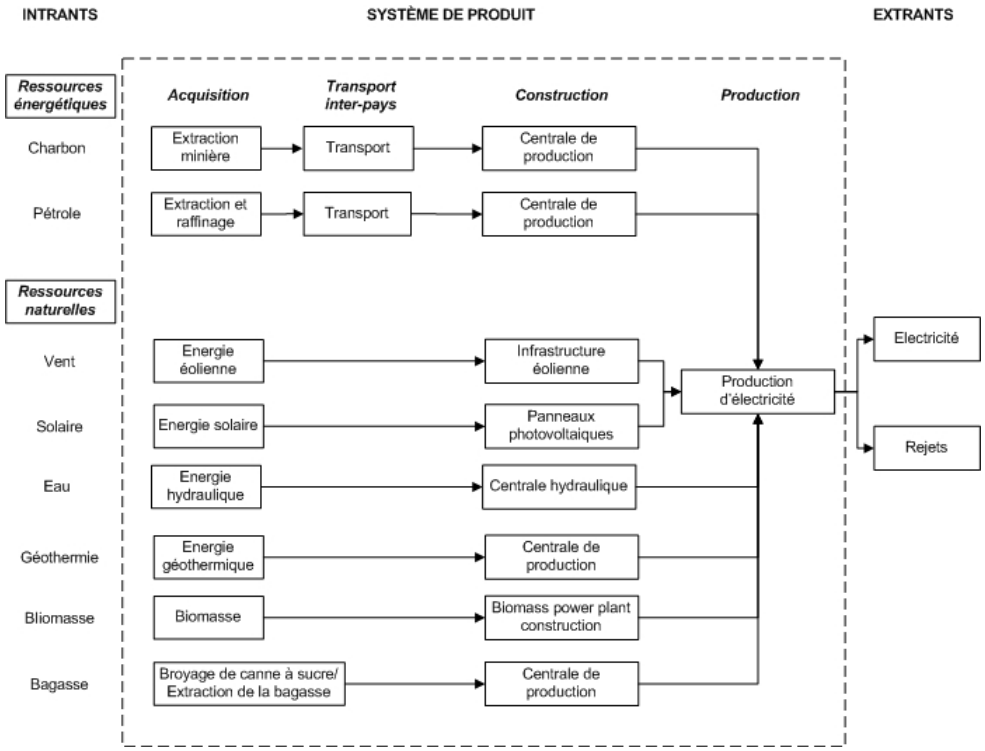


FIGURE 3. Description de la frontière de l'étude pour la production d'électricité (modifié de Gujba et al. (2010) et Brizmohun et al. (2014))

pu être renseignées dans les données disponibles, c'est pourquoi seul le transport inter-pays est considéré.

Les données exploitées pour l'évaluation des émissions de GES pour chaque département concernent donc l'énergie produite par chaque centrale à l'intérieur du territoire, avec leur puissance et leur configuration ainsi que la distance d'approvisionnement. Pour l'évaluation de chaque catégorie d'émissions, nous nous sommes référés à la base de données du logiciel GEMIS dans sa version 4.9 (Öko-Institut (2008)) en adaptant les valeurs initiales aux caractéristiques des installations de production rencontrées pour chaque département étudié. Pour mieux représenter les émissions à chaque étape du cycle de vie de la production électrique de tout territoire, nous avons traité cette base de données avec un outil que nous avons développé sous Excel puis sous MATLAB. L'intérêt de ce traitement est d'identifier l'étape du système de production la plus émissive, pour tout territoire à étudier.

Dans le cadre de cette étude, les émissions calculées sont relatives à des dispositifs génériques, n'ayant pas de pays d'origine spécifique pour une comparaison équitable entre les départements.

# 4 Résultats et discussions

## 4.1 Indicateurs environnementaux évalués

Une étude d'ACV met généralement en exergue plusieurs indicateurs, regroupés principalement en quatre catégories d'impacts relatifs à la santé, à la qualité de l'écosystème, au changement climatique et à l'épuisement des ressources. Dans cette étude, nous avons choisi de présenter restrictivement trois indicateurs : le potentiel de réchauffement global (PRG), le potentiel d'acidification, ainsi que la dépense d'énergie cumulée (DEC) pour la production de 1 $kWh_e$ mis sur le réseau avant la distribution. Ils intègrent respectivement le changement climatique, la qualité de l'écosystème et l'épuisement des ressources.

D'après la figure 4, nous pouvons constater que les trois indicateurs présentent une même

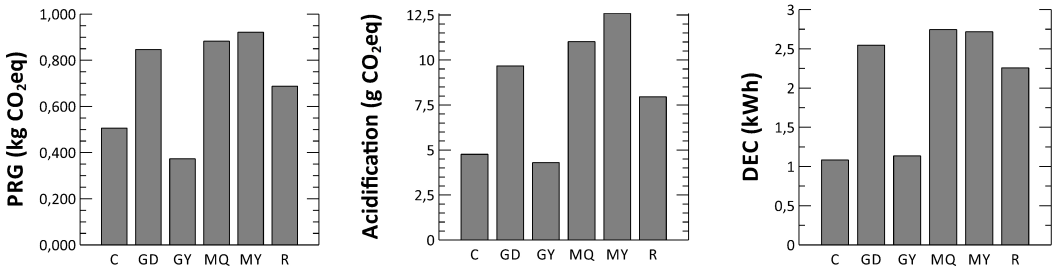


FIGURE 4. Impacts environnementaux générés pour la production de 1 kWh$_e$ [C : Corse, GD : Guadeloupe, GY : Guyane, MQ : Martinique, MY : Mayotte, R : Réunion]

allure générale : Mayotte enregistre les plus fort taux de PRG et d'acidification, et nécessite le plus d'énergie, après la Martinique, pour produire 1 kWh$_e$. Cependant, la Guyane génère les plus faibles taux parmi les départements étudiés. D'après nos résultats, Mayotte génère la plus haute quantité de PRG avec 0,921 kg $CO_2$éq/kWh$_e$, suivi par la Martinique (0,883 kg $CO_2$éq/kWh$_e$) et la Guadeloupe (0,846 kg $CO_2$éq/kWh$_e$), s'expliquant par la forte proportion d'énergies fossiles dans leur mix électrique, comme illustré dans la figure 5-b. La Réunion enregistre une valeur médiane parmi ces territoires avec 0,687 kg $CO_2$éq/kWh$_e$. La Guyane et La Corse présentent les plus faibles émissions grâce à la contribution massive d'EnR, notamment l'hydraulique pour la Guyane, et dans le cadre de cette étude, l'interconnexion de la Corse explique également son faible taux d'émissions de GES. Elles génèrent, respectivement, 0,373 kg $CO_2$éq/kWh$_e$ et 0,505 kg $CO_2$éq/kWh$_e$. Les résultats que nous avons obtenus sont légèrement inférieures aux données que propose la comparaison des ZNI dans le bilan énergétique de La Réunion, mis à part le cas de Mayotte. Le ratio estimé par cette étude étant exprimé en équivalent $CO_2$, elle prend en compte également les autres types d'émissions telles que le $CH_4$ ou le $N_2O$. La différence entre les deux résultats peut également s'expliquer par la frontière de l'étude dont nous avons tenu compte, c'est-à-dire du berceau à la porte de la centrale.

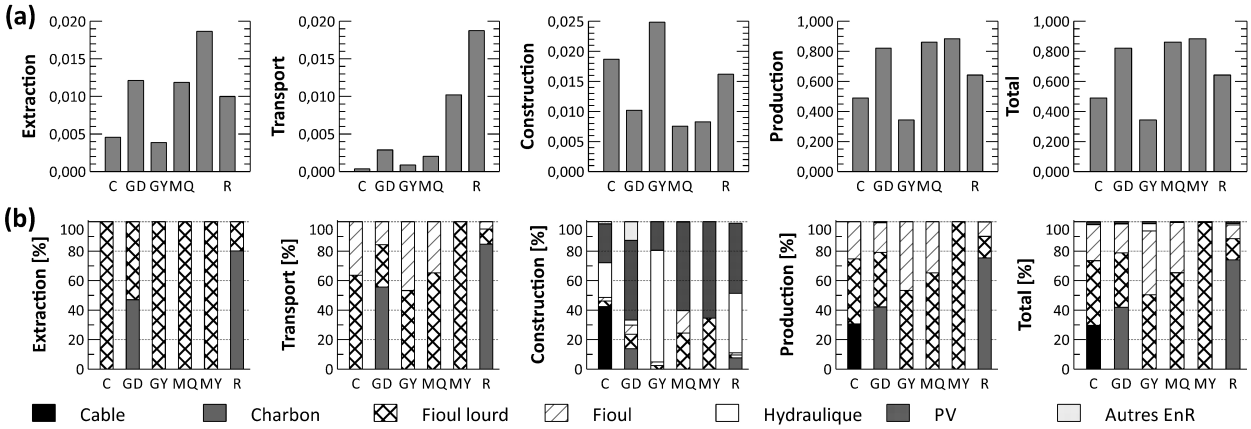


FIGURE 5. (a) Quantité de PRG généré par chaque étape du cycle de vie pour produire 1 kWh$_e$ ; (b) Contribution des centrales électriques par phase.

D'après la figure 5-a, on peut constater que les émissions sont imputées essentiellement à la phase de production. En observant les autres étapes du système étudié, les phases d'extraction et de transport représentent principalement les émissions générées par les productions à base d'énergies fossiles. Mayotte enregistre la plus grande valeur pour l'extraction, en rapport au fort taux de produits pétroliers dans son mix électrique. On constate également que la phase de transport des combustibles de La Réunion est la plus conséquente, ce qui s'explique par son approvisionnement

au charbon, suivi de Mayotte. On peut en déduire que ces deux îles sont plus isolées, par rapport aux autres départements, compte tenu des émissions dues à l'approvisionnement en besoins de combustibles fossiles. D'autre part, si pour toutes les autres étapes la Guyane enregistre le plus faible taux d'émissions par UF, nous constatons qu'elle présente le plus fort taux pour la phase de construction. Sachant que 57% de son mix électrique est assurée par la production hydraulique, nous pouvons en déduire que la mise en place de parcs hydroélectriques est plus conséquente et fortement émettrice par rapport aux autres centrales de production (figure 5-b). La production des modules photovoltaïques génèrent plus de GES que celles des productions thermiques, d'après les résultats de Mayotte. Ces résultats permettent déjà d'effectuer un premier classement des îles en fonction des émissions qu'elles génèrent pour le secteur électrique. Par ailleurs, ces résultats seront utilisés dans la section suivante, dont l'objet est de regrouper les îles en fonction de leur caractéristiques communes.

## 4.2 Analyse en composantes principales

Afin de mieux appréhender la question de l'insularité, une analyse des données statistiques énergétique et socio-économique a été faite. Cette classification a pour but de déterminer s'il existe des caractéristiques communes aux départements étudiés. Le regroupement des îles permettra de proposer un même scénario d'évolution du mix électrique pour chaque classe, dans l'objectif d'atteindre les objectifs environnementaux du territoire. Pour cela, nous avons eu recours à l'analyse en composantes principales (ACP) avec les variables suivantes, résumées dans le tableau 1, suivie d'une classification ascendante hiérarchique pour identifier des classes d'îles.

| **Pays** | **Densité** (hab/km$^2$) | **Distance** * (km) | **Production** (GWh) | **PIB** ( €/habitant) | **PRG** (kg $CO_2$éq/kWh$_e$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Corse | 37 | 160 | 2235 | 25523 | 0,505 |
| Guadeloupe | 241 | 6700 | 1729 | 20072 | 0,846 |
| Guyane | 3 | 7000 | 858 | 15820 | 0,373 |
| Martinique | 338 | 6858 | 1577 | 22266 | 0,883 |
| Mayotte | 565 | 8000 | 262 | 7896 | 0,921 |
| Réunion | 335 | 9400 | 2813,4 | 19340 | 0,687 |

* Distance du département par rapport à La Métropole

Table 1: Données utilisées pour l'ACP

Les résultats de la classification, obtenus à partir du package FactoMineR du logiciel R dédié à l'analyse des données (Lê et al. (2008)), sont résumés sur la figure 6 : l'évaluation de la qualité de la projection est représentée sur la figure 6-a, qui montre que les dimensions 1 et 2 expliquent 83,50% de la variance, cette projection est représentative de toutes les variables. La qualité de la projection des variables est également mesurée par un paramètre représentant le cos$^2$. Les variables sont bien représentées car elles ont un cos$^2$ $>$ 0,600 sur la dimension 1, exceptée la production d'électricité qui a une meilleure projection sur la dimension 2 par rapport à la première, respectivement 0,490 et 0,371 (figure 6-b). Cependant, la projection de toutes variables sur les deux dimensions totalise un cos$^2$ $>$ 0,878, exceptée la distance par rapport à la métropole qui a une valeur finale de 0,572 en cos$^2$. La contribution de chaque variable ou individu est un autre indicateur de la qualité de la projection. D'après les résultats, la production contribue à 40% dans la construction de l'axe 2, par contre, pour la dimension 1, les autres variables contribuent à la même hauteur pour la construction de l'axe, 21% en moyenne. Pour l'analyse des individus, Corse et Mayotte contribuent fortement à la construction de l'axe 1, respectivement 44,59% et 51,71%. Sur le graphe des individus (figure 6-c), nous avons pu classer les îles en quatre groupes. Le premier groupe correspond aux îles à forte production d'électricité et dont le PRG est assez élevé. Bien que Mayotte ait le plus fort taux de PRG, elle représente un cas particulier, dû à

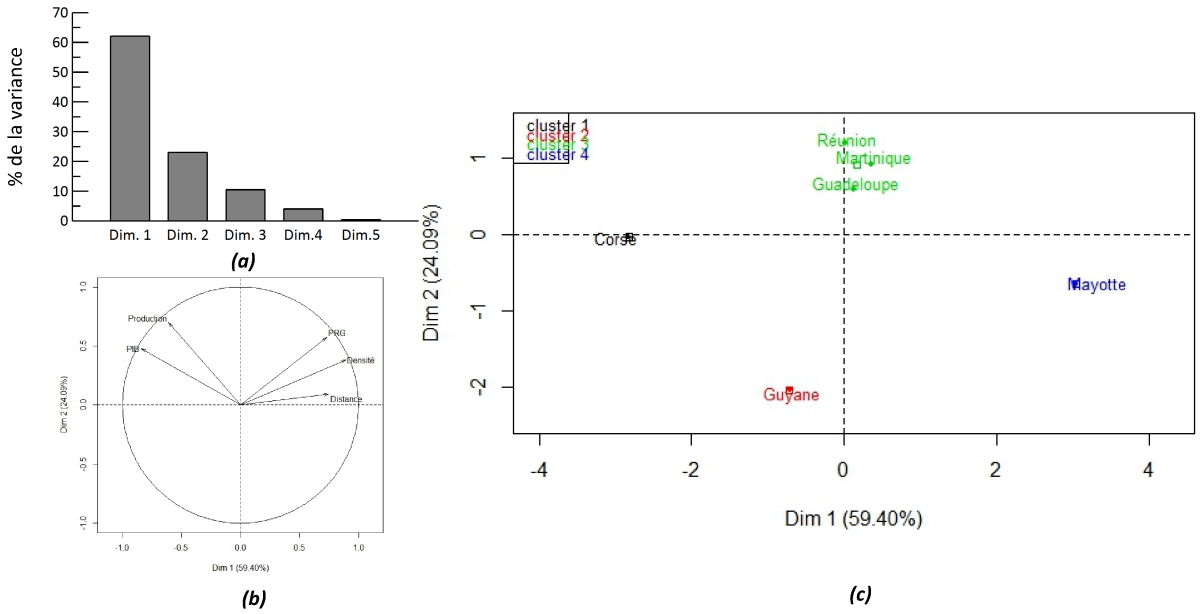


FIGURE 6. Résultats de l'ACP ; (a) Gain d'inertie, (b) Graphe des variables (c)Représentation factorielle des individus

son faible taux de PIB par habitant par rapport aux autres. La Corse et la Guyane forment également deux classes différentes : la Corse se distingue par un fort taux de PIB et un moyen taux d'émissions de GES, la Guyane se caractérise par un faible taux de PRG et un PIB faible.

## 5 Conclusion

Ce travail a permis à travers l'utilisation de l'ACV de développer un outil d'évaluation des émissions de GES pour la production d'électricité et des ZNI. La méthode a permis de cibler l'étape la plus émissive dans le cycle de production d'électricité. Cette étude a montré qu'environ 95% du total des émissions de la production de 1 $kWh_e$ à partir des mix électriques des départements étudiés sont dus à la phase de production. L'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le secteur électrique doit être considérée dans l'objectif de réduire les impacts environnementaux. Bien que l'augmentation de la proportion en EnR est préconisée pour réduire la quantité de GES de la production électrique, la phase de construction de chaque type d'EnR à intégrer est également à considérer, d'après les résultats que nous avons obtenus. La classification effectuée dans cette étude, a permis de catégoriser les îles, notamment regrouper La Réunion, Guadeloupe et Martinique, en un groupe d'îles auquel on pourra appliquer un même scénario d'évolution de la consommation électrique ; tandis que les autres îles seront traitées individuellement. Dans la suite de nos travaux, l'outil de calcul des différents impacts basés sur la méthode d'ACV que nous avons utilisé dans cette étude, sera adjoint à un modèle de prévision de la consommation électrique. Des propositions de scénarii de production seront également couplées à l'outil, selon les potentialités des EnR du territoire étudié. Les objectifs de réduction des émissions de GES seront prises comme contrainte dans l'optimisation des scénarii de production.

## Références

Asdrubali, F., Baldinelli, G., D'Alessandro, F. and Scrucca, F. (2015). Life cycle assessment of electricity production from renewable energies : Review and results harmonization, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **42** : 1113–1122.
**URL:** *http ://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114009071*

Briguglio, L. (1995). Small island developing states and their economic vulnerabilities, *World Development* **23**(9) : 1615–1632.

Brizmohun, R., Ramjeawon, T. and Azapagic, A. (2014). Life cycle assessment of electricity generation in Mauritius, *Journal of Cleaner Production* .
**URL:** *http ://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095965261401213X*

EDF-SEI (2014a). Bilan prévisionnel de l'équilibre Offre-Demande d'électricité - Guyane, *Technical report.*

EDF-SEI (2014b). Bilan Prévisionnel de l'Equilibre Offre/Demande d'électricité - Corse, *Technical report.*

EDF-SEI (2014c). Bilan prévisionnel de l'équilibre Offre/Demande d'électricité - Martinique, *Technical report.*

Gujba, H., Mulugetta, Y. and Azapagic, a. (2010). Environmental and economic appraisal of power generation capacity expansion plan in Nigeria, *Energy Policy* **38**(10) : 5636–5652.
**URL:** *http ://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.011*

IEDOM (2015). Rapport annuel 2014 - Mayotte, *Technical report.*

International Standards Organisation (2006a). ISO 14040 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.

International Standards Organisation (2006b). ISO 14044 : Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines.

Lê, S., Josse, J. and Husson, F. (2008). FactoMineR : An R package for multivariate analysis, *J Stat Softw* **25**(1) : 1–18.

Ministère de L'Ecologie du Développement durable et de l'Energie (2015). La Transition énergétique pour la croissance verte, *Technical report.*

Ministère de L'Ecologie du Développement durable et de l'Energie - France (2015). Chiffres clés de l'énergie - Edition 2014, *Technical report.*

Notton, G. (2015). Importance of islands in renewable energy production and storage : The situation of the French islands, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **47** : 260–269.
**URL:** *http ://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115002063*

Observatoire Régional de l'énergie et du climat (2014). Les chiffres clé de l'énergie en Guadeloupe - Bilan 2013, *Technical report.*

Öko-Institut (2008). *Globale Emissions Model of Integratede Systems (GEMIS), version 4.9.*

Praene, J. P., David, M., Sinama, F., Morau, D. and Marc, O. (2012). Renewable energy : Progressing towards a net zero energy island, the case of Reunion Island, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **16**(1) : 426–442.
**URL:** *http ://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.007*

SPL Energies Réunion (2015). Bilan énergétique - île de La Réunion 2014.

Turconi, R., Boldrin, A. and Astrup, T. (2013). Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies : Overview, comparability and limitations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **28** : 555–565.
**URL:** *http ://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032113005534*