



Analyse Exergétique de l'île de la Réunion

Niandrisoa Ranarivelo, Michard Rajaonahy, Hery Tiana Rakotondramiarana,
Jean-Philippe Praene

► **To cite this version:**

Niandrisoa Ranarivelo, Michard Rajaonahy, Hery Tiana Rakotondramiarana, Jean-Philippe Praene.
Analyse Exergétique de l'île de la Réunion. 3ème Congrès International Plasma Energie, CIPE2016,,
Dec 2016, Antsiranana Madagascar. 2016. <hal-01611937>

HAL Id: hal-01611937

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01611937>

Submitted on 6 Oct 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.

Analyse Exergétique de l'île de la Réunion

Niandrisoa M. Ranarivelo ^{1*}, Michard R. Rajaonahy ², Jean Philippe Praene³, Hery T. Rakotondramiarana²

¹Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA), Université d'Antananarivo, BP 566, Antananarivo 101, Madagascar

²Institut pour la Maîtrise de l'Energie (IME), Université d'Antananarivo, BP 566, Antananarivo 101, Madagascar

³Laboratoire PIMENT, Université de la Réunion, 117 rue du Général Ailleret, 97430 Le Tampon, Réunion

* auteur correspondant : niandrisoa@gmail.com

RESUME : Le Bilan Energétique de La Réunion montre que cette île est actuellement dépendante en énergie fossile notamment l'huile lourde et ses dérivées. L'objectif du présent travail est de contribuer à l'atteinte de son indépendance énergétique à l'horizon 2030 en identifiant les facteurs influents et en proposant des alternatives adéquates. Pour ce faire, une étude rétrospective sur la consommation exergétique de l'île est primordiale. Entre 2000 et 2014, les résultats montrent une variation de 8 à 10% de l'efficacité exergétique au niveau national. Une analyse des effets prépondérants par décomposition des travaux utiles est présentée dans la deuxième méthode de ce travail. Il en découle que les travaux accomplis de 2014 augmentent de 1,5 fois par rapport à ceux de l'année 2000. Cette augmentation est généralement due au domaine thermique, électrique et mécanique. De plus, la projection des travaux accomplis a permis d'estimer la consommation future de l'île en énergie primaire à l'horizon 2030 égale à une valeur comprise entre 1530 et 1575ktep. Ainsi, pour assurer cette indépendance énergétique, il convient d'augmenter les ressources en exergie primaire de l'énergie électrique, laquelle est convertible en énergie mécanique. Pour le cas de l'énergie thermique, la cogénération avec cette forme d'énergie noble est vivement recommandée.

Mots clés : *exergie, ressources primaires, travaux utiles, décomposition, projection.*

1 INTRODUCTION :

Etant une île du sud-ouest de l'océan indien, La Réunion est un département et région d'outre-mer français. Située dans la zone intertropicale, elle est annuellement sollicitée par des cyclones. A cause des vents marqués, son relief escarpé est modelé par l'érosion, ce qui lui donne des paysages particuliers, adéquats aux sites touristiques. Depuis les années 80, l'île de La Réunion a vécu un remarquable développement économique et démographique. Cela a entraîné une augmentation d'environ 350 % de la consommation d'énergie au début du troisième millénaire. Celle-ci est principalement produite à partir d'énergies fossiles importées [1]. Identiquement, nombreux sont les pays qui ont connu cette explosion économique. A titre d'exemple, la consommation annuelle de charbon en Chine a passé de 2 à 10% de 1990 à 2000. En 2010, cette quantité a atteint plus de 3 milliards de tonnes. Les ressources naturelles fossiles s'épuisent donc progressivement. De ce fait, en matière d'énergie, La Réunion s'est fixée un objectif ambitieux de l'autonomie électrique à l'horizon 2030. « Poursuivre et conforter le développement exemplaire en matière d'énergies renouvelables et de maîtrise de l'énergie »[2], telle est la manœuvre stratégique qu'elle a adoptée. Dans cette optique, les Réunionnais tiennent à « savoir mesurer et évaluer sa consommation énergétique »[3]. Pour obtenir des résultats plus concrets, il convient de ne pas se cantonner à l'analyse énergétique, mais plutôt de se lancer dans l'analyse exergétique. En effet, celle-ci prend en compte les pertes dans l'étude établie, notion fondamentale du second principe de la thermodynamique. L'exergie est définie comme une mesure de la différence entre l'état d'un système et celui de son environnement. Elle met en exergue la qualité de la conversion de diverses formes d'énergie ainsi qu'à l'identification des sites où les pertes sont plus importantes afin d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles. Peu nombreux sont les pays qui ont effectué cette analyse exergétique au niveau national. A titre d'exemple, il y a le cas des Etats-Unis et du Royaume-Uni, de la Chine et de certains pays de l'Union Européenne. L'évolution de la consommation exergétique est fonction de l'efficacité exergétique et de sa structure. D'une part, l'amélioration de celle-là est limitée. A titre d'illustration, les Etats-Unis, un pays très développé, ne peut plus augmenter son efficacité exergétique [4]. D'autre part, la structure, que ce soit générale ou classifiée, influence sur cette évolution. L'exemple de la Chine, passant de l'usage des travaux musculaires à la mécanisation, illustre ce propos.

Pour le cas de La Réunion, quel est donc l'effet dominant : son efficacité exergétique ou sa structure? Cela mène à l'étude des scénarii possibles afin d'aboutir à l'autosuffisance en énergie de l'île. De ce fait, pour comprendre la demande en énergie de l'île, que ce soit rétrospective ou projective, les trois méthodes suivantes sont utilisées successivement : l'analyse historique de l'efficacité exergétique et de l'exergie utile, l'application de la méthode LMDI-I sous la forme multiplicative et enfin la projection de la demande en énergie primaire. Les modèles numériques sont modélisés sous l'environnement Matlab. A la fin de cet ouvrage, des propositions seront présentées pour compenser ce besoin énergétique, selon les potentialités locales.

Les premières sections de cet ouvrage présenteront les hypothèses imposées lors de l'acquisition des données et une explication des trois méthodes mentionnées ci-dessus. La section suivante exposera les résultats et les discussions. Enfin, la dernière section apportera la conclusion ainsi que les suggestions pour assurer l'indépendance énergétique de l'île en 2030.

2 HYPOTHESES

Les principales données utilisées dans cet ouvrage sont tirées du document intitulé Bilan Energétique de La Réunion édition 2015[3]. Elles datent de l'année 2000 jusqu'à 2014.

Les efficacités exergétiques des sous catégories de la classe principale sont déduites de celles de la Chine de 1970 à 2010 [5].

3 NOTIONS FONDAMENTALES

Pour mieux comprendre les trois méthodes citées précédemment, quelques définitions sont exposées de prime abord; s'ensuit l'organigramme de calcul; enfin, ces trois méthodes sont progressivement détaillées.

3.1 Définitions et principes de base

L'exergie est une grandeur thermodynamique définie comme une quantité maximale de travail qu'un sous-système peut exercer sur son entourage. Cette quantité est telle qu'elle permet d'équilibrer une transformation thermodynamique réversible[6]. En effet, pour cette dernière, l'exergie détruite est nulle.

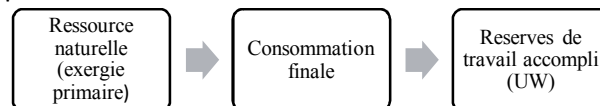
3.1.1 Cas de ressources renouvelables

L'exergie correspond au travail que le Soleil, seule source d'énergie primaire, fournit directement ou indirectement au récepteur. A titre d'exemple, pour le cas de ressources hydrauliques, l'exergie primaire est le travail disponible effectué par la chute d'eau à travers une turbine.

Par rapport à l'exergie qui se définit comme travail disponible, le travail utile est le travail réellement accompli [6]. Dit autrement, le travail utile est l'exergie sans les diverses pertes dues à la création des entropies à plusieurs niveaux. Ces pertes sont les pertes par rendement et les pertes par conversion. L'efficacité exergétique est une grandeur qui se définit par le rapport suivant[6] :

$$\epsilon_{ij} = \frac{\text{Exergie utile } U_{ij}}{\text{Exergie primaire } E_{ij}} \quad (1)$$

Elle peut se décomposer, selon l'organigramme suivant, en deux parties bien distinctes : efficacité par transformation et efficacité par conversion.



3.1.2 Divisia Index

Le terme Divisia Index était inventé initialement pour l'étude économique. L'index de quantité Divisia est une combinaison dont chaque terme indexé est corrigé par une fonction poids. Cette fonction poids permet de distribuer la grandeur à décomposer[7]. L'approche Divisia Index est introduite dans l'analyse de décomposition indexée (Index Decomposition Analysis ou IDA) par Boyd et al en 1987. Transposée à notre étude, la notion de poids permet de distribuer les travaux accomplis aux divers effets. Cette fonction notée w est le résultat obtenu en appliquant le théorème de la valeur moyenne pour l'intégrale[8]. La découverte de la fonction poids usant la moyenne logarithmique [9] permet la décomposition parfaite. La méthode de décomposition LMDI hérite donc cette qualité.

3.1.3 Moyenne logarithmique

Ang et Choi [10] ont introduit la moyenne logarithmique dans IDA. La moyenne logarithmique de deux nombre positifs a et b est donnée par :

$$L(a, b) = \frac{a-b}{\ln a - \ln b} \quad (2)$$

Et pour le cas particulier où a=b, on a

$$L(a, a) = a \quad (3)$$

Cette moyenne, quand "a" diffère de "b", est plus petite que la moyenne arithmétique mais plus grande que la moyenne géométrique :

$$\sqrt{a \times b} \leq L(a, b) \leq \frac{a+b}{2} \quad (4)$$

3.2 Critères de choix de méthodes de décomposition

3.2.1 Principe de base

Les critères suivants [11] permettent d'évaluer la performance d'une méthode de décomposition :

- la fondation théorique;
- l'adaptabilité;
- la facilité d'utilisation;
- et enfin la facilité d'interprétation.

i. Fondation théorique

Les quatre tests suivants, dans la théorie de nombre d'index[12], sont utilisés pour déterminer la désirabilité de la méthode de décomposition :

- réversibilité de facteur;
- réversibilité de temps;
- test de proportionnalité;
- test de décomposition.

Parmi ces quatre tests, le test de réversibilité de facteur est le plus important. La méthode de décomposition vérifiant ce test est prise, comme performante, par les analystes. A titre de rappel, une méthode aboutit à une décomposition parfaite quand la démonstration analytique donne $D_{rsd} = 1$ (effet de résidu pour la forme multiplicative) et $\Delta I_{rsd} = 0$ (effet de résidu pour la décomposition additive). Dans ce cadre, la méthode satisfait le test de réversibilité de facteur.

ii. Les autres critères

A part la fondation théorique, il existe les critères suivants :

- adaptabilité;
- facilité d'usage;
- facilité d'interprétation de résultats;

3.2.2 Application aux deux méthodes LMDI : il existe deux types de méthode LMDI : LMDI I et LMDI II.

Ces deux méthodes se différencient par leur fonction poids w_j [13]: Pour la méthode LMDI I :

$$w_j = L(V_j^T, V_j^0) \quad (5)$$

Pour la méthode LMDI II :

$$w_j = \frac{L(V_j^T/V^T, V_j^0/V^0)}{\sum_{j=1}^m L(V_j^T/V^T, V_j^0/V^0)} L(V^T, V^0) \quad (6)$$

Les deux méthodes satisfassent la plupart des tests cités ci-dessus, sauf que la forme additive de LMDI I ne répond pas au test de proportionnalité tandis que la forme additive de LMDI II échoue au test de décomposition.

4 METHODES DETAILLEES

4.1 Useful Work Accounting Method

Cette méthode permet d'obtenir l'efficacité exergetique nationale de l'île. Les données à entrer sont principalement les consommations primaires en énergie des sous-catégories de chaque classe principale. Celles-ci sont converties en exergies primaires par les coefficients d'exergie chimique. L'efficacité

exergétique correspondant à chaque sous-catégorie est choisie parmi les scénarii disponibles. Les travaux accomplis sont déduits de la formule (1)[6]:

$$U_{ij} = \eta_{ex} \times E_{ij} \quad (7)$$

Pour le cas de l'énergie thermique, l'efficacité exergétique est déduite du cycle de Carnot.

Les efficacités exergétiques des sous-catégories des deux classes (électrique, mécanique) sont déduites de la base de données de la Chine[14]. Quatre scénarii de retard par rapport à la Chine sont disponibles, à savoir :

- Scénario faible : retard de 30 ans ;
- Scénario moyen : retard de 20 ans ;
- Scénario élevé : retard de 10ans ;
- Scénario ultime : retard de 6 ans.

Comme l'île de La Réunion présente une avancée considérable dans le domaine de l'énergie électrique, le scénario choisi dans le présent cas est le scénario ultime. Pour l'énergie mécanique, le scénario adopté est le scénario moyen. En effet, l'île possède peu d'industries. Les travaux mécaniques qui en découlent sont donc moindres. Cependant, ce manque est compensé par le développement du transport.

L'organigramme de calcul détaillé pour cette première méthode est renvoyé à l'annexe 1.

4.2 LMDI I sous forme multiplicative

La méthode LMDI permet de décomposer une grandeur. Dans la présente étude, celle-ci s'agit de travail utile (UW). La compréhension de cette méthode nécessite l'analyse des ouvrages [11][15][16][17][18][19][20][21][22][23][24] [25][26][27][28]

Cette méthode présente deux variantes : LMDI I et LMDI II [9]. A la lumière du travail de Ang et Huang[9] qui expose à la fois les avantages et les inconvénients de chacune d'elles, LMDI I est choisie. En effet, celle-ci est parfaite pour la décomposition de sous-catégorie. La démonstration est renvoyée à l'annexe 2. De plus, la formulation de la fonction poids est simplifiée. Elle satisfait le test de décomposition sur les niveaux de sous-catégories, contrairement à la méthode LMDI II.

Une autre particularité de la méthode LMDI I est son aptitude à manipuler les valeurs nulles[29]. L'étude des cas est renvoyée à l'annexe 3.

Sa forme multiplicative possède les propriétés de sa forme additive [30] selon les équations suivantes (En appliquant la propriété multiplicative de la fonction logarithmique, équation (8), sur la forme multiplicative de la LMDI (9)):

$$\ln(a \times b) = \ln a + \ln b \quad (8)$$

L'équation qui caractérise la forme multiplicative de la LMDI:

$$D_{tot} = D_{x_1} \times D_{x_2} \times \dots \times D_{x_k} \quad (9)$$

L'équation (9) devient :

$$\ln D_{tot} = \ln D_{x_1} + \ln D_{x_2} + \dots + \ln D_{x_n} \quad (10)$$

Une identité caractérisant la forme additive est constatée à partir de cette dernière formule.

Pour faire apparaitre les quatre effets principaux par décomposition du changement total de l'efficacité exergétique, fonction des travaux accomplis (UW), soient les équations (11-17) :

$$U = \sum_{ij} U_{ij} = \sum_{ij} E \times \frac{E_i}{E} \times \frac{E_{ij}}{E_i} \times \frac{U_{ij}}{E_{ij}} \quad (11)$$

$$D_{tot} = \frac{U^T}{U^0} = D_{ex} \times D_{Str} \times D_{dil} \times D_{eff} \quad (12)$$

$$D_{ex} = \exp(\sum_{ij} \widehat{w}_{ij} \times \ln(\frac{X^T}{X^0})) \quad (13)$$

$$D_{Str} = \exp(\sum_{ij} \widehat{w}_{ij} \times \ln(\frac{S_i^T}{S_i^0})) \quad (14)$$

$$D_{dil} = \exp(\sum_{ij} \widehat{w}_{ij} \times \ln(\frac{L_{ij}^T}{L_{ij}^0})) \quad (15)$$

$$D_{eff} = \exp(\sum_{ij} \widehat{w}_{ij} \times \ln(\frac{F_{ij}^T}{F_{ij}^0})) \quad (16)$$

$$\widehat{W}_{ij} = \left(\frac{(U_{ij}^T - U_{ij}^0) / (\ln U_{ij}^T - \ln U_{ij}^0)}{(U^T - U^0) / (\ln U^T - \ln U^0)} \right) \quad (17)$$

4.3 Projection future de ressources primaires

Cette projection se divise en quatre parties :

4.3.1 Estimation de travaux accomplis (UW) requis

L'intensité de travaux accomplis est obtenue à partir du rapport entre les travaux accomplis obtenu par la première méthode et le PIB correspondant à l'année d'étude (2000-2014)[3]. Ces intensités sont ensuite projetées à l'horizon 2030. Le travail utile à l'horizon 2030 est obtenu en multipliant l'intensité par le PIB estimé à cette année[5]. Le coefficient de détermination R^2 exprime le rapport entre la valeur estimée (par une approximation analytique) et la valeur réelle. R^2 est défini par le rapport suivant [31][32]

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (18)$$

SSR : somme des carrés des régressions dont

$$SSR = \sum_i^N (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad (19)$$

Et SST : somme des carrés totaux dont

$$SSR = \sum_i^N (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (20)$$

4.3.2 Allocation de travail utile (UW) projeté à travers les sous-catégories :

Il faut d'abord effectuer l'allocation à travers les sous catégories avant d'obtenir les travaux accomplis au niveau de chaque classe principale.

4.3.3 Projection de l'efficacité exergetique par sous-catégorie

Deux scénarii sont tenus compte :

- Scénario constant : il consiste à maintenir jusqu'à 2030, la progression de 2007 à 2014.
- Scénario de déclin : il consiste à poursuivre jusqu'à 2030, la moitié de la valeur de la progression de 2007 à 2014.

4.3.4 Estimation de la demande en énergie primaire du 2015-2030

D'après l'équation (7), les ressources d'exergie primaire projetées sont déduites à partir de travaux accomplis «UW» et des coefficients exergetiques projetés. Les demandes en énergie primaire projetées découlent de la division de celles-là par les coefficients d'exergie chimiques [33].

5 RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.1 Méthode 1 : sorties de « Useful work accounting »

Les tableaux 1, 2 et 3 résument respectivement les travaux accomplis, les ressources en exergie primaire ainsi que l'efficacité exergetique des classes principales ainsi qu'au niveau national de l'année 2000 jusqu'à 2014. Ce qui est frappant sur les deux tableaux c'est que la classe principale "énergie électrique" occupe un pourcentage identique à "l'énergie mécanique" sur les ressources en exergies primaires alors qu'elle est largement inférieure sur la proportion dans les niveaux accomplis. Cela est dû principalement aux importantes pertes par rendement dans le domaine de l'électricité réunionnaise. A titre indicatif, elles sont de l'ordre de 375,1ktep en 2013 et 381,9 ktep en 2014[3]. Cet accroissement varie avec l'augmentation des ressources primaires.

Le tableau 3 présente le rapport entre les sorties du tableau 1 par celles du tableau 2.

L'efficacité exergetique de "l'énergie thermique" a connu une rapide croissance. En effet, le tableau 3 montre qu'elle a augmenté d'une part d'environ 1 % de 2004 (4.5%) en 2006 (5.4%) : l'usage du solaire thermique a décuplé de 6 à 10ktep ; d'autre part, un accroissement accéléré est constaté de l'année 2000 à 2014. Cela est dû essentiellement par le nombre d'unités cumulés d'équipements solaires posés passant de 17 185 à 136 188 [34].

Tableau 1 : Travaux accomplis de l'île de La Réunion de 2000-2014

UW analysis output	2000	2002	2004	2006	2008	2010	2012	2014
Classe principale	ktep (%)	ktep(%)	ktep(%)	ktep(%)	ktep(%)	ktep(%)	ktep(%)	ktep(%)
Travaux accomplis								
Thermique	3(3)	3(3)	5(4)	4(4)	4(4)	5(4)	6(4)	7(5)
Electrique	18(19)	21(22)	24(22)	26(23)	28(23)	31(23)	34(24)	36(24)
Mécanique	72(78)	71(75)	81(74)	82(73)	89 (73)	100 (73)	101(72)	108 (72)
Total	93(100)	95(100)	109(100)	113(100)	122(100)	136(100)	141(100)	150(100)

Tableau 2 : Ressources en exergie primaire de l'île de La Réunion de 2000-2014

Ressources en exergie primaire								
Thermique	75(7)	74(6)	84(7)	74(6)	73(5)	82(6)	83(6)	89(6)
Electrique	477(42)	506(44)	542(43)	571(45)	600(46)	627(44)	651(45)	667(45)
Mécanique	575(51)	571 (50)	630(50)	620 (49)	646 (49)	708 (50)	705 (49)	735 (49)
Total	1 126	1 151	1 256	1 266	1 319	1 418	1 439	1 491

Tableau 3 : Efficacités exergetiques de l'île de La Réunion de 2000-2014

Efficacité exergetique	2000	2002	2004	2006	2008	2010	2012	2014
Classe principale	%	%	%	%	%	%	%	%
Efficacité exergetique								
Thermique	4,1	4,5	5,4	5,5	6,0	6,5	7,0	7,9
Electrique	3,7	4,1	4,5	4,6	4,7	4,9	5,2	5,4
Mécanique	12,5	12,5	12,8	13,3	13,8	14,1	14,4	14,6
Total	8,2	8,3	8,7	8,9	9,2	9,6	9,8	10,1

La figure (1) représente la répartition des travaux accomplis en fonction des trois classes principales (thermique, électrique et mécanique).

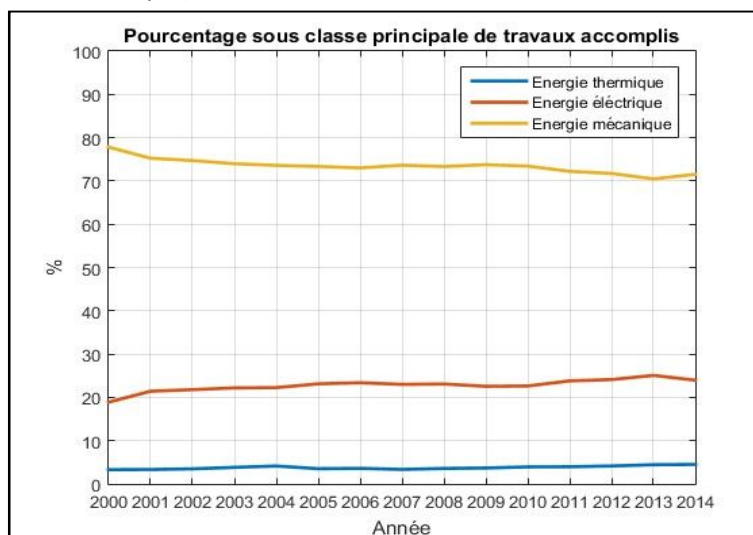


Figure 1: Répartition des travaux accomplis sous les classes principales

La figure 1. atteste que la classe « énergie mécanique » est décroissante au profit de la classe « énergie thermique » (5%) et la classe « énergie électrique » (20%). En effet, le confort thermique est devenu primordial. Il en est de même pour l'usage des appareils électro-ménagers vu que l'île est encore en transition énergétique.

Cette répartition, confrontée aux données de la Chine, est illustrée par la figure (2):

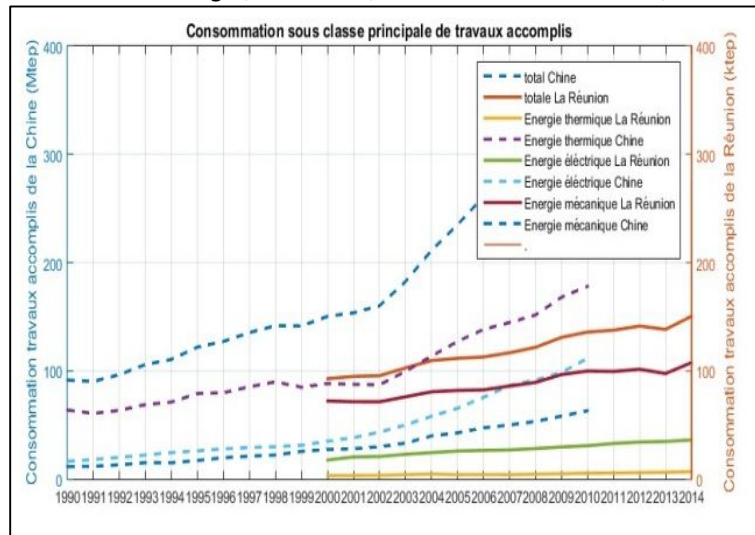


Figure 2 : Comparaison des travaux accomplis entre la Chine et La Réunion

Au niveau national, les travaux accomplis de l'île de La Réunion est de l'ordre 1/1000 par rapport à la Chine. En effet, l'économie actuelle de La Réunion est dominée par le secteur tertiaire (le tourisme et le transport) qui demande des travaux accomplis moins importants par rapport au secteur secondaire, base de l'économie de la Chine.

En comparaison avec les ressources en exergie primaire de la Chine, la figure (3) illustre les potentialités de l'île de La Réunion.

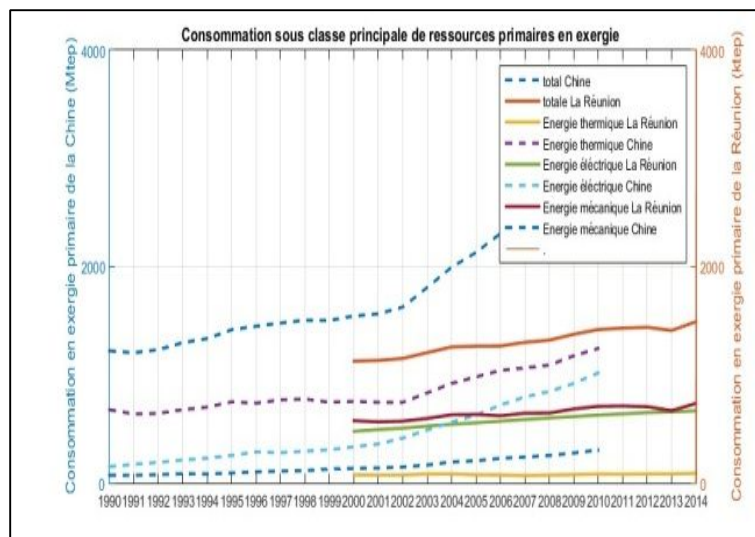


Figure 3 : Comparaison des ressources en exergie primaire de La Réunion et la Chine

Comparées à la consommation en exergie primaire de la Chine, celle de la Réunion est largement inférieure. D'une part, celle-ci importe la majeure partie, voire presque la totalité des énergies fossiles qu'elle utilise. La Chine se trouve à l'opposé de cette situation : elle dispose des ressources fossiles importantes. En 2012, elle est classée mondialement au 4^{me} rang pour sa production de pétrole après l'Arabie Saoudite, la Russie et les Etats-Unis, et au 1^{er} rang pour sa production de charbon sur une quantité de 3 549 Mt [35][36]. D'autre part, en ce qui concerne les énergies renouvelables, la Chine dépasse considérablement La Réunion en ressources en exergie primaire. En ne citant que les puissances mises à disposition par l'énergie hydraulique et éolienne, respectivement de 133,6MW et 14,8MW pour La Réunion, la Chine quant à elle, est classée 1^{er} rang mondial tant pour l'hydroélectricité en 2010 avec 194GW que pour l'éolien en 2011 62.7GW, soit 26 % du total mondial. Ce classement était fait par l'Agence International de l'Energie et Observ'ER en 2012[37]. A l'échelle nationale, la figure (4) montre l'évolution de l'efficacité exergétique de l'île de La Réunion et de la Chine.

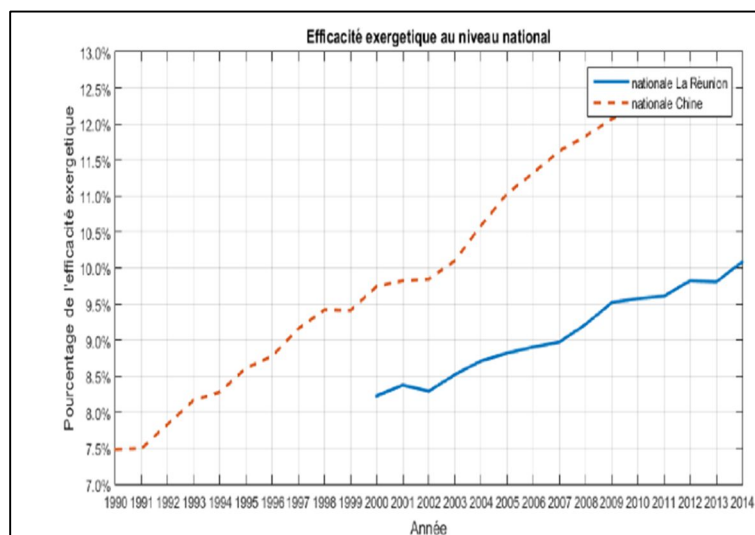


Figure 4 : Comparaison de l'efficacité exergetique de La Réunion et la Chine

La figure (4) nous informe que, sur le plan efficacité exergetique, l'île de La Réunion présente un retard de 11 ans par rapport à la Chine (9.5 % entre 2002 et 2003). L'efficacité exergetique de La Réunion a fortement augmenté de 8% à 10% pendant 15ans. Cette évolution est comparable au cas de la Chine dont il a fallu 40 ans pour passer de 5% à 12%. En effet, pour la Chine, ce développement accéléré de l'efficacité exergetique est dû principalement par le changement de structure. Ce changement de structure est constaté non seulement au niveau de la classe principale mais aussi au niveau des sous-catégories de ces classes[5]. Quant à La Réunion, cet accroissement rapide est dû au fait qu'elle n'a pas longtemps utilisé des ressources fossiles avant de basculer aux ressources renouvelables, ressources actuellement utilisées par les pays développés[3].

5.2 Méthode 2 : décomposition par la méthode LMDI I sous forme multiplicative

Pour le cas de La Réunion, sur la base de données de l'année 2000, les principaux effets sont résumés par la figure (5) :

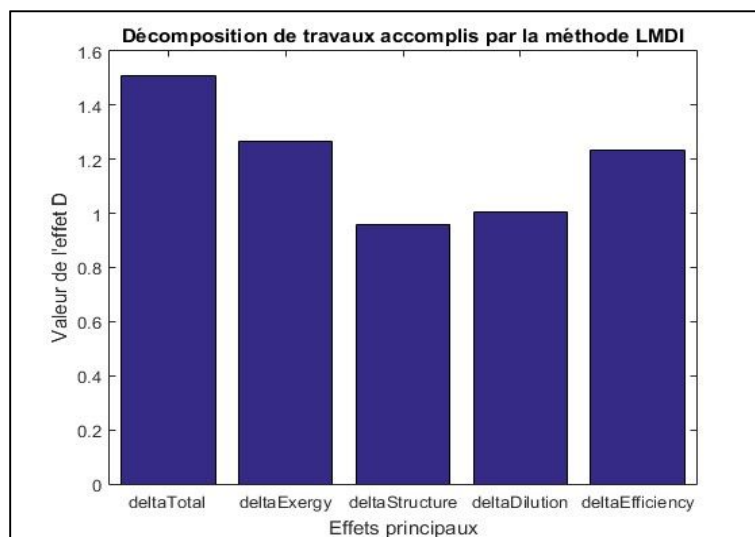


Figure 5 : Distinction des effets prépondérants par décomposition de travaux accomplis

Sur la base de l'année 2000, les travaux accomplis pour l'année 2014 ont augmenté de 1,51 fois. Cette augmentation est due principalement à l'accroissement de 1,23 fois de l'efficacité exergetique. Les ressources en exergie primaire sont aussi influentes. La structure, quant à elle, est moins influente, que ce soit pour la classe principale que pour les sous catégories. Cependant, pour le cas de la Chine, c'est sa structure générale (1,66)[5] qui a contribué à l'accroissement de ses travaux accomplis par rapport au changement dû par l'efficacité exergetique.

Comme deltaDilution est au voisinage de l'unité (1,0059), La Réunion est en plein évolution technologique. Il est à noter que ses investissements peuvent encore influencer considérablement deltaTotal, contrairement aux US avec un deltaDilution strictement inférieur à 1 [4] [38][39].

Comparée au cas de la Chine dont "deltaExergy" a augmenté de 9 fois sur une durée de 40 ans (1970-2010) [5], l'île de La Réunion quant à elle a un "deltaExergy" accru de 1,27 fois sur une durée de 15 ans (2000-2014). Cela reflète le contraste en ressources primaires de ces deux pays.

5.3 Méthode 3 : projection future des ressources en energie primaire

5.3.1 Etape 1

L'étape 1 consiste d'abord à projeter l'intensité des travaux accomplis défini par :

$$\text{Intensité des travaux accomplis} = \frac{\text{Travaux accomplis}}{\text{PIB}} \quad (21)$$

Les valeurs de Produit Intérieur Brut (PIB) sont évaluées en millions d'euros constant de 2000 [40]. Le modèle de projection adopté est la fonction puissance :

$$y = ax^b \quad (22)$$

Ce modèle donne une approximation plus adéquate au contexte de l'intensité énergétique car il présente une courbe asymptotique horizontale. En effet, quand le pays devient très développé, son économie sera stabilisée. Il en est de même pour ses travaux accomplis. Le rapport entre ces deux grandeurs tend par conséquent vers une valeur constante, ce qui explique l'asymptote horizontal.

La détermination des coefficients du modèle (22) est effectuée en minimisant l'écart entre les valeurs réelles et les valeurs estimées. Elle est exécutée par résolution locale.

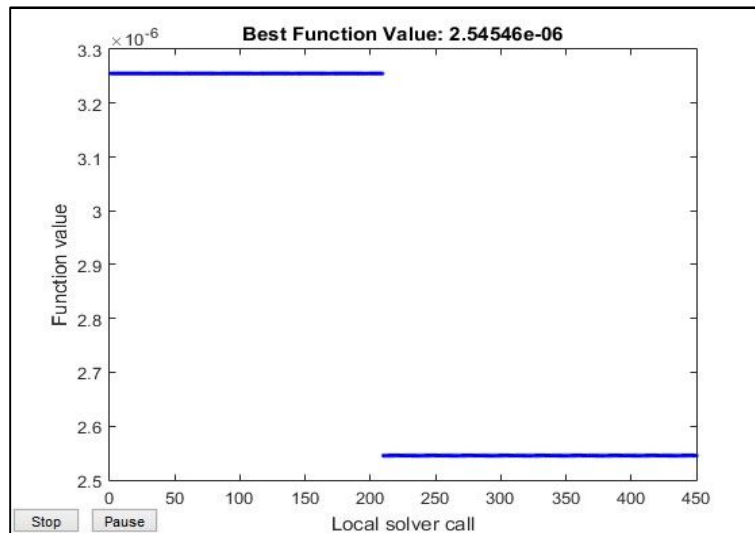


Figure 6 : Recherche des coefficients a et b du modèle adopté

Les résultats de régression non linéaire multi variable ont permis d'obtenir les valeurs des coefficients de l'équation (22), a=246,8248 et b=-1.3302. Après calcul, le coefficient de détermination R^2 , défini par les équations (18-20) devient 0,9694. Le modèle répond à la condition de l'équation (23) qui est :

$$0,9 \leq R^2 \leq 1 \quad (23)$$

Les travaux accomplis projetés sont fonction de la courbe de tendance ainsi que des projections de PIB. La figure(7) illustre la projection des intensités de travaux accomplis.

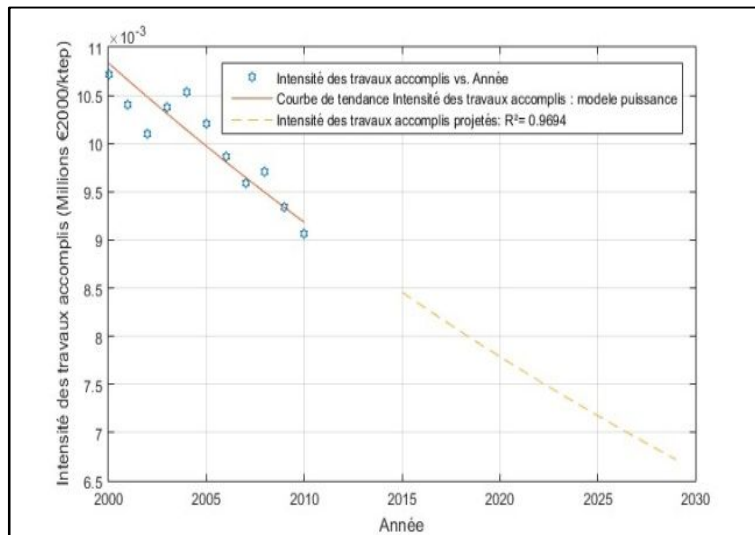


Figure 7 : Extrapolation de l'intensité de travaux accomplis

Comme l'économie croît au cours du temps, les travaux accomplis augmentent. En effet, il y a une relation étroite reliant les travaux accomplis du PIB. Ceux-ci sont des facteurs de production plus efficaces par rapport aux ressources primaires pour expliquer la croissance économique [40][41].

Comparés aux travaux accomplis projetés de la Chine[5] de 2015 à 2030 variant de 38 %, ceux de La Réunion ont augmenté de 14 %. En effet, les deux pays sont sous deux circonstances différentes. A l'horizon 2030, le premier est estimé à être première puissance économique mondiale, tandis que la seconde est le pays pionnier à l'autosuffisance de production électrique.

Comme le montre la figure (8), l'évolution des travaux accomplis au niveau national est proche du linéaire.

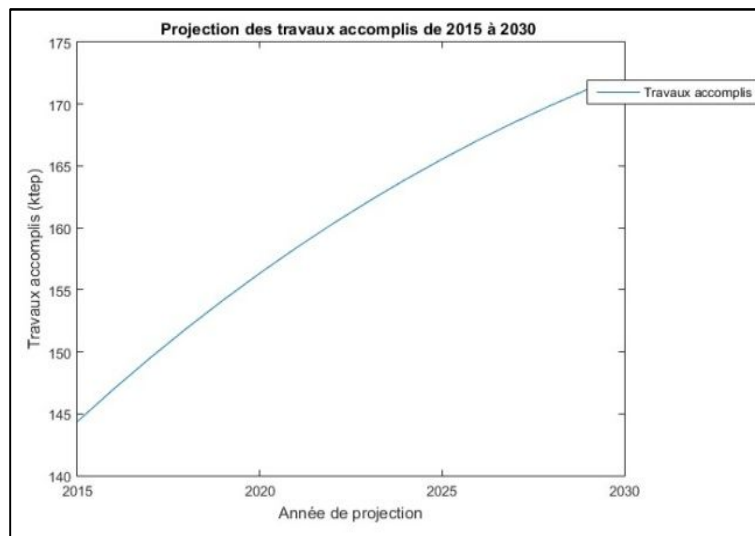


Figure 8 : Projection des travaux accomplis jusqu'à 2030

5.3.2 Etape 2 :

La répartition des travaux accomplis au niveau des sous-catégories a été effectuée avant d'obtenir la répartition au niveau des classes principales comme le montre la figure (9).

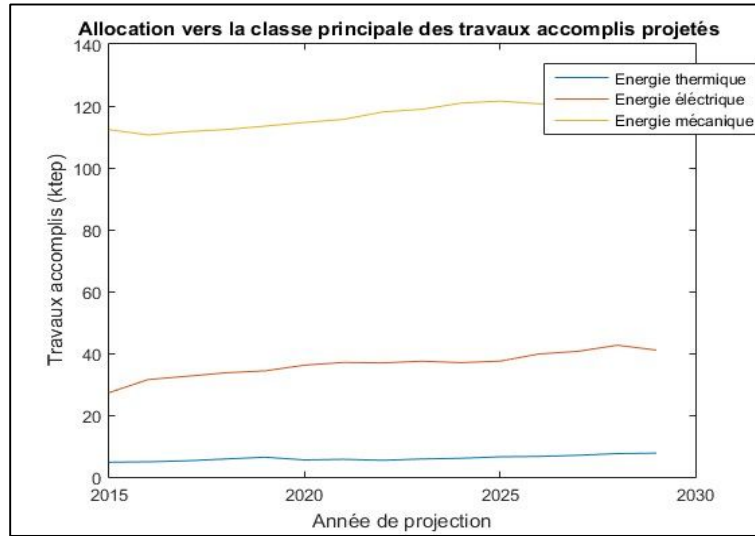


Figure 9 : Allocation des travaux accomplis au niveau de la classe principale

La figure (9) montre que l'énergie mécanique augmente considérablement par rapport aux autres formes d'énergie. Pour le présent cas, la phase de transition énergétique est donc importante dans le cadre de l'énergie mécanique.

5.3.3 Etape 3 :

Deux scénarii constituent cette étape. La figure (10) représente les résultats de l'efficacité exergetique au niveau des classes principales.

En juxtaposant les résultats du scénario constant et du scénario déclin, la courbe enveloppe est obtenue. Ce sont les linéaires qui limitent tous les scénarii possibles.

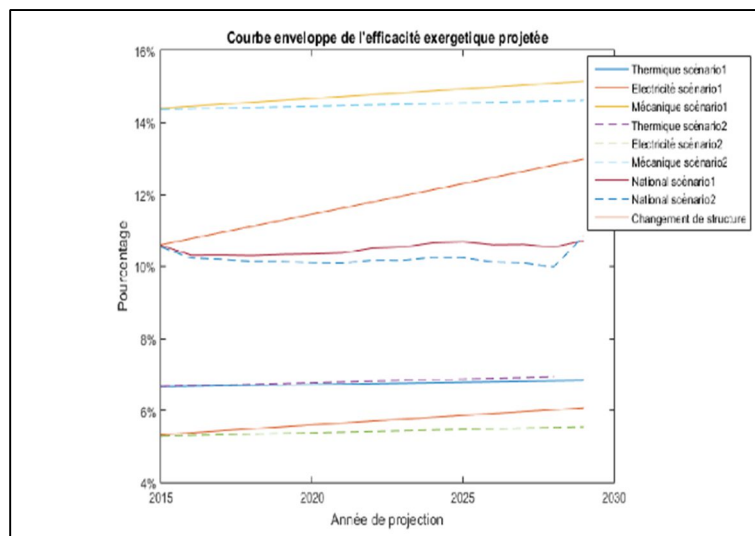


Figure 10 : Courbe enveloppe de l'efficacité exergetique

L'efficacité exergetique au niveau national à l'horizon 2030 atteint donc 10%. Sous un changement de structure, cette efficacité aboutit à la valeur de 12%. Il nécessite donc d'effectuer ce changement pour rehausser cette efficacité exergetique.

5.3.4 Etape 4 :

Les ressources en exergetie primaire projetées sont déduites des travaux accomplis projetés ainsi que des efficacités projetées au niveau des sous-catégories. La figure (11) illustre les résultats sous le scénario déclin et le scénario constant

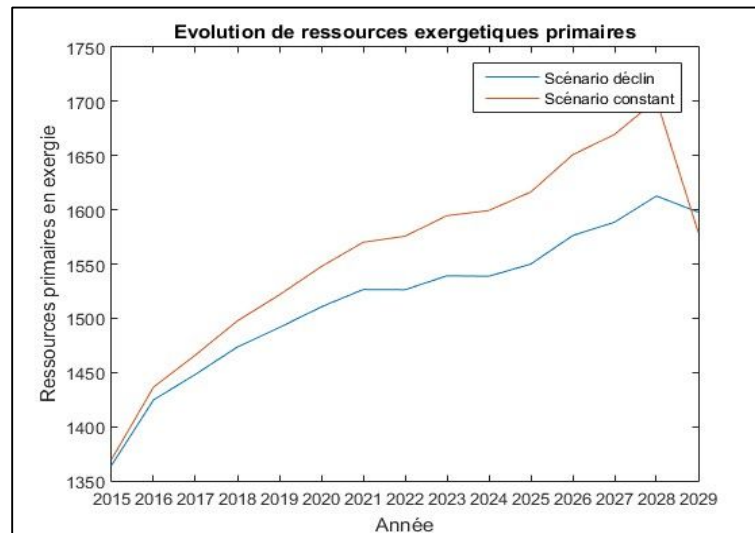


Figure 11 : Evolution de ressources en exergie primaire projetées sous les deux scénarii

Tant pour le scénario constant que pour le scénario déclin, les ressources en exergie primaires augmentent brusquement, de 2015 à 2020, de 1620 à 1700. En effet, l'île de La Réunion s'est fixée d'atteindre la moitié de l'indépendance énergétique à cet horizon 2020 [5]. Cela nécessite donc l'utilisation massive de nouvelles sources d'énergie, surtout dans le domaine des énergies renouvelables.

En divisant les ressources en exergie primaire par les coefficients d'exergie chimique, les ressources en énergie primaires projetées sont enfin acquises.

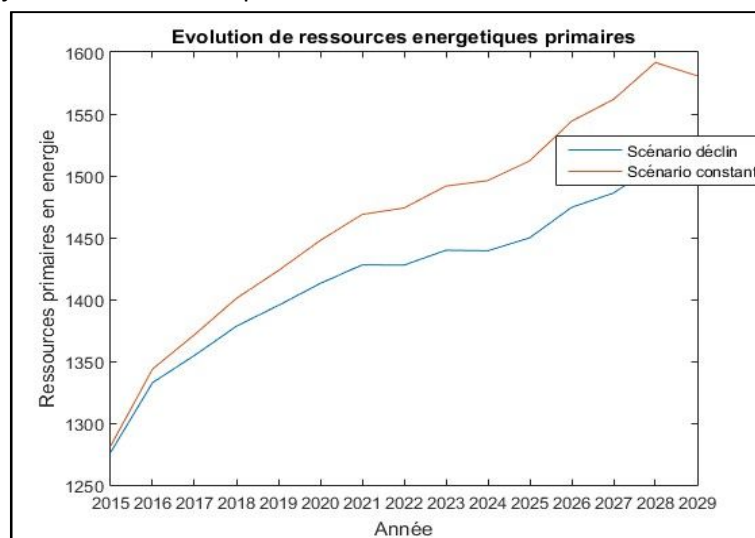


Figure 12 : Evolution de ressources en énergie primaire projetées sous les deux scénarii

Les ressources en énergie primaire à l'horizon 2030 sont comprises dans l'intervalle 1530 et 1575 ktep. Sur la figure (12), la courbe a régressé en 2029 vue que la transition de l'économie, de la population et donc de la demande de l'énergie primaire ont donc été achevées.

5.4 Suggestions

5.4.1 Politique d'amélioration :

1- **Inciter la cogénération de l'énergie thermique et l'énergie électrique :**

Même si l'électricité est une forme d'énergie noble, il est inefficace, thermodynamiquement, de générer de l'électricité dans le seul but de transformer ce dernier en énergie thermique.

La sucrerie, seule grande industrie réunionnaise, engendre à titre de coproduit de la bagasse. Or celle-ci permet de produire à la fois l'électricité et l'énergie thermique. Une partie de la combustion de la bagasse peut faire tourner une turbine tandis qu'une autre, additionnée avec du charbon peut assurer le fonctionnement d'une industrie.

2- Restructuration des classes principales :

Il a été récemment constaté par la méthode de décomposition (LMDI) que la structure de la classe principale n'a pas encore d'influence considérable sur l'évolution des travaux accomplis durant ces 14 dernières années. Il convient donc d'y apporter quelques modifications.

Bien que négligé par tout un chacun, les travaux usant l'énergie musculaire sont très énergivores. Il convient donc de les diminuer au profit de ceux usant d'autres formes d'énergie. A l'instar de la Chine, La Réunion peut également réduire autant que possible l'usage de l'énergie musculaire au profit de l'énergie mécanique. Une autre solution pour assurer l'indépendance énergétique à l'horizon 2030 est de diminuer les sources consommatrices d'énergie fossile en substituant les transports terrestres individuels en transports en commun électrifiés. Cette alternative est plus facile à entreprendre et plus efficace afin de réduire la consommation énergétique. En effet, en 2014, 70% de dépense énergétique dans le transport sont au niveau routier[3].

Le projet « de réseaux de tramway pour relier la région Ouest à la région Nord » de l'île [42] est un exemple typique. Même s'il présente un coût élevé, il permet d'éviter les nuisances sonores et les stress dus aux embouteillages. Il réduit également les émissions de gaz à effet de serre dû au transport.

3- Augmenter les ressources en exergie primaire

La méthode LMDI nous a montré que pour le cas de La Réunion, les ressources en exergie primaire influence moins sur l'évolution des travaux accomplis que l'efficacité énergétique. L'augmentation de ces ressources est donc capitale.

La première ressource permanente et en abondance est le Soleil. « L'ensoleillement annuel est de l'ordre de 1400 -2500h et peut atteindre la valeur de 2900h dans les altitudes inférieures à 400m » [42]. Dans ce cadre, l'utilisation de l'énergie thermique par solaire est vivement conseillée.

D'une part, le solaire photovoltaïque, transformation directe de l'énergie du soleil en électricité, est très avantageux. En effet, il a produit 235,9 GWh en 2014 [3].

D'autre part, le chauffe-eau solaire convient parfaitement à la situation locale de l'île. « L'ensemble des installations solaire thermique en 2014 a permis d'éviter la consommation 227,3 GWh d'électricité.

Le solaire thermique poursuit sa croissance avec 23 000 m² de capteurs solaires posés en 2014 soit 2 , 4 % de moins qu'en 2013 » [3]

Enfin, par son potentiel insulaire, l'exploitation de l'énergie thermique, marémotrice et houlomotrice de l'océan est préconisée.

Selon le Plan Régional pour les Energies Renouvelables et l'Utilisation Régionale de l'Energie (PRERURE) pour l'année 2030, l'énergie solaire occupe 27 % du nouveau mix énergétique de La Réunion, l'énergie thermique océanique 12% et l'énergie éolienne 9% [3] .

6 ETUDE DE RENTABILITE ET ANALYSE D'IMPACT SOCIO-ENVIRONNEMENTAL

Pour le présent projet, les critères de rentabilité (annexe 3) pris en compte sur la durée de 15 ans (2016 - 2030) sont :

- la Valeur Actualisée Nette (VAN) ;
- le Taux de Rentabilité Interne (TRI) ;
- le Délai de Récupération des Capitaux Investis (DRCI).

La simulation a été effectuée sous le logiciel GEMIS [43].

En supposant que l'île continue d'utiliser les technologies de pointe, les processus de conversion d'énergie considérés sont de type générique. Dans le premier scénario, le processus « windfarm-big-generic » est considéré. Il est à noter que les travaux d'entretien sont comptabilisés dans les dépenses. Les résultats de calcul sont récapitulés par le tableau ci-après :

Tableau 4 : Etude de cas : scénario 1

VAN (€)	TRI(%)	DRCI	GES évitée(g éqCO ₂)
593 634 329,67	13,7	-	3 379 194 722,14

Le capital investi n'est pas récupéré pendant la durée de vie du projet. D'une part, même si l'émission de gaz à effet de serre évitée et la création d'emploi sont importantes, les nuisances sonores et visuelles sont graves.

Celles-ci sont dues à l'étroitesse de la superficie disponible de l'île qui est principalement occupée par les reliefs montagneux. A titre d'effets nocifs du bruit, il y a les troubles cardio-respiratoires [44]. D'autre part, La Réunion subit annuellement des dégâts cycloniques importants. Les fermes éoliennes ne peuvent être érigées en abondance puisqu'il faut les démonter avant la période cyclonique. C'est le cas des deux fermes éoliennes de la côte Nord et Sud de l'île [45]. Il est également possible d'opter pour des constructions qui résistent aux ravages cycloniques. Cela coûte plus cher que le précédent cas.

Pour le second scénario, le processus « solar trough ISCCS generic » fournit le tableau suivant :

Tableau 5 : Etude de cas : scénario 2

VAN (€)	TRI(%)	DRCI	GES évité (g éqCO ₂)
-38 286 439,41	5.7	-	3 305 923 396,14

Les critères de rentabilité affirment que le projet n'est pas rentable.

Pour le scénario suivant, sous le processus « geothermal st big generic » en tenant compte des entretiens importants, le tableau suivant récapitule les résultats :

Tableau 6 : Etude de cas : scénario 3

VAN (€)	TRI(%)	DRCI	GES évité (g éqCO ₂)
313 141 686,76	15,9	8 ans 9 mois 5 jours	2 017 531 155,18

Non seulement ce scénario satisfait les critères de rentabilité mais aussi il diminue considérablement l'émission annuelle de GES. Même si La Réunion possède un grand potentiel en matière de géothermie à cause de ses sites volcaniques, l'UNESCO et la population locale protestent contre tout investissement dans le domaine. En effet, l'île est listée comme héritage mondial de l'UNESCO grâce à son paysage spectaculaire qui contribue à la conservation de la biodiversité [42]. Quant aux Réunionnais, ils craignent la pollution de l'air. En respectant l'intervention forestière et marine dans une surface de 1 km²[46], et en tenant compte de la surface terrestre disponible (le tiers de l'île), le scénario hybride considérant à la fois l'énergie solaire, éolienne, hydraulique et l'énergie thermique océanique est proposé. Ce scénario répond à 70% de la demande en énergie de l'île à l'horizon 2030. Les 30% restants, quant à eux, sont assurés par la bagasse, l'énergie houlomotrice et marémotrice ainsi que le biogaz. L'étude de rentabilité est présentée par le tableau 7

Tableau 7 : Etude de cas : scénario 4

VAN (€)	TRI(%)	DRCI	GES évité (g éqCO ₂)
313 141 686,76	15,9	8 ans 9 mois 5 jours	3 067 974 697,73

Ce tableau affirme que le projet est rentable et le capital investi est récupéré avant la fin du projet. Ce projet permet d'éviter d'importantes émissions de GES, de l'ordre de 3 millions de tonnes. La création d'emplois directs et indirects est également tangible.

A cet effet, ce scénario consiste à installer 18 ISCCS, 142 grandes fermes éoliennes, 4 barrages hydroélectriques de taille moyenne et 8 grandes industries utilisant les ressources géothermiques océaniques. La répartition de ces installations nécessite une étude minutieuse puisqu'il y a des règlements pour préserver l'environnement au cours d'une transition énergétique [47]. En effet, le respect de l'environnement est actuellement important non seulement pour la conservation de la biodiversité locale mais aussi et surtout pour garder l'équilibre de biome afin de diminuer les effets dus au changement climatique mondial.

7 CONCLUSION

Pour assurer la maîtrise énergétique de l'île de La Réunion à l'horizon 2030, une analyse exergétique de l'île a été effectuée. L'évolution de l'efficacité exergétique durant les 14 dernières années varie de 8 à 10%, plaçant La Réunion à un retard de 11 ans par rapport à la Chine (10,1% en 2003).

Pour la présente étude, la méthode de décomposition LMDI I a été choisie. La méthode LMDI I est une méthode performante par sa faculté de parfaire la décomposition. Sa formulation de la fonction poids est simple. Cette méthode est également cohérente et elle est apte à manipuler les valeurs nulles.

Pour l'année 2014, elle a permis de déduire que, par rapport à l'année 2000, l'augmentation de 1,3 fois de l'efficacité est la cause principale de l'accroissement de 1,5 fois des travaux accomplis.

Pour la projection des ressources primaires nécessaires en 2030, il convient d'utiliser les travaux accomplis au détriment des ressources en énergie finale. En effet, ceux-ci expliquent mieux la croissance économique. Les ressources en énergie primaire à l'horizon 2030, ainsi obtenues, sont estimées dans l'intervalle 1530 à 1575 ktep.

En tenant compte des effets obtenus par la méthode LMDI et les potentialités locales, plusieurs scénarii d'étude sont envisagés pour assurer cette indépendance énergétique.

Le scénario optimal est l'utilisation hybride d'énergies renouvelables, à savoir l'éolien, le solaire, la thermique océanique et l'hydraulique. Ce projet hybride aboutit à l'indépendance énergétique de La Réunion car non seulement il soutient la croissance économique, mais aussi il favorise l'équité sociale et surtout il contribue à la reproductibilité écologique. D'où sa participation au développement durable de l'île.

Enfin, la méthode de décomposition LMDI ne s'applique pas seulement au domaine énergétique mais également au niveau de l'environnement. [48], notamment à l'émission de gaz carbonique[49] [50]

Références bibliographiques

- [1] "Plan régional des énergies renouvelables et d'utilisation rationnelle de l'énergie," 2000.
- [2] *Bilan énergétique de la réunion 2013*, 2014th ed. .
- [3] *Bilan énergétique de la réunion 2014*, 2015th ed. .
- [4] P. E. B. J. R. B. T. J. F. J. K. Steinberg, "Divergence and trends in US and UK aggregate exergy efficiencies," 2014.
- [5] P. E. Brockway, J. K. Steinberger, J. R. Barrett, and T. J. Foxon, "Understanding China's past and future energy demand : An exergy efficiency and decomposition analysis," *Appl. Energy*, vol. 155, pp. 892–903, 2015.
- [6] B. W. H. S. Robert, "Long term trends in resource exergy consumption and useful work supplies in the UK 1900-2000." .
- [7] M. B. Reinsdorf, "Divisia indexes and the representative consumer problem," 1998.
- [8] Spiegel, "Theory and problems of advanced calculus," *Stat. J.*, pp. 121–126, 1963.
- [9] B. . W. . A. and K.-H. Choi, "Decomposition of Aggregate Energy and Gas Emission Intensities for Industry : A Refined Divisia Index Method," *Energy J.*, vol. 18, no. 3, pp. 59–73, 1997.
- [10] B. W. Ang, F. Q. Zhang, and K. Choi, "Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition," *Energy*, vol. 23, no. 6, pp. 489–495, 1998.
- [11] B. W. Ang, "Decomposition analysis for policymaking in energy : which is the preferred method ?," *Elsevier*, vol. 32, pp. 1131–1139, 2004.
- [12] A. B. W. L. F. L. Chung, "Index numbers and Fisher ideal index approach in energy decomposition analysis," 2002.
- [13] B. W. Ang, H. C. Huang, and A. R. Mu, "Properties and linkages of some index decomposition analysis methods," *Energy Policy*, vol. 37, no. 11, pp. 4624–4632, 2009.
- [14] P. E. B. J. K. S. J. R. B. T. Foxon, "Understanding China's past and future energy demand: an exergy efficiency and decomposition analysis," *Appl. Energy*, pp. 892–903, 2015.
- [15] W. B. A. R. E. N. K. F. S. H., "Energy use and economic development: a comparative analysis of useful work supply in Australia, Japan, the United Kingdom and the US during 100 years of economic growth," *Ecol. Econ.*, vol. 69, no. 10, pp. 1904–1917, 2010.
- [16] I. Decomposition, "Decomposition of industrial energy consumption," *Energy Econ.*, vol. 16, no. 3, pp. 163–174, 1994.
- [17] B. W. Ang, "Is the energy intensity a less useful indicator than the carbon factor in the study of climate change ?," *Energy Policy*, vol. 27, pp. 943–946, 1999.
- [18] A. B. W., "Decomposition of aggregate energy intensity changes in two measures: ratio and difference," *Energy Econ.*, vol. 25, pp. 615–624, 2003.

- [19] B. W. Ang and F. Q. Zhang, "A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies," *Energy*, vol. 25, pp. 1149–1176, 2000.
- [20] B. W. Ang, "A Simple Guide to LMDI Decomposition Analysis," 2012.
- [21] "Decomposition methodology in energy demand and environmental analysis," in *Handbook of environmental and resource economics*, 1999, pp. 1165–1179.
- [22] N. Mairet and F. Decellas, "Determinants of energy demand in the French service sector : A decomposition analysis," *Energy Policy*, vol. 37, pp. 2734–2744, 2009.
- [23] E. T. N. Strachan, "Nearly perfect and poles apart : investment strategies into the UK power system until 2050," 2013.
- [24] F. Chen, N. Duic, L. M. Alves, and M. Grac, "Renewislands — Renewable energy solutions for islands," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, pp. 1888–1902, 2007.
- [25] E. Hatzigeorgiou, H. Polatidis, and D. Haralambopoulos, "CO2 emissions in Greece for 1990 – 2002 : A decomposition analysis and comparison of results using the Arithmetic Mean Divisia Index and Logarithmic Mean Divisia Index techniques," *Elsevier*, vol. 33, pp. 492–499, 2008.
- [26] K. Choi and B. W. Ang, "Attribution of changes in Divisia real energy intensity index — An extension to index decomposition analysis," *Energy Econ.*, vol. 34, no. 1, pp. 171–176, 2012.
- [27] N. Liu and B. W. Ang, "Factors shaping aggregate energy intensity trend for industry : Energy intensity versus product mix," *Elsevier*, vol. 29, pp. 609–635, 2007.
- [28] E. De Cian, M. Schymura, E. Verdolini, and S. Voigt, "Energy Intensity Developments in 40 Major Economies : Structural Change or Technology Improvement ? Energy Intensity Developments in 40 Major Economies : Structural Change or Technology Improvement ?"
- [29] B. W. Ang and Na Liu, "Handling zero values in the logarithmic mean Divisia index decomposition approach," *Elsevier*, vol. 35, pp. 238–246, 2007.
- [30] B. W. Ang, "The LMDI approach to decomposition analysis : a practical guide," *Energy Policy*, vol. 33, pp. 867–871, 2005.
- [31] Saeed; Sopian; Abidin, "Study of the two term exponential model and drying parameters," *Agric. Eng. Int.*, 2008.
- [32] S. S. Abidin, "Mathematical modeling and drying experiments," *Agric. Eng. Int.*, 2008.
- [33] J. Szargut, "Chemical Exergies of the Elements," *Appl. Energy*, vol. 32, pp. 269–286, 1989.
- [34] P. Solaire, "Electricité de France," 2011.
- [35] IEA, "Country analysis brief in China," 2012.
- [36] IEA, "Energy statistics," 2013.
- [37] *14ème inventaire de la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde, Chapitre 2.* 2012.
- [38] W. E. W. B. ; A. R. U, "Efficient dilution: Long term exergy conversion trends in Japan," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 42, no. 13, pp. 4964–4970, 2008.
- [39] J. Goldemberg, "Leapfrog energy technologies," *Energy Policy*, vol. 26, no. 10, pp. 729–741, 1998.
- [40] W. B. S. ; A. R. U, "Evidence of causality between the quantity and quality of energy consumption and economic growth," *Elsevier*, vol. 35, no. 4, pp. 1688–1693, 2010.
- [41] G. Z. S. T. D. T, "An approach for a better evaluation of energy efficiency trends using index decomposition analysis and useful work accounting," *Energy Econ.*, 2014.
- [42] J. P. P. M. D. F. S. D. M. O. Marc, "Progressing towards a net zero energy island, the case of Réunion island," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, pp. 426–442, 2012.
- [43] I. I. for S. A. and S. (IINAS), "Global Emissions Model for Integrated Systems (Gemis) 4.9.3." 2015.
- [44] *Artisans de l'environnement.* 1998.
- [45] V. SA, "VERGNET GROUPE." .
- [46] "Legifrance." [Online]. Available: www.legifrance.gouv.fr.
- [47] "LOI n 2015-992 du 17 août 2015." [Online]. Available: www.legifrance.gouv.fr.
- [48] B. W. Ang, F. L. Liu, and E. P. Chew, "Perfect decomposition techniques in energy and environmental analysis," *Elsevier*, vol. 31, pp. 1561–1566, 2003.
- [49] L. Charlita, D. Freitas, and S. Kaneko, "Decomposition of CO2 emissions change from energy consumption in Brazil : Challenges and policy implications," *Energy Policy*, vol. 39, no. 3, pp. 1495–1504, 2011.
- [50] OECD/IEA, "Drivers of change in energy demand and CO2 emissions," 2012.