



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 17 : Impact environnemental du transport attribué au mix électrique insulaire : cas de Madagascar**

**N. Randrianandrasana<sup>1</sup>, M. P. Randrianarison<sup>1</sup>, B. Raheliarilalao<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Ecole Doctorale Ingénierie et Géoscience, Université d'Antananarivo

Correspondant : randria.ntso3f@gmail.com

### **Résumé**

Le mix électrique malagasy exploite de plus en plus les sources thermiques fonctionnant essentiellement avec des fiouls importés. Depuis le golfe persique, leur acheminement vers les centrales thermiques des 22 Régions de l'île n'est pas une tâche facile. Ce cas de mobilité insulaire rayonnant la carte de la grande île fait appel aux services de transport, secteur à travers lequel ressortent des diverses problématiques environnementales à l'échelle mondiale. D'où, cette étude quantifie les indicateurs d'impacts en réchauffement global, en acidification terrestre et en consommation énergétique non renouvelable, générés par le ravitaillement en fiouls du mix électrique national malagasy. La méthodologie d'Analyse de Cycle de Vie guide les démarches à suivre. Dans ce sens, la modélisation fait appel au gratuit GEMIS, et MATLAB évalue les indices de sensibilité des résultats. D'abord, on va repérer dans GEMIS les processus rattachés aux typologies de transport relatant la chaîne d'importation et de distribution des hydrocarbures. Parallèlement, une multitude de processus élémentaires, retraçant les contextes de transport des hydrocarbures malagasy à l'échelle des centrales isolées régionales, puis à l'échelle des réseaux interconnectés, y est créée. C'est par la suite qu'on y monte un scénario orientant ces processus élémentaires vers la circonstance de production de l'électricité nationale. A l'échelle des Régions, les Régions de Vatovavy Fitovinany et Atsimo Atsinanana présentent des pics d'impact. Aussi, des indices de sensibilité élevés y sont constatés sur les paramètres « tonnes. Kilomètres » et « coefficients

des distances routières ». Au niveau national, en plus des précédents paramètres, les « coefficients de production nationale » sont très influents pour le modèle. Et sur ce niveau, GEMIS avance des valeurs comme  $33,25g\acute{e}qCO_2$  en potentiel de réchauffement global,  $0,53g\acute{e}qSO_2$  en potentiel d'acidification terrestre, et  $0,44MJ$  en consommation énergétique non renouvelable, valeurs occasionnées par le transport des combustibles pour chaque  $1kWh$  d'électricité produite. Les résultats sus-cités n'en sont qu'une partie de la frontière « berceau au portail » du cycle de vie de l'électricité nationale.

**Mots-clés** : Analyse de Cycle de Vie, transport des hydrocarbures, mix électrique malagasy, GEMIS, transport non-stationnaire, centrale thermique

## 1. INTRODUCTION

Dans la grande île, le secteur du transport et celui de la production d'énergie constituent les principaux consommateurs d'hydrocarbures [1]. Particulièrement, près de 46% de la production d'électricité sont assurés par des centrales thermiques à fioul lourd et à gasoil [2], réparties dans des Producteurs Isolés régionaux (P.I) et des Réseaux Interconnectés [3] d'Analamanga, de Toamasina et de Fianarantsoa (R.I.A, R.I.T, R.I.F). En effet, sur les 115 centres d'exploitation électrique à Madagascar, 100 sont alimentés exclusivement par des groupes thermiques [2]. Aussi, Madagascar importe la totalité des produits pétroliers, dont 95% depuis le golfe persique, acheminée vers les dépôts principaux de Tamatave [4]. Aux coûts de l'importation et des logistiques élevés s'ajoutent les frais engendrés par l'utilisation du cabotage côtier et du transport routier [5]. Dans ce sens, Madagascar connaît un prix au kilowattheure (kWh) d'électricité relativement cher, compris entre 1100 et 1200Ariary [2].

Jusque-là, les études chiffrées se focalisent sur des aspects économiques et sur l'idée d'augmenter le taux d'accès à l'électrification qui est actuellement 15% de la population [2]. De ce fait, cette étude fait émerger la face cachée de la problématique environnementale survenant lors de l'importation et de la distribution des carburants vers les centrales thermiques électriques malagasy. Et, cela pour un mix à centrales thermiques fossiles, surplombe l'impact environnemental de la production électrique proprement dit [6]. Dans ce sens, selon l'IEA (International Energy Agency), le transport sur tous secteurs confondus, contribue jusqu'à 14% de l'émission mondiale du gaz à effet de serre [7].

Cet article traite la quantification des impacts de la phase de transport, qui est un élément clé du cycle de vie sur une frontière « berceau au portail », de l'électricité malagasy. La méthode à adopter est celle de l'analyse de cycle de vie, qui traduit

l'inventaire basé sur le choix de l'Unité Fonctionnelle, en valeur d'indicateurs d'impacts [8]–[13]. Cette étude s'appuie sur les typologies de transport, aussi bien le transport maritime en pleine mer et le long des côtes qu'au transport routier, relatifs aux hydrocarbures malagasy [4]. Les impacts considérés dans cette étude s'articulent tout autour du potentiel de réchauffement global et d'acidification terrestre ainsi que sur la consommation énergétique non-renouvelable.

## 2. CONTENU

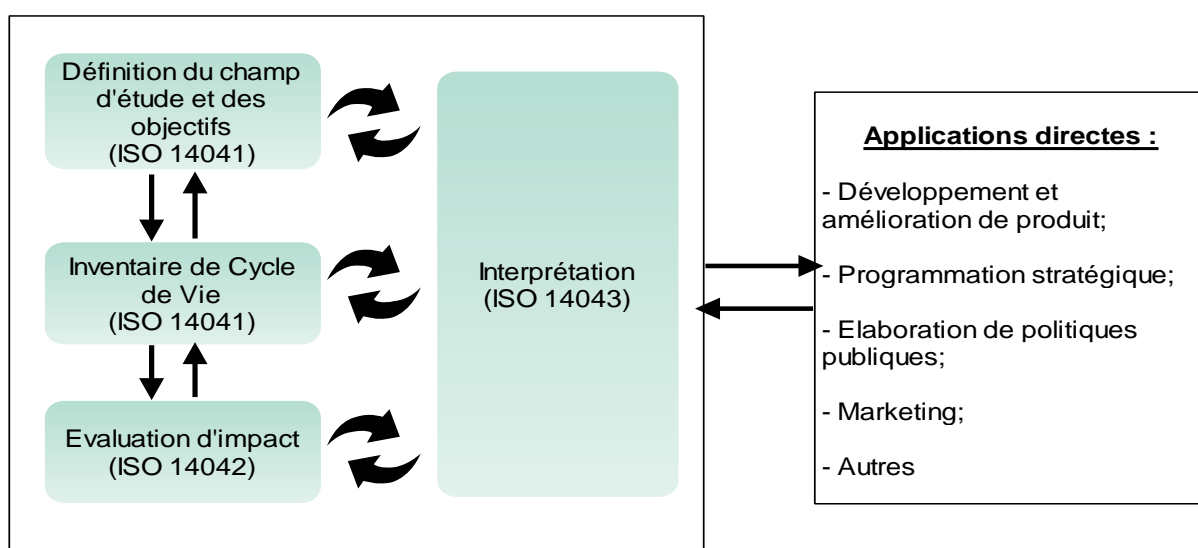
### 2.1. Matériels et méthodes

On applique la méthode d'analyse de cycle de vie, orientée vers un modèle input/output sous GEMIS. L'Analyse de Sensibilité, préconisée par les auteurs de [14], sera traitée sous MATLAB, selon la méthode EFAST [15].

#### 2.1.1. Analyse de Cycle de Vie

L'ACV est une méthode d'évaluation d'indicateurs d'impacts environnementaux d'un système de produits, selon l'objectif et le choix de frontière de l'étude [8].

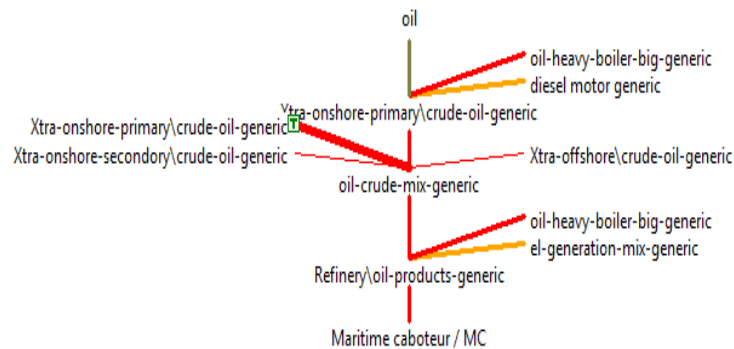
Le cadre méthodologique de l'ACV (*Figure 30*) s'appuie sur quatre phases : la définition des objectifs, l'inventaire de cycle de vie, l'évaluation d'impacts et l'interprétation [8]–[11], [13].



**Figure 30** : Cadre méthodologique d'ACV

#### 2.1.1. A propos de GEMIS [16]

GEMIS ou « Global Emission Integrated System » est un logiciel de modélisation d'Analyse de Cycle de Vie. Ce dernier retrace les processus de cycle de vie d'un produit ou d'un service et les traduit sous forme d'impacts environnementaux. Chaque processus peut être aussi groupé sous forme de scénarios. Dans le cadre de cette étude, on utilise les processus de transport « générique » du GEMIS.



**Figure 31** : Processus élémentaire maritime caboteur dans GEMIS

### 2.1.2. But

L'étude vise la quantification des indicateurs d'impacts environnementaux à savoir le potentiel de réchauffement global, le potentiel d'acidification terrestre, la consommation énergétique non-renouvelable, relatifs au transport non-stationnaire intervenant dans la chaîne de production du mix électrique national.

### 2.1.3. Unité fonctionnelle (UF)

Celle-ci se réfère au 1kWh d'électricité produite à l'échelle nationale sur le territoire malagasy.

### 2.1.4. Frontière et périmètre de l'étude

Elle concerne la phase de transport non-stationnaire des intrants combustibles et les processus du second plan qui y sont rattachés. Autrement dit, on tient compte, en amont des phases d'extraction et du raffinage du brut ainsi que les sous-services adjacents et en aval du transport proprement dit.

La frontière de l'étude (*Figure 32*) s'étale tout autour des processus du premier et du second plan, des transports non-stationnaires attribués à l'électricité malagasy, phase élémentaire de sa chaîne de production « du berceau au portail ». Cette frontière porte donc sur :

- L'importation des combustibles fossiles moyennant de transport maritime (tanker),
- Leur distribution soit par transport maritime (barge, caboteur) longeant sur la mer côtière de l'île, soit par transport routier (camion-citerne) au travers de son réseau routier,
- Les phases d'acquisition des intrants énergétiques (extraction, raffinage du pétrole brut, ...) servant à ces divers moyens de transports.

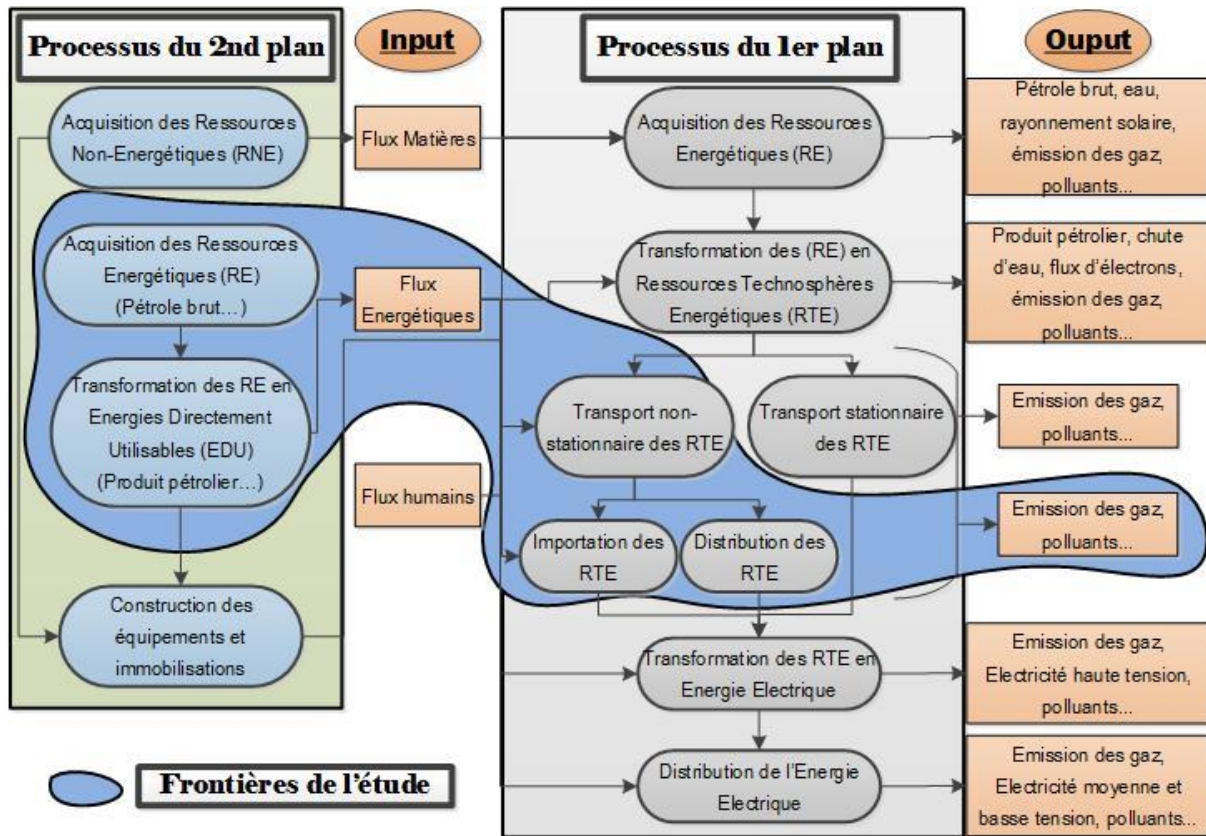


Figure 32 : Frontière de l'étude

#### 2.1.5. Méthode de calcul

L'inventaire du flux de référence (FR) est recadré par l'UF. Les transports non-stationnaires au sein du mix électrique national concernent l'importation et la distribution des combustibles fossiles Gasoil (G.O) et Fuel Oil (F.O) auprès des centrales thermiques.

En connaissant les flux entrants ( $FE$ ), on peut évaluer les impacts ( $I$ ) à partir des facteurs d'impacts ( $FI$ ), selon le modèle input/output traduit par la relation :

$$(I) = (FE) \times (FI) \quad (i)$$

Les flux entrants ( $FE$ ) sont relatifs aux services de transport, exprimés en tonne.kilomètre ( $t.km$ ), qu'on va mettre en exergue, sur l'échelle des Producteurs Isolés (P.I) des régions, des Réseaux Interconnectés (R.I) et au niveau national. Le modèle examine les typologies de transport existantes, renseignées par l'Office Malagasy de l'Hydrocarbure (OMH) [4] à savoir, le transport maritime en pleine mère via des tankers (MT), le transport maritime longeant les côtes malagasy via des caboteurs (MC) et le transport routier terrestre (R).

Ainsi, les « tonnes.kilomètre » de la région  $i$   $(T.km)_{RE_i}$  pour une consommation spécifique CS en G.O ou F.O de la centrale thermique isolée de ladite région  $(T.km(G.O))_{RE_i}$  et  $(T.km(F.O))_{RE_i}$  distante de  $D_{RE_i}$  depuis le golfe persique seront :

$$(T.km(G.O))_{RE_i} = \beta(G.O)_{RE_i} \times D_{RE_i} \times CS(G.O)_i \text{ et } (T.km(F.O))_{RE_i} = \beta(F.O)_{RE_i} \times D_{RE_i} \times CS(F.O)_i \quad (ii)$$

$$(T.km)_{RE_i} = (T.km(G.O))_{RE_i} + (T.km(F.O))_{RE_i} \quad (iii)$$

Les coefficients "  $\beta$  " sont le rapport entre la production thermique en GO ou FO  $(P(G.O)_i, P(F.O)_i)$  et la production brute régionale  $(P_{RE_i})$  et s'expriment par :

$$\left( \beta(G.O)_{RE_i}, \beta(F.O)_{RE_i} \right) = \frac{[P(G.O)_i, P(F.O)_i]}{P_{RE_i}} \quad (iv)$$

En connaissant les facteurs d'impacts de transports relatifs au maritime tanker  $(Fl_{MT})$ , au maritime cabotage  $(Fl_{MC})$  et à la route  $(Fl_R)$ , les impacts à l'échelle des Producteurs Isolés (P.I) des régions  $(I)_{RE_i}$  seront :

$$(I(G.O))_{RE_i} = \left[ \begin{array}{l} \alpha_{MT_{RE_i}} \times (T.km(G.O))_{RE_i} \times (Fl_{MT}) + \alpha_{MC_{RE_i}} \times (T.km(G.O))_{RE_i} \times (Fl_{MC}) + \\ \alpha_{R_{RE_i}} \times (T.km(G.O))_{RE_i} \times (Fl_R) \end{array} \right] \quad (v)$$

$$(I(F.O))_{RE_i} = \left[ \begin{array}{l} \alpha_{MT_{RE_i}} \times (T.km(F.O))_{RE_i} \times (Fl_{MT}) + \alpha_{MC_{RE_i}} \times (T.km(F.O))_{RE_i} \times (Fl_{MC}) + \\ \alpha_{R_{RE_i}} \times (T.km(F.O))_{RE_i} \times (Fl_R) \end{array} \right] \quad (vi)$$

$$(I)_{RE_i} = (I(G.O))_{RE_i} + (I(F.O))_{RE_i} \quad (vii)$$

Les coefficients des distances "  $\alpha$  " sont le rapport entre les distances de transport respectivement, en maritime tanker  $(D_{MT_{RE_i}})$ , en caboteur  $(D_{MC_{RE_i}})$  et sur route  $(D_{R_{RE_i}})$  à la distance totale d'importation et de la distribution  $D_i$ .

$$\left( \alpha_{MT_{RE_i}}, \alpha_{MC_{RE_i}}, \alpha_{R_{RE_i}} \right) = \frac{\left[ \left( D_{MT_{RE_i}} \right), \left( D_{MC_{RE_i}} \right), \left( D_{R_{RE_i}} \right) \right]}{D_i} \quad (viii)$$

De la même manière, les « tonnes.kilomètre » interconnectés seront :

$$(T.km(G.O))_{RI_i} = \beta(G.O)_{RI_i} \times D_{RI_i} \times CS(G.O)_i \text{ et } (T.km(F.O))_{RI_i} = \beta(F.O)_{RI_i} \times D_{RI_i} \times CS(F.O)_i \quad (ix)$$

$$(T.km)_{RI_i} = (T.km(G.O))_{RI_i} + (T.km(F.O))_{RI_i} \quad (x)$$

Les coefficients "  $\beta$  " sont ainsi :

$$\left(\beta(G.O)_{R_i}, \beta(F.O)_{R_i}\right) = \frac{[P(G.O)_i, P(F.O)_i]}{P_{R_i}} \quad (xi)$$

et les impacts à l'échelle des Réseaux Interconnectés (RI) s'écrivent :

$$(I(G.O))_{R_i} = \left[ \begin{array}{l} \alpha_{MT_{R_i}} \times (T.km(G.O))_{R_i} \times (Fl_{MT}) + \alpha_{MC_{R_i}} \times (T.km(G.O))_{R_i} \times (Fl_{MC}) + \\ \alpha_{R_{R_i}} \times (T.km(G.O))_{R_i} \times (Fl_R) \end{array} \right] \quad (xii)$$

$$(I(F.O))_{R_i} = \left[ \begin{array}{l} \alpha_{MT_{R_i}} \times (T.km(F.O))_{R_i} \times (Fl_{MT}) + \alpha_{MC_{R_i}} \times (T.km(F.O))_{R_i} \times (Fl_{MC}) + \\ \alpha_{R_{R_i}} \times (T.km(F.O))_{R_i} \times (Fl_R) \end{array} \right] \quad (xiii)$$

$$(I)_{R_i} = (I(G.O))_{R_i} + (I(F.O))_{R_i} \quad (xiv)$$

A l'égard de la production nationale, les parts des « tonne.kilomètres » des productions isolées régionales  $(T.km(G.O))_{N_i}$  et  $(T.km(F.O))_{N_i}$  s'écrivent :

$$(T.km(G.O))_{N_i} = \lambda_i \times (T.km(G.O))_{RE_i} \quad (xv) \text{ et } (T.km(F.O))_{N_i} = \lambda_i \times (T.km(F.O))_{RE_i} \quad (xvi)$$

De même pour les Réseaux Interconnectés :

$$(T.km(G.O))_{N_j} = \lambda_j \times (T.km(G.O))_{R_j} \quad (xvii) \text{ et } (T.km(F.O))_{N_j} = \lambda_j \times (T.km(F.O))_{R_j} \quad (xviii)$$

Aussi, les « tonnes.kilomètres » nationaux  $(T.km)_N$  seront :

$$(T.km)_N = (T.km(G.O))_{N_i} + (T.km(G.O))_{N_j} \quad (xix)$$

Les coefficients des productions nationales "λ" correspondent, au rapport respectivement entre les productions régionales  $(P_{RE_i})$  et celles des réseaux interconnectés  $(P_{R_i})$  à la production brute nationale (P). Ainsi,

$$(\lambda_i, \lambda_j) = \frac{[(P_{RE_i}), (P_{R_i})]}{(P)} \quad (xx)$$

Au final, les impacts (I) du transport s'écrivent :

$$(I) = \sum_i \lambda_i [(I(G.O))_{RE_i} + (I(F.O))_{RE_i}] + \sum_j \lambda_j [(I(G.O))_{R_j} + (I(F.O))_{R_j}] \quad (xxi)$$

Ou bien :

$$(I) = \sum_i \lambda_i [(I)_{RE_i}] + \sum_j \lambda_j [(I)_{R_j}] \quad (xxii)$$

Respectivement, les unités s'expriment :

- en pourcentages (%) pour les coefficients "α" , "β" et "λ" ;

- en (g / kWh) pour les consommations spécifiques "CS" ;
- en (km) pour les distances D ;
- en (t.km / kWh) pour les "T.km" ;
- en (U.I.I / kWh) pour les impacts "(I)", "U.I.I" signifie Unité d'Indicateurs d'Impacts

**Tableau 27** : Unités d'Indicateurs d'Impacts [8]–[13]

Indicateurs d'impacts	U.I.I
Potentiel du réchauffement global	kilogramme équivalent CO <sub>2</sub> (kgéqCO <sub>2</sub> )
Potentiel d'acidification terrestre	kilogramme équivalent SO <sub>2</sub> (kgéqSO <sub>2</sub> )
Consommation énergétique non-renouvelable	Mégajoules (MJ)

### 2.1.6. Analyse de sensibilité

On applique ici la méthode EFAST sous forme de codes de calcul implémentés dans MATLAB [14]. On a choisi un nombre de simulations  $N = 5000$  et un ordre d'interférence  $M = 4$  [15]. Ainsi, on y évalue l'indice de sensibilité principal et total de chacun des paramètres.

## 2.2. Résultats

Les données de calcul sont celles qui sont recueillies auprès de la Jiro sy Rano Malagasy (JIRAMA) [17]. Elles concernent les Producteurs Isolés régionaux (P.I) et les Réseaux Interconnectés (R.I).

### 2.2.1. Résultats intermédiaires sur les paramètres

**Tableau 28** : Résultats intermédiaires sur les paramètres de calcul

$\begin{pmatrix} P.I_i \\ \text{ou} \\ R.I_j \end{pmatrix} (\%)$	Combustibles	$\begin{pmatrix} \alpha_{MT} \\ \alpha_{MC} \\ \alpha_R \end{pmatrix} (\%)$	$\begin{pmatrix} \beta_i \\ \text{ou} \\ \beta_j \end{pmatrix} (\%)$	$\begin{pmatrix} \lambda_i \\ \text{ou} \\ \lambda_j \end{pmatrix} (\%)$	$\begin{pmatrix} (T.km)_{RE_i} \\ \text{ou} \\ (T.km)_{RI_j} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} (T.km)_{N_i} \\ \text{ou} \\ (T.km)_{N_j} \end{pmatrix}$
Antsinanana	G.O	$\begin{pmatrix} 97,83 \\ 0 \\ 2,17 \end{pmatrix}$	100	0,39	3,6	0,014
Anosy	G.O F.O	$\begin{pmatrix} 85,12 \\ 11,14 \\ 3,74 \end{pmatrix}$	12,95 87,05	0,76	3,21	0,025
Atsimo Andrefana	G.O		42,44	2,32	3,82	0,115



	F.O	$\begin{pmatrix} 79,39 \\ 17,62 \\ 2,99 \end{pmatrix}$	87,05			
Androy	G.O	$\begin{pmatrix} 86,26 \\ 11,29 \\ 2,45 \end{pmatrix}$	100	0,16	4,07	0,007
Alaotra Mangoro	G.O	$\begin{pmatrix} 95,50 \\ 0 \\ 4,5 \end{pmatrix}$	100	0,59	3,42	0,02
Amoron'i Mania	G.O	$\begin{pmatrix} 90,86 \\ 0 \\ 9,14 \end{pmatrix}$	100	0,27	3,63	0,01
Analamanga	G.O	$\begin{pmatrix} 93,07 \\ 0 \\ 6,93 \end{pmatrix}$	100	0,05	3,65	0,002
Analanjirofo	G.O	$\begin{pmatrix} 98,35 \\ 0 \\ 1,65 \end{pmatrix}$	100	1,13	2,54	0,029
Atsimo Atsinanana	G.O	$\begin{pmatrix} 85,58 \\ 0 \\ 14,42 \end{pmatrix}$	100	0,28	3,79	0,011
Betsiboka	G.O	$\begin{pmatrix} 78,94 \\ 18,56 \\ 2,50 \end{pmatrix}$	100	0,18	2,76	0,005
Boeny	$\frac{\text{G.O}}{\text{F.O}}$	$\begin{pmatrix} 79,90 \\ 18,79 \\ 1,31 \end{pmatrix}$	$\frac{100}{100}$	4,35	3,74	0,163
Bongolava	G.O	$\begin{pmatrix} 91,64 \\ 0 \\ 8,36 \end{pmatrix}$	100	0,22	3,55	0,008
Diana	$\frac{\text{G.O}}{\text{F.O}}$	$\begin{pmatrix} 87,48 \\ 10,24 \\ 2,28 \end{pmatrix}$	100	5,72	3,48	0,199
Haute Matsiatra	G.O	$\begin{pmatrix} 87,71 \\ 0 \\ 12,29 \end{pmatrix}$	100	0,01	3,68	0,00039

Ihorombe	G.O	$\begin{pmatrix} 78,43 \\ 17,4 \\ 4,17 \end{pmatrix}$	100	0,21	3,55	0,007
Itasy	-	-	-	-	-	-
Melaky	G.O	$\begin{pmatrix} 73,63 \\ 24,24 \\ 2,13 \end{pmatrix}$	100	0,14	4,5	0,006
Menabe	G.O	$\begin{pmatrix} 77,16 \\ 17,12 \\ 5,72 \end{pmatrix}$	100	0,70	4,27	0,032
Sava	G.O	$\begin{pmatrix} 89,17 \\ 8,08 \\ 2,75 \end{pmatrix}$	100	1,72	3,59	0,062
Sofia	G.O	$\begin{pmatrix} 77,22 \\ 18,16 \\ 4,63 \end{pmatrix}$	100	0,77	4,09	0,032
Vakinakaratra	-	-	-	-	-	-
Vatovavy Fitovinany	G.O	$\begin{pmatrix} 85,71 \\ 0 \\ 14,29 \end{pmatrix}$	100	0,60	3,69	0,022
R.I.A	$\frac{\text{G.O}}{\text{F.O}}$	$\begin{pmatrix} 94,14 \\ 0 \\ 5,86 \end{pmatrix}$	$\frac{0,24}{26,76}$	70,18	0,79	0,55
R.I.T	$\frac{\text{G.O}}{\text{F.O}}$	$\begin{pmatrix} 99,68 \\ 0 \\ 0,32 \end{pmatrix}$	$\frac{2,53}{65,57}$	6,93	2,11	0,146
R.I.F	G.O	$\begin{pmatrix} 88,66 \\ 0 \\ 11,34 \end{pmatrix}$	11,90	2,29	0,43	0,01

### 2.2.2. Valeurs d'impact selon GEMIS

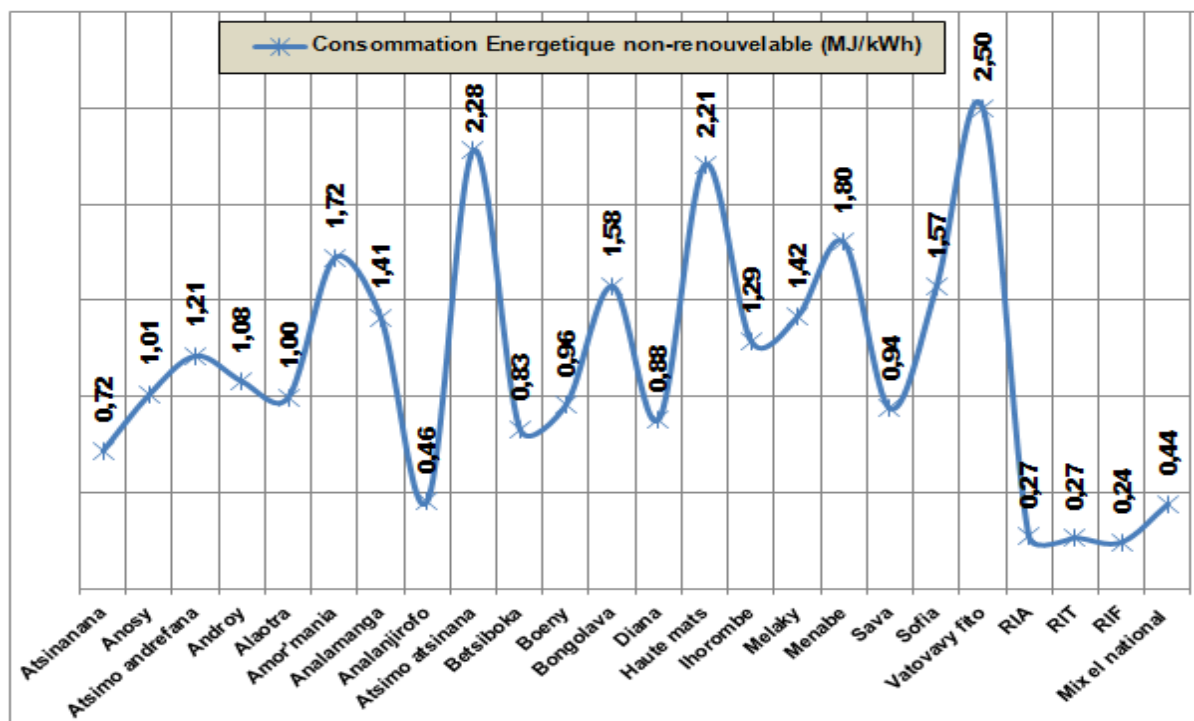
Au niveau des Producteurs Isolés régionaux (P.I), des Réseaux Interconnectés (R.I) et à l'échelle nationale, pour chaque 1kWh d'électricité produite, les transports non-stationnaires contribuent aux valeurs d'impacts indiquées dans la (Figure 33).

Résultats:		
option [kg]	équivalent CO2	équivalent SO2
Atsinanana	5,51155E-2	1,05438E-3
Anosy	7,69365E-2	1,17728E-3
Atsimo andrefana	9,20942E-2	1,37836E-3
Androy	8,22998E-2	1,33976E-3
Alaotra	7,59228E-2	1,23754E-3
Amor'mania	1,3017E-1	1,80867E-3
Analamanga	1,07055E-1	1,58017E-3
Analanjirifo	3,50165E-2	7,05495E-4
Atsimo atsinana	1,95196E-1	2,4818E-3
Betsiboka	6,33285E-2	9,60048E-4
Boeny	7,29995E-2	1,17188E-3
Bongolava	1,19216E-1	1,68831E-3
Diana	6,72656E-2	1,1185E-3
Haute mats	1,66563E-1	2,18073E-3
Ihorombe	9,76174E-2	1,4018E-3
Melaky	1,0756E-1	1,57913E-3
Menabe	1,36451E-1	1,87745E-3
Sava	7,15311E-2	1,18377E-3
Sofia	1,19107E-1	1,6777E-3
Vatovavy fito	1,88639E-1	2,40228E-3
RIA	2,07082E-2	3,17551E-4
RIT	2,08092E-2	5,0339E-4
RIF	1,83925E-2	2,44573E-4
Mix el national	3,39624E-2	5,35416E-4

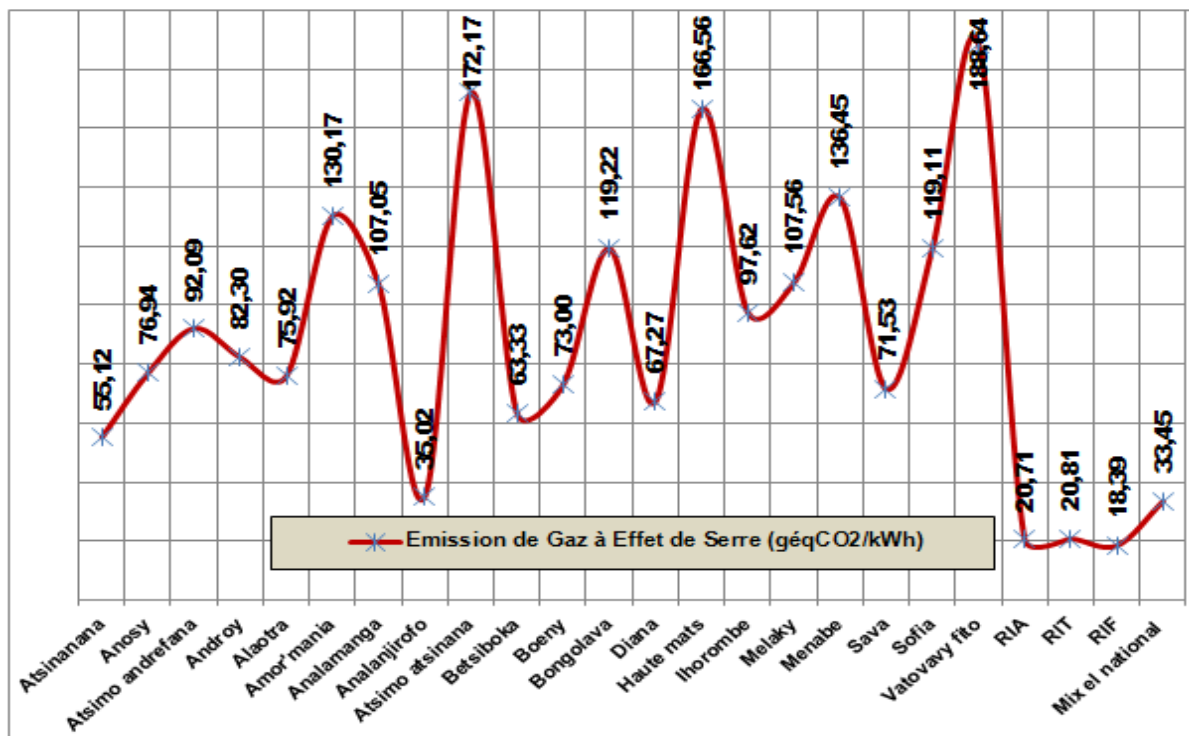
Résultats:	
option [MJ]	non renouvelable
Atsinanana	7,18468E-1
Anosy	1,01243
Atsimo andrefana	1,21225
Androy	1,07987
Alaotra	9,974E-1
Amor'mania	1,72133
Analamanga	1,41232
Analanjirifo	4,55171E-1
Atsimo atsinana	2,58953
Betsiboka	8,3303E-1
Boeny	9,57556E-1
Bongolava	1,57533
Diana	8,81789E-1
Haute mats	2,2074
Ihorombe	1,28741
Melaky	1,41609
Menabe	1,8029
Sava	9,38212E-1
Sofia	1,57203
Vatovavy fito	2,50241
RIA	2,72757E-1
RIT	2,67453E-1
RIF	2,43594E-1
Mix el national	4,46521E-1

**Figure 33 :** Résultats d'Impacts selon GEMIS

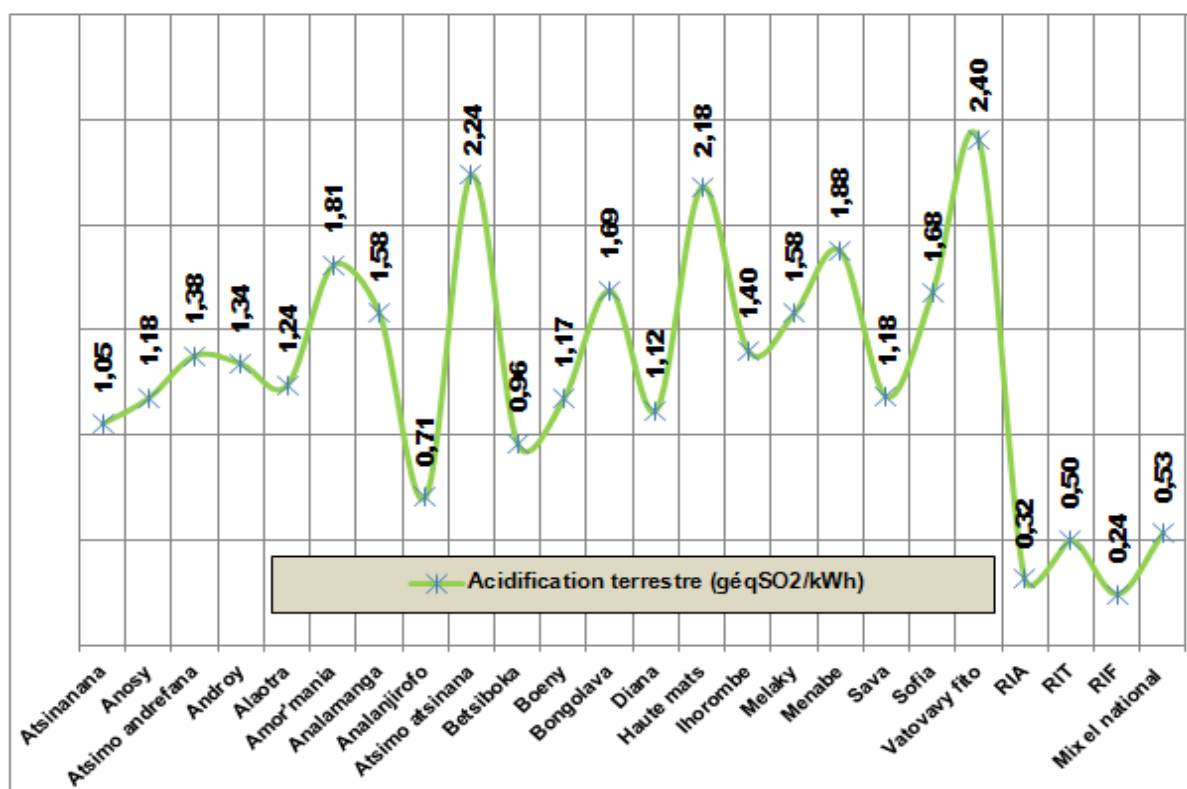
Les impacts en termes de consommation énergétique non-renouvelable, d'émission en Gaz à Effet de Serre (GES) dus aux transports pour produire 1kWh d'électricité, à l'échelle des productions isolées (PI) des régions, des trois R.I et au niveau national sont renseignés par les Figure 34 et Figure 35.



**Figure 34 :** Courbe d'indicateur d'impact en consommation énergétique



**Figure 35 :** Courbe d'indicateur d'impact en potentiel de réchauffement global  
 Les résultats sur l'acidification terrestre et l'allure de l'ensemble d'impacts sont renseignés dans les Figure 36 et Figure 37.



**Figure 36 :** Courbe d'indicateur d'impact en acidification terrestre  
 La Figure 37 montre une vue d'ensemble des allures de courbes d'indicateurs d'impacts.

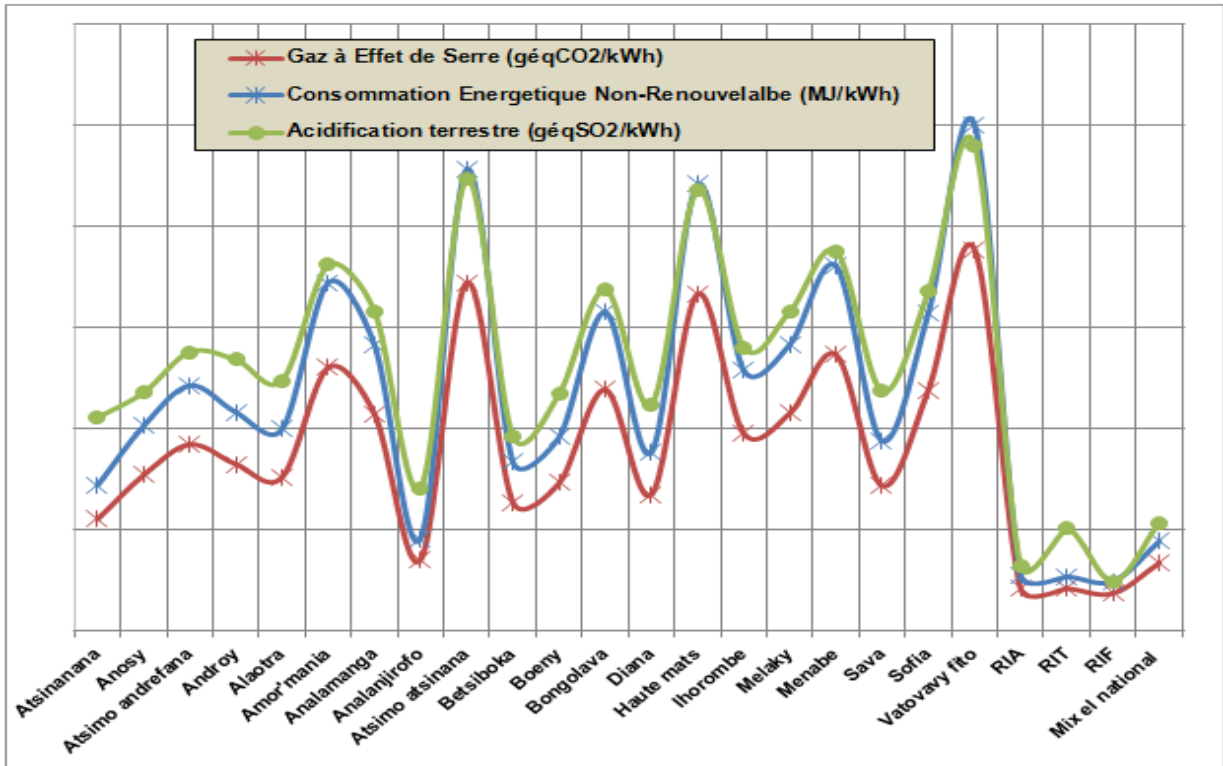


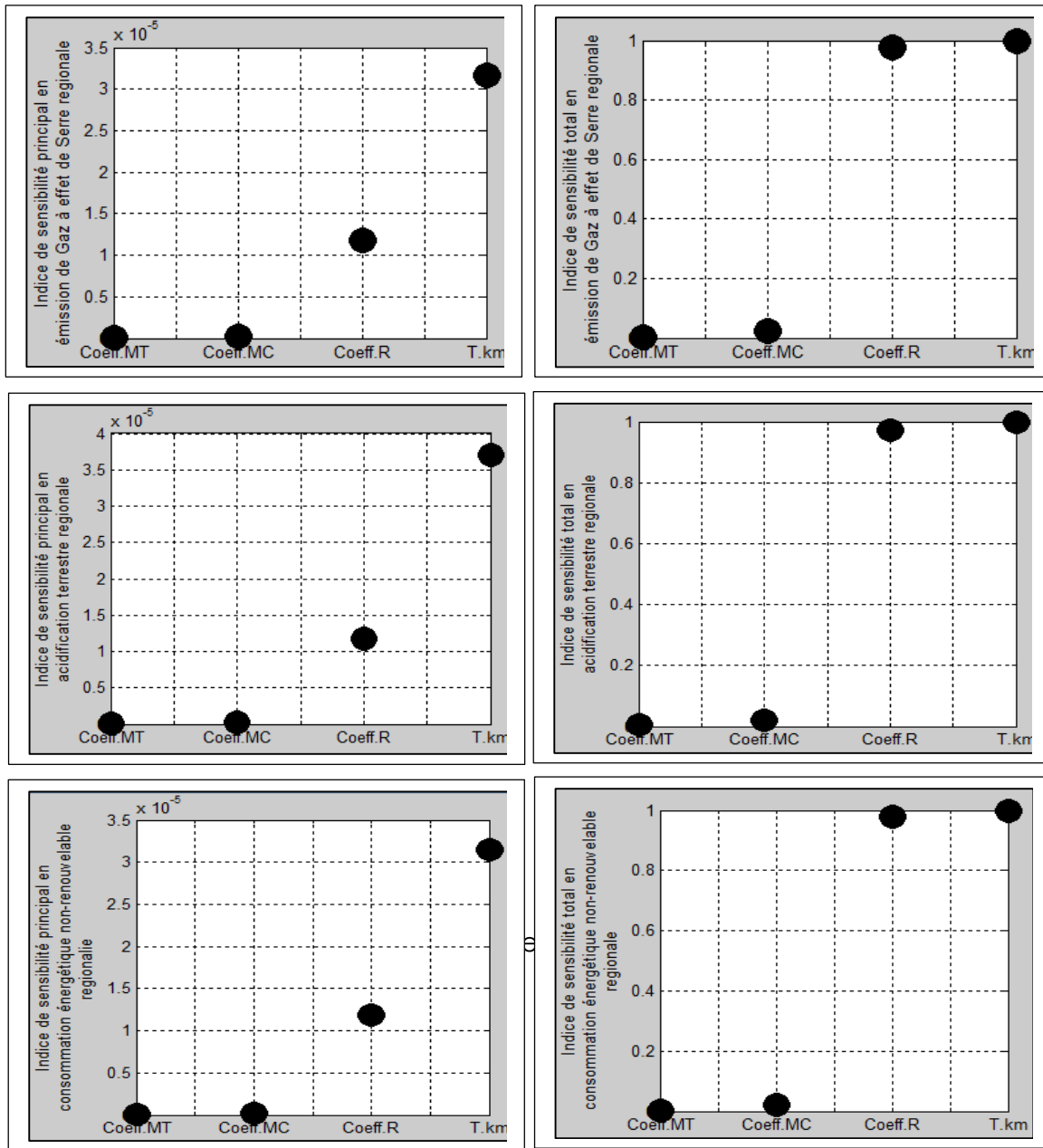
Figure 37 : Courbe d'allure des indicateurs d'impact

### 2.2.3. Analyse de sensibilité (A.S)

Au niveau des (P.I) régionaux et les Réseaux Interconnectés (RI), le calcul d'impact ( $Y$ ) (selon les formules (v,vi,xii,xiii)) se résume sur un modèle de la forme :  $Y = (FI_{MT})X_1.X_4 + (FI_{MC})X_2.X_4 + (FI_{MC})X_3.X_4$  dont les variables d'entrées  $X_{1,2,3}$  représentent respectivement les coefficients de distance « maritime tankers », « maritime caboteurs », et « routière » et  $X_4$  désigne les « tonne.kilomètres » des régions. En remplaçant les facteurs d'impacts par ceux renseignés par GEMIS [16], les modèles d'impact en émission de GES, en acidification terrestre et en consommation énergétique non-renouvelable s'écrivent :

$$\begin{cases} Y_{eqCO_2} = 8,91.10^{-3} X_1.X_4 + 44,84.10^{-3} X_2.X_4 + 303,98.10^{-3} X_3.X_4 \\ Y_{eqSO_2} = 228,91.10^{-6} X_1.X_4 + 473,13.10^{-6} X_2.X_4 + 3,18.10^{-3} X_3.X_4 \quad (xxiii) \\ Y_{ENRG} = 114,01.10^{-3} X_1.X_4 + 595,41.10^{-3} X_2.X_4 + 4,06 X_3.X_4 \end{cases}$$

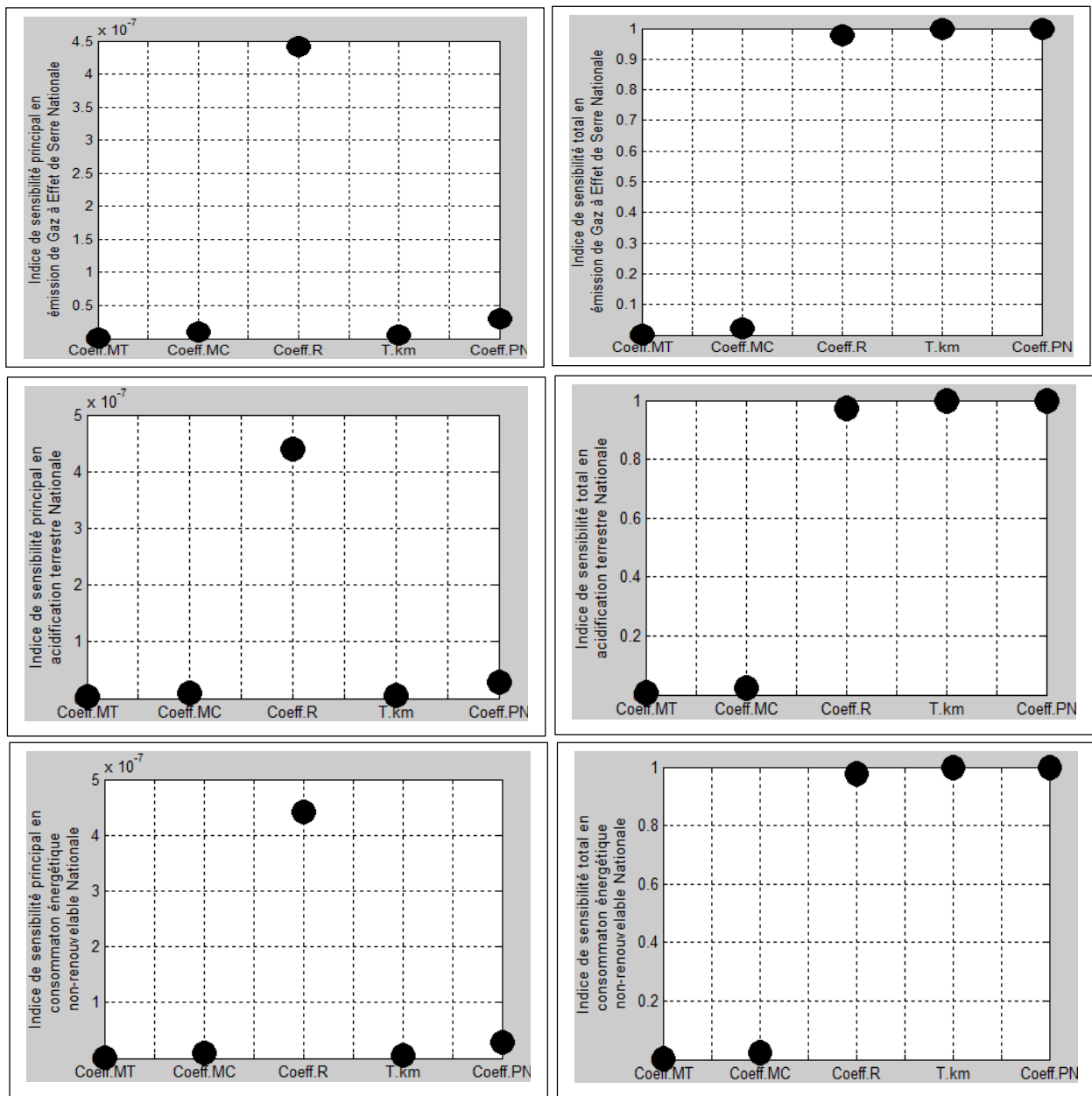
L'A.S (Figure 9) conclut que les paramètres  $X_4$  (T.km) et  $X_3$  (coefficient des distances routières  $\alpha_r$ ) sont les plus influents dans ce modèle. L'effet d'interaction de la variable  $\alpha_r$  avec la variable « T.km » est aussi relativement important.



**Figure 38 :** Indices de sensibilité des paramètres impacts au niveau régional

$$\begin{cases}
 Y_{eqCO_2} = 8,91.10^{-3} X_1.X_4.X_5 + 44,84.10^{-3} X_2.X_4.X_5 + 303,98.10^{-3} X_3.X_4.X_5 \\
 Y_{eqSO_2} = 228,91.10^{-6} X_1.X_4.X_5 + 473,13.10^{-6} X_2.X_4.X_5 + 3,18.10^{-3} X_3.X_4.X_5 \quad (xxiv) \\
 Y_{ENRG} = 114,01.10^{-3} X_1.X_4.X_5 + 595,41.10^{-3} X_2.X_4.X_5 + 4,06 X_3.X_4.X_5
 \end{cases}$$

où  $X_5$  représente les coefficients de production nationale. Les paramètres coefficients « distances routières  $\alpha_R$  » ont un effet principal nettement élevé tandis que les effets d'interaction entre les variables  $\alpha_R$ , « T.km » et  $\lambda$  sont extrêmement importants (Figure 10).



**Figure 39 :** Indices de sensibilité des paramètres d'impacts au niveau national

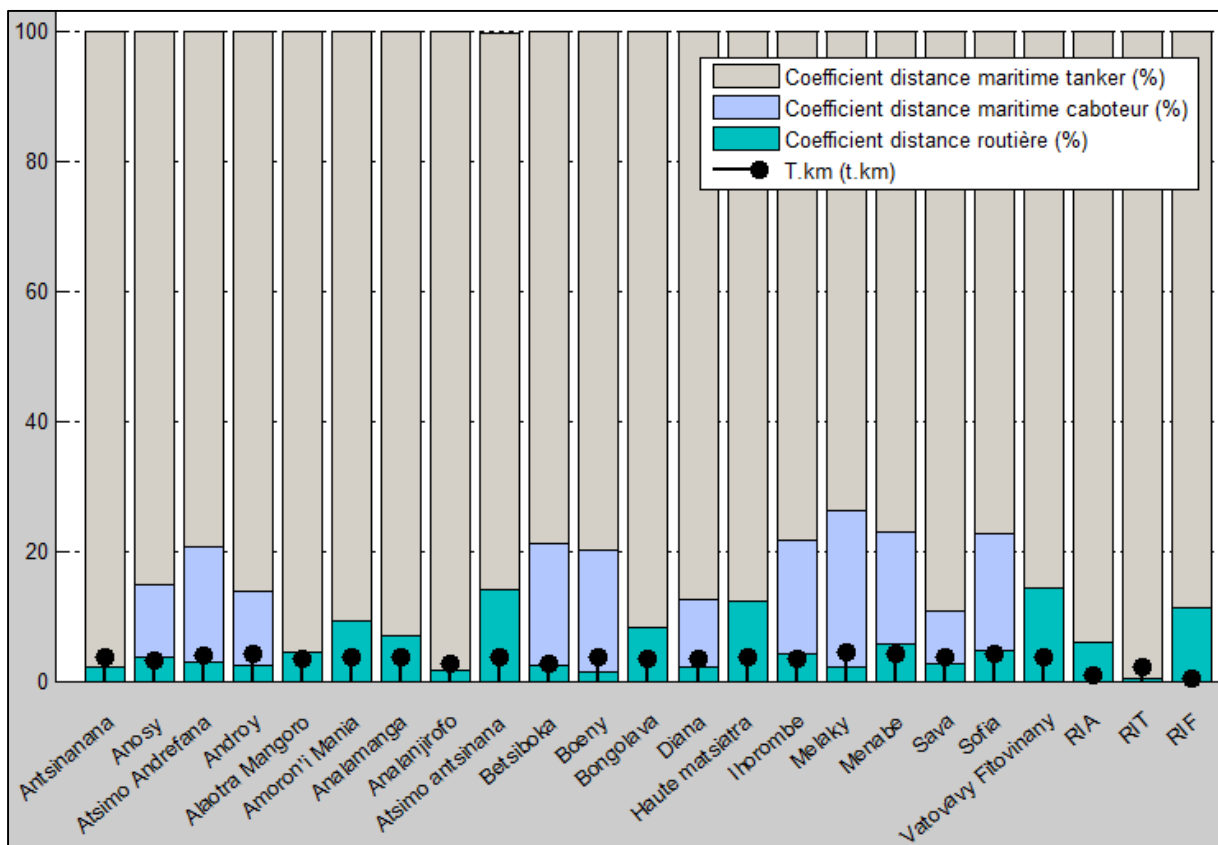
Les indices de sensibilité illustrés par les Figure 9 et Figure 10 justifient la concordance des allures des indicateurs d'impact (figure 7).

### 2.3. Discussions

Les paramètres tout autour du transport maritime (tanker et caboteur) sont moins influents sur le modèle. En termes d'impact, les auteurs de [18] stipule que les transports maritimes contribuent jusqu'à 92% de moins par rapport au transport routier. Cette grande influence attribuée au transport routier se confirme tout au long de cette étude. Ainsi, au niveau des (P.I) régionaux, justifié par l'analyse de sensibilité, les régions « Atsimo Atsinanana  $\alpha_R = 12,19$  », « Vavovavy Fitovinany  $\alpha_R = 14,29$  » et « Haute Matsiatra  $\alpha_R = 12,29$  » [4] présentent des « pics d'impact » dus au transport sur leur production de

1kWh électricité (Figure 37). En d'autres mots, ces trois régions accumulent des distances routières élevées pour l'acheminement des fiouls (G.O ou F.O) dans chacune de leurs centrales thermiques [4]. Paradoxalement, la Région Atsimo Atsinanana détient le premier rang d'impacts malgré son faible  $\alpha_R$  par rapport aux deux autres. Cela est prouvé par son paramètre «  $T.km$  » qui est égal à 3,79 en démarquant ceux des deux Régions, respectivement de 3.69 et 3.68 [17]. En effet, le paramètre «  $T.km$  » a un indice de sensibilité principal élevé par rapport au paramètre «  $\alpha_R$  » (Figure 40).

Au niveau des réseaux interconnectés, les impacts dus au transport sur leur production d'électricité, relativement faibles, sont constatés (Figure 37). A priori, le R.I de Toamasina, vu son emplacement, connaît une part de transport routier très faible ( $\alpha_R = 0,32$ ) [4]. De même, une grande partie des sources hydrauliques est observée pour le R.I d'Analamanga (70,26%) ainsi que celui de Fianarantsoa (88,10%) [17], et c'est ainsi que des faibles «  $T.km$  » en transport non-stationnaire sont constatés dans ces Régions (Figure 40).

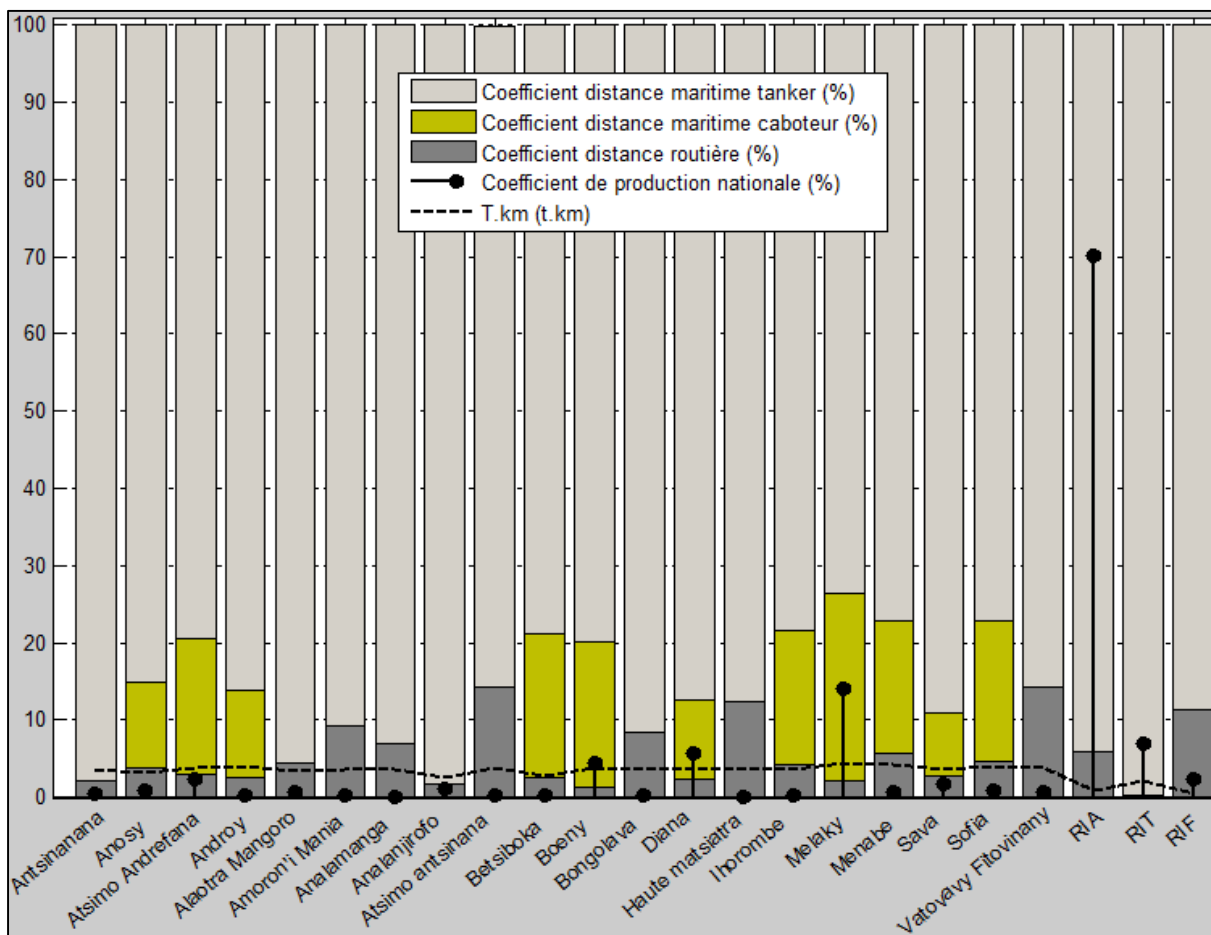


**Figure 40 :** Courbe des paramètres d'impact au niveau régional

Au niveau national (Figure 41), l'analyse de sensibilité indique que, suivie par la variable  $\lambda$ , la variable  $\alpha_R$  a un effet « à eux tout seul » très influent. Aussi, il y a un effet d'interaction important entre les trois variables «  $\alpha_R, T.km, \lambda$  ». D'ailleurs, constatons que les parts «  $\lambda$  » des productions de la plupart des Régions vis-à-vis de la production



nationale sont très faibles [17]. Ce large écart au niveau des  $\lambda$  conditionne l'aspect de la variable de sortie qui est l'impact du transport sur la production de l'électricité nationale. C'est ainsi que, les impacts propres au R.I d'Analamanga ( $\lambda = 70,18\%$ ), au R.I de Toamasina ( $\lambda = 6,93\%$ ), au P.I de DIANA ( $\lambda = 5,72\%$ ), au P.I de Boeny ( $\lambda = 4,35\%$ ) et au P.I d'Atsimo Andrefana ( $\lambda = 2,32\%$ ) [17] profilent l'impact dû au transport des fiouls (G.O et F.O) sur la production de l'électricité nationale (Figure 41).



**Figure 41 :** Courbe des paramètres d'impact au niveau national

Globalement, on a la valeur d'indicateur d'impact de  $33,25 \text{g} \acute{\text{e}} \text{qCO}_2$  en émission de G.E.S, de  $0,53 \text{g} \acute{\text{e}} \text{qSO}_2$  en acidification terrestre puis  $0,44 \text{MJ}$  en consommation énergétique non-renouvelable dus au transport des fiouls pour produire  $1 \text{kWh}$  du mix électrique national malagasy. En se référant aux régions d'outre-mer françaises, l'île de la Réunion possède des impacts élevés dus au transport ( $20 \text{g} \acute{\text{e}} \text{qCO}_2 / \text{kWh}$  et  $0,5 \text{g} \acute{\text{e}} \text{qSO}_2 / \text{kWh}$ ) [19]. En effet, comme le cas de Madagascar, le mix électrique réunionnais connaît une part de  $62,23\%$  des sources fossiles totalement importées [20]. De même la région guyanaise a un faible impact [19] dû à la part légèrement faible ( $37\%$ ) en fossile de son mix électrique [21]. Parallèlement, sur les 167 cas d'études des

auteurs de [6], les centrales thermiques fossiles ont leur phase de transport contribuant à une émission tout autour de  $0,4\text{g}\text{éqCO}_2 / \text{kwh}$  et  $0,8\text{g}\text{éqSO}_2 / \text{kwh}$ .

### 3. CONCLUSION

Cette étude ravive la nécessité d'une transition énergétique électrique moins onéreuse en transport, prônée par le contexte du développement durable. La phase du transport au sein de l'électricité malagasy, à elle seule, est déjà à 4 fois plus supérieures en termes d'impacts par rapport à la totalité du mix électrique norvégien [16]. Dès lors, le système énergétique adéquat est celui à base des sources hydrauliques, solaires et éoliennes [6]. A propos duquel, les auteurs de [6] y constatent des moindres impacts relatifs à la phase du transport.

Déjà, à long terme, l'Etat malagasy prévoyait un basculement important vers la source électrique renouvelable hydroélectrique et à court terme, sur la mise en place d'un système hybride thermique-solaire comme le cas de la Région Betsiboka [2]. Selon l'analyse de sensibilité des résultats, la décision de réduire les impacts nationaux devrait être orientée vers les processus de production des Réseaux Interconnectés R.I.A, R.I.T et aussi à ceux des Producteurs Isolés de DIANA, de Boeny et d'Atsimo Andrefana. En exemple, si on continue à installer un système hybride à 50% solaire, dans la Région DIANA et Boeny, on pourrait réduire de 14,2% les impacts dus au transport sur l'électricité nationale.

Au final, cette étude n'est qu'un début du travail d'investigation sur le mix électrique national malagasy, dont l'intérêt est d'y intégrer des bases de données environnementales fiables aussi bien à l'échelle nationale qu'internationale. En prochaine étape, on ira sur une frontière « berceau au portail » pour la production d'électricité nationale.

### Références

- [1] AIDES, Diagnostic du secteur énergie à Madagascar, Sep. 2012
- [2] PROGRAMME SREP, Plan d'investissement des énergies renouvelables à Madagascar-Ministère de l'eau, de l'énergie et des hydrocarbures, Avr. 2018
- [3] *Loi n°2017-020 portant Code de l'Electricité à Madagascar*, p. 37, 2017
- [4] OMH, Bulletin pétrolier, 2019
- [5] Banque Mondiale, Madagascar : Vers un agenda de relance économique, Madagascar, 18, Juin 2010
- [6] R. Turconi, A. Boldrin, and T. Astrup, Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies : Overview, comparability and limitations, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 28, pp. 555–565, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.08.013

- [7] The World Bank, Greenhouse Gas Emissions Mitigation in Road Construction and Rehabilitation. Jun. 2011
- [8] ISO, ISO 14040: Management environnemental – Analyse de Cycle de Vie – Principes et cadre. 1997
- [9] ISO, ISO 14041: Management environnemental – Analyse de Cycle de Vie – Définition de l'objectif et du champ d'étude et analyse de l'inventaire, 1998
- [10] ISO, ISO 14042: Management environnemental – Analyse de Cycle de Vie – Évaluation d'impact du cycle de vie, 2000
- [11] ISO, ISO 14043: Management environnemental – Analyse de Cycle de Vie – Interprétation, 2000
- [12] ISO, ISO (2006a) ISO 14040 : 2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework, 2006
- [13] ISO, ISO (2006b) ISO 14044 : 2006 Environmental management – Life cycle assessment –Requirements and guidelines, 2006
- [14] F. Pianosi *et al.*, Sensitivity analysis of environmental models : A systematic review with practical workflow, *Environ. Model. Softw.*, vol. 79, pp. 214–232, doi: 10.1016/j.envsoft.2016.02.008, May 2016
- [15] J. O. Rakoto, Analyse de sensibilité paramétrique de modèles. Université d'Antananarivo, 2012
- [16] OEKO (Oko-Institut), Core data base of the GEMIS project. [Online]. Available: [www.oeko.de/service/gemis](http://www.oeko.de/service/gemis)
- [17] JIRAMA, Statistiques de production électrique (fichier sous format tableur), 2018
- [18] M. Spielmann and R. Scholz, Life Cycle Inventories of Transport Services : Background Data for Freight Transport (10p.), *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol.10, no.1, pp. 85–94, doi: 10.1065/lca2004.10.181.10, Jan. 2005
- [19] V. Rakotoson and J. P. Praene, A life cycle assessment approach to the electricity generation of French overseas territories, *J. Clean. Prod.*, vol. 168, pp.755–763, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.09.055, Dec. 2017
- [20] EDF SA, Systèmes énergétiques insulaires la réunion, Jul. 2017
- [21] EDF SA, Systèmes énergétiques insulaires Guyane, Jul. 2017