

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix – Travail – Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

CENTRE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE EN
SCIENCES, TECHNOLOGIE ET
GEOSCIENCES

Laboratoire d'Énergie et des Systèmes
Électriques et Électroniques



REPUBLIC OF CAMEROUN

Peace – Work – Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I
FACULTY OF SCIENCE
DEPARTMENT OF PHYSICS

POSTGRADUATE SCHOOL OF
SCIENCE, TECHNOLOGY AND
GEOSCIENCES

**CONTRIBUTION A L'ANALYSE ENERGETIQUE
ET EXERGETIQUE DE CERTAINS SECTEURS
D'ACTIVITES AU CAMEROUN**

Thèse rédigée et présentée en vue de l'obtention du
Doctorat / PhD en Physique

Par : **TALLA KONCHOU Franck Armel**
Master of Sciences

Sous la direction de
Pr. TCHINDA René

Année Académique : 2018





DEPARTEMENT DE PHYSIQUE
DEPARTMENT OF PHYSICS

ATTESTATION DE CORRECTION DE LA THESE DE
DOCTORAT/Ph.D

Nous, Professeur **KOFANE Timoléon Crépin**, Professeur **KENNE Godpromesse**, et Professeur **BEGUIDE BONOMA**, respectivement président du jury et examinateurs de la thèse de Doctorat Ph.D de Monsieur **TALLA KONCHOU Franck Armel**, matricule **09W1272**, préparée sous la Direction du Professeur **TCHINDA René** intitulée : « **Contribution à l'analyse énergétique et exergetique de certains secteurs d'activités au Cameroun** », soutenue le **vendredi 06 avril 2018**, en vue de l'obtention du grade de Docteur Ph.D en Physique spécialité **Energie des Systèmes Electriques et Electroniques**, option **Energie et Environnement**, attestons que toute les corrections demandées par le jury de soutenance ont été effectuées.

En foi de, la présente attestation lui est délivrée pour servir et valoir ce que de droit.

Fait à Yaoundé le **03 SEPT 2018**

EXAMINATEUR

Pr. KENNE Godpromesse

EXAMINATEUR

Pr. BEGUIDE BONOMA

LE PRESIDENT DU JURY

Pr. KOANE Timoléon Crépin

LE CHEF DE DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



Pr. NDJAKA Jean Marie



DEDICACE

Je dédie ce travail à :

*- Mon feu PAPA M. TALLA
Bernard*

*- Ma maman Mme TALLA
Thérèse*

REMERCIEMENTS

La réalisation d'un projet de thèse et d'une thèse est le fruit des multiples discussions et réflexions scientifiques et techniques. Ce travail a été mené simultanément au sein de deux laboratoires le LATEE (Laboratoire d'Analyse des Technologies de l'Energie et de l'Environnement) de l'Université de Yaounde I, et le LISIE (Laboratoire d'Ingénieries des Systèmes Industriels et Environnement) de l'Institut Universitaire de Technologie Fotso – Victor de Bandjoun, Université de Dschang. Pour cela, sa réalisation n'est que possible uniquement dans un cadre de travail matériel et intellectuel favorable.

C'est pourquoi, je tiens de prime abord à remercier le Professeur TCHINDA René, mon Directeur de thèse, qui a à la fois assuré d'excellentes conditions de travail ainsi qu'une très bonne orientation de mes travaux.

J'adresse également mes plus vifs remerciements au Docteur ALOYEM KAZE Claude Vidal, qui de par sa rigueur, sa détermination et ses multiples conseils, a été d'une aide incommensurable dans la réalisation de ce travail. Qu'il trouve ici, l'expression de ma profonde gratitude pour m'avoir apporté son expérience.

Ma gratitude va également à l'endroit du Professeur NJOMO Donatien, qui de par son abnégation et sa détermination, ne ménage aucun effort dans la formation des étudiants à lui confiés dans le laboratoire LATEE.

J'exprime aussi toute ma gratitude au Professeur BEGUIDE BONOMA et au Docteur OBOUNOU Marcel qui n'ont jamais manqué de me prodiguer des conseils dans l'élaboration de mes travaux depuis mon admission en Master.

Mes remerciements vont également à l'endroit des membres du Jury qui, se sont rendu disponible afin de rehausser l'éclat de ce travail.

Je remercie également les enseignants du Département de Physique, et plus spécialement ceux du Laboratoire d'Analyse des Techniques de l'Energie et de l'Environnement (LATEE), qu'ils trouvent ici l'expression d'un étudiant fier de sa formation.

L'expression de ma gratitude va également au Professeur TCHUEN Gislain, Professeur KENNE Godpromesse et à l'équipe du LISIE de par leurs remarques critiques et conseils ont participé à la réalisation de ce travail.

Toute ma gratitude va aussi à l'endroit de mes camarades du LATEE qui ont participé de près ou de loin dans l'étude de ce travail. Je pense ainsi à GOPDJIM Prospère, DELI GORON, PAHANE Denis, ISSOKOLO Rémy.

Mes remerciements vont également à l'endroit de mes frères et sœurs Mme TALA Annick, TALLA Christian, TALLA Paulin, TALLA Vanessa, TALLA Alex, TALLA Ange qui, de par leurs encouragements et multiples conseils, n'ont cessé de m'épauler aussi bien que financièrement que moralement.

Je tiens tout aussi à remercier Mr et Mme TALA, TAMBO Yves Roméo, Mme WAFEU Grâce, Mme NOUYADJE Hélène, M. et Mme TAGNE Richard, qui ont été un grand appui pendant mon cursus depuis le secondaire. Que la générosité de leur cœur soit remerciée et gratifiée en abondance par le Seigneur.

Mes remerciements vont également à l'endroit du Dr. DJADEU Colette, M. BINYOU – BI Marius et à M. KOUEGOU Boris pour leurs encouragements multiples à mon endroit.

Ma gratitude va également envers tous les membres de la chorale Saint Charles LWANGA, qui étant ma seconde famille, me procurent joie et bonheur à tout moment.

Je ne pourrais finir sans rendre grâce au Seigneur tout puissant qui a toujours veillé sur moi jusqu'à ce jour, et que sa volonté s'accomplisse toujours en tout lieu et à tout temps.

RESUME

La possession et la bonne gestion de l'énergie sont de nos jours des facteurs clés au développement. Cette recherche du bien-être et des meilleures conditions de vie pousse les pays dans la recherche des moyens pouvant les mener non seulement à un approvisionnement inépuisable en énergie, mais aussi à une gestion optimale (efficace) de cette dernière. Plusieurs approches ont été mises sur pied pour la gestion et l'optimisation de l'utilisation de l'énergie. Parmi les méthodes développées à cet effet, l'analyse exergétique semble être la meilleure.

Le Cameroun, pays de l'Afrique centrale situé entre le 2^{ème} et le 13^{ème} degré de latitude Nord et entre le 9^{ème} et le 16^{ème} degré de longitude Est, n'est pas en marge de cette politique. De part sa diversité culturelle, ethnique et énergétique, il est considéré comme l'Afrique en miniature. Sa pluralité en ressource énergétique (fort potentiel en hydroélectricité, bois-énergie, hydrocarbure...) laisse croire que, la gestion efficace de ces énergies serait d'un apport incommensurable dans la recherche au développement. Répartis en quatre secteur (secteur résidentiel, industriel, secteur de transport et autres secteurs), la consommation énergétique au Cameroun est de loin menée par le secteur résidentiel et donc, trouver des moyens d'optimiser l'utilisation de cette énergie reviendrait donc à étudier ces différents secteurs, évaluer leurs différents rendements, déterminer les lieux de pertes énergétique et les optimiser. Le but de cette thèse est d'appliquer l'analyse exergétique à un macro - système (pays) en particulier le Cameroun, pour déterminer les pertes énergétiques et exergétiques.

La méthodologie utilisée pour effectuer notre travail conduite par les principes de la thermodynamique, (premier principe dit principe de conservation et le second principe dit principe d'évolution), a été développée par Dincer (2002) et appliquée à plusieurs autres pays (Norvège, Arabie Saoudite, Nigéria, Afrique du Sud...). Elle a été cependant précédée d'une enquête dans les différents secteurs d'activité au Cameroun (secteur résidentiel, industriel, secteur de transport et autres secteur), afin, d'avoir une estimation de la quantité d'énergie que ces derniers consomment dans les différentes ressources disponibles sur le territoire national (énergie électrique, hydrocarbure, bois-énergie) pendant les années 2001 à 2010. C'est ainsi que, chaque secteur d'activité a été divisé en plusieurs sous – secteurs, afin de pouvoir déterminer les lieux de pertes énergétiques, de savoir la cause, et de trouver comment faire pour y remédier

De ces travaux, il en ressort que, en prenant en considération les résultats de l'année 2010, les autres secteurs (hôtels et restaurant, bâtiments administratifs, hôpitaux...) sont les secteurs les moins efficaces en terme d'exergie. De part les différents rendements énergétiques et exergetiques des secteurs d'activité du Cameroun, (respectivement 40,92% et 8,81% pour le secteur résidentiel, 22,14% et 20,78% pour le secteur de transport, 12,82% et 11,91% pour le secteur agricole et 56,09% et 5,06% pour les autres secteurs) nous constatons que le rendement exergetique le plus bas est attribué aux autres secteurs. Ce résultat s'explique juste par la forte utilisation des appareils qui renferment beaucoup d'irréversibilités lors de leur utilisation. Les rendements énergétiques et exergetiques du Cameroun tout entier sont calculés et pour l'année 2010, ils sont respectivement 37,90% et 10,81%. Valeurs relativement basses mais qui traduisent l'état de développement réel du pays.

De ces travaux, nous pouvons faire le constat que, du fort potentiel énergétique dont dispose le Cameroun, son utilisation reste toujours controversée et inefficace. Afin de pouvoir mieux l'utiliser, plusieurs actions sont entreprises. Nous pouvons citer les grands projets dans le domaine de l'hydro – électricité. Le secteur du bois – énergie quant à lui doit avoir une meilleure utilisation car c'est l'énergie qui est de loin la plus utilisée ; l'utiliser plus efficacement sera bénéfique pour le pays.

Abstract

The possession and good energy management nowadays are key factors to development. This research welfare and better living conditions pushes the country looking for ways that can lead not only to an inexhaustible supply of energy, but also optimal management (efficient) of the latter. Several approaches have been established for managing and optimizing the use of energy Among the methods developed for this purpose, the Exergy analysis seems to be the best.

Cameroon, Central African countries situated between the 2nd and the 13th degree of north latitude and between the 9th and the 16th degree of longitude, is not on the margins of this policy. Because of its cultural, ethnic and energy, it is regarded as Africa in miniature. Its plurality in energy resources (high potential hydropower, wood energy, hydrocarbon ...) suggests that the effective management of these would be an immeasurable contribution to development research. Divided into four sectors (residential, industrial, transport sector and other sector), energy consumption in Cameroon is far led by the residential sector and, therefore, find ways to optimize the use of this energy will come back to study these sectors, assess their different efficiencies, identify areas of energy loss and optimize them. The aim of this thesis is to apply the Exergy analysis at a macro - system (countries) in particular Cameroon, to determine the energy and exergy losses.

The methodology used to conduct our work led by the principles of thermodynamics (first principle says conservation principle and the second principle known principle of evolution), was developed by Dincer and applied to several other countries (Norway, Saudi Arabia, Nigeria , South Africa...). It was, however, preceded by an investigation of Cameroon in various sectors (residential, industrial, transport sector and other sector) this to get an estimate of the amount of energy that they consume in the various resources available in the country (electricity, hydrocarbon, wood energy) this for the years 2001 to 2010. Thus, each industry was divided into sub - sectors, to identify locations energy losses, to know the cause and to find how to fix it.

From this work, it appears that, taking into account the results of 2010, other sectors (hotels and restaurants, administrative buildings, hospitals ...) are the least efficient sectors in terms of exergy. Because of the different energy and exergy efficiencies of Cameroon's

industries, (respectively 40.92% and 8.81% for the residential sector, 22.14% and 20.78% for the transport sector, 12.82 % and 11.91% for the agricultural sector and 56.09% and 5.06% for other sectors) it has the lowest exergy efficiency. This result is explained by the strong fair use of appliances that contain a lot of irreversibilities during use. Energy efficiency and exergy of Cameroon whole are calculated and for 2010, they are 37.90% and 10.81% respectively. But relatively low values that reflect the actual state of development.

Following this, we can make the conclusion that the high energy potential available to Cameroon, its use remains controversial and ineffective. To better use, several actions are undertaken. We can mention major projects in the field of hydro - electricity. The timber sector - energy in turn should have a better use for it is the energy that is by far the most used; use it more effectively will benefit the country.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Etude énergétique	7
Figure 2: Triangle de l'interdisciplinarité de l'exergie	11
Figure 3: Flux énergétique dans le secteur de transport.....	13
Figure 4: Flux énergétique dans le secteur résidentiel	15
Figure 5: Flux énergétique dans le secteur industriel.....	18
Figure 6: Flux énergétique dans le secteur agricole	19
Figure 7: Flux énergétique dans les autres secteurs	20
Figure 8 : Relief du Cameroun.....	26
Figure 9: Répartition des stations-services par marketers en 2009 (Source : Tamba, 2013)...	29
Figure 10: Calcul de l'exergie d'un piston imaginaire. Source : (Cengel, 2007).....	38
Figure 11: Différente répartition de la zone d'étude. (Tchinda, 2009)	
44	
Figure 12: Classification des ressources naturelles par formes de stockage.(Dincer, 2002) ...	44
Figure 13: Rendement énergétique et exergetique global du secteur résidentiel au Cameroun	57
Figure 14: Rendement énergétique et exergetique par utilisation.....	58
Figure 15: Diagramme de flux énergétique (TJ) dans le secteur résidentiel au Cameroun en 2010.....	59
Figure 16: Diagramme de flux exergetique (TJ) dans le secteur résidentiel au Cameroun en 2010.....	59
Figure 17: Evolution du parc automobile de 2000 à 2010	61
Figure 18: Consommation exergetique du secteur de transport.....	64
Figure 19: Rendement énergétique et exergetique global du secteur de transport au Cameroun	65
Figure 20: Comparaison des différents rendements de secteurs de transport	66
Figure 21: Flux énergétique dans le secteur de transport (2010)	67

Figure 22: Rendement énergétique et exergetique du secteur agricole au Cameroun	70
Figure 23: Comparaison du secteur agricole du Cameroun avec celui d'autres pays.	70
Figure 24: Rendement énergétique et exergetique des autres secteurs au Cameroun.....	76
Figure 25: Rendement énergétique et exergetique par sous - secteurs	76
Figure 26: Flux énergétique (TJ) dans les autres secteurs	77
Figure 27: Flux exergetique (TJ) dans les autres secteurs.....	78
Figure 28: Rendement énergétique et exergetique du secteur résidentiel bois énergie inclus.	79
Figure 29: Pertes énergétiques et exergetiques du secteur résidentiel	80
Figure 30: Pertes énergétiques et exergetiques du secteur de transport.	82
Figure 31: Pertes énergétiques et exergetiques du secteur agricole.	84
Figure 32: Pertes énergétiques et exergetiques des autres secteurs	86
Figure 33: Pertes énergétique 1 et exergetique 1	89
Figure 34: Pertes cumulées en énergie fossile	89
Figure 35: Pertes sur le secteur de l'énergie électrique	91
Figure 36: Flux exergetique au Cameroun en 2010	92
Figure 37: Rendement énergétique et exergetique au Cameroun	93

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1: Comparaison de l'énergie et l'exergie. (Dincer, 2002)	24
Tableau 2: Présentation des ressources énergétique du Cameroun	27
Tableau 3: Parc de production électrique d'AES Sonel	28
Tableau 4: Facteurs de qualité pour quelques sources naturelles (wall, 1986 ; Dincer, 2002, Ertesvåg et Mielnik, 2000, Utlu et Helpbasli, 2007).....	45
Tableau 5: Répartition de l'utilisation de l'énergie dans le secteur résidentiel au Cameroun .	50
Tableau 6: Répartition de l'utilisation de l'énergie dans le secteur résidentiel au Cameroun .	52
Tableau 7: Consommation d'énergie électrique en TJ (Téra Joules) dans le secteur résidentiel	52
Tableau 8: Consommation des hydrocarbures en TJ dans le secteur résidentiel	53
Tableau 9: Proportion de l'utilisation de l'énergie au secteur résidentiel	56
Tableau 10: Rendement énergétique et exergetique par secteur d'utilisation.....	57
Tableau 11: Comparaison des différents rendements des secteurs résidentiels	58
Tableau 12: Consommation énergétique par type de vecteur énergétique du secteur de transport.....	62
Tableau 13: Consommation énergétique par sous - secteur	64
Tableau 14: Consommation énergétique et exergetique du secteur agricole (TJ)	69
Tableau 15: Répartition d'énergie et différents rendements aux autres secteurs	73
Tableau 16: Consommation (TJ) énergétique dans les autres secteurs	73
Tableau 17: Répartition de la consommation énergétique par utilisation	74
Tableau 18: Comparaison des autres secteurs du Cameroun	77
Tableau 19: Evolution de la consommation d'énergie (PJ) dans le secteur résidentiel (boi – énergie inclus)	79
Tableau 20: Energies et exergetie output du secteur résidentiel	80
Tableau 21: Energies et exergeties outputs du secteur de transport.....	82
Tableau 22: Energies et exergeties outputs du secteur agricole.....	83
Tableau 23: Energie et exergeties outputs dans les autres secteurs	85
Tableau 24: Consommation (PJ) global du Cameroun par secteur d'activité.....	87
Tableau 25: Part de la cuisson (PJ) dans la consommation d'exergie au Cameroun.	87
Tableau 26: Importations pétrolières (PJ)	88

Tableau 27: Bilan de la gestion de l'énergie électrique (PJ).....	90
Tableau 28: Présente la répartition de l'énergie dans d'autres pays.	94

GLOSSAIRE ET NOMENCLATURE

AER	: Agence d'Electrification Rurale
ARSEL	: Agence de Régulation du Secteur de l'Electricité
CCLFPP	: Commission de Coordination de Lutte contre la Fraude des Produits Pétroliers
CEE	: Electricity Development Corporation
CEMAC	: Communauté Economique et monétaire de l'Afrique Centrale
CSPH	: Caisse de Stabilisation des Prix des Hydrocarbures
GES	: Gaz à effet de Serre
GIEC	: Groupe d'experts Intergouvernementaux sur l'Evolution du Climat
GPL	: Gaz de pétrole liquéfié
Hab	: Habitant
HT	: Haute Tension
INS	: Institut National de Statistique
IP	: Improvement Potential
KJ	: Kilo Joules
Ktep	: Kilotonnes équivalent pétrole
MW	: Méga Watt
MT	: Moyenne Tension
OMDs	: Objectifs du Millénaire pour le développement
ONU	: Organisation des Nations unies
OCDE	: Organisation pour la Coopération et de Développement Economique
PIB	: Produit Intérieur Brut
PTU	: Programme Thermique d'Urgence
SCDP	: Société Camerounaise de Dépôt pétroliers
SIE	: Système Information Energétique
SNH	: Société National des Hydrocarbures
SONARA	: Société National de Raffinage
TM	: Tonnes Métriques
<i>E</i>	: Energie totale
<i>Ec</i>	: Energie cinétique
<i>Ep</i>	: Energie potentielle

U	: Energie interne
Q	: Quantité de chaleur
W	: Travail
S	: Entropie
T	: Température ambiante
V	: Volume
P	: Pression
H	: Enthalpie
ε	: Exergie
m	: Masse
q	: Facteur de qualité
η	: Rendement énergétique
ψ	: Rendement exergetique
COP	: Coefficient de performance
IP	: Improvement potential

Indices

0	: Référence
1	: Initiale
2	: Finale
c	: Cinétique
p	: Potentielle
$éch$: Echangé
$gén$: Généré
u	: Utile
env	: Environnement
ch	: Chimique
f	: Fuel
q	: Chaleur
w	: Travail
in	: Input
out	: Output

e : Electrique
g : Globale
h : Hôtels
a : Administrations
hp : Hôpitaux
er : Eclairage de rue
au : Autres
b : Bois – énergie

TABLE DE MATIERE

DEDICACE	I
REMERCIEMENTS	II
RESUME	IV
ABSTRACT	VI
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTES DES TABLEAUX	X
GLOSSAIRE ET NOMENCLATURE	XII
TABLE DE MATIERE	XV
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE DES ANALYSES ENERGETIQUES ET EXERGETIQUES	4
I-L'ENERGIE	5
<i>I-1-Les énergies ordonnées</i>	5
<i>I-2-Les énergies désordonnées</i>	6
<i>I-3-Bilan et rendement énergétique</i>	6
I-3-1-Bilan énergétique	6
I-3-2-Rendement énergétique	8
II-ANALYSE EXERGETIQUE	8
<i>II-1- Historique et définition</i>	9
<i>II-2-Nécessité de l'analyse énergétique et exergetique</i>	9
<i>II-3 La méthode exergetique appliquée à une société</i>	11
II-3-1 Analyse du secteur de transport	12
II-3-2 Analyse du secteur résidentiel	15
II-3-3 Analyse du secteur industriel	17
II-3-4- Analyse du secteur Agricole	19
II-3-6- Analyse des autres secteurs	20

<i>II-4-Exergie des systèmes industriels.....</i>	<i>21</i>
II-4-1 Terminologie des bilans énergétiques et exergétiques.....	21
II-4-2-Des études antérieures sur l'évaluation de l'énergie sectorielle et à l'utilisation exergie	22
II-4-3- Définitions Dead Etat (état de référence)	23
<i>II-5-Exergie et énergie.....</i>	<i>24</i>
III- SITUATION DE L'ENERGIE AU CAMEROUN.....	24
<i>III-1-Présentation du Cameroun.....</i>	<i>24</i>
III-1-1 Présentation géographique.....	24
III-1-2- Végétation et climat	25
III-1-3- Relief et hydrologie	26
<i>III-2-Secteur de l'énergie électrique.....</i>	<i>27</i>
<i>III-3-Secteur des hydrocarbures</i>	<i>28</i>
<i>III-4-Secteur des énergies renouvelables.....</i>	<i>29</i>
<i>III-5- Demande énergétique au Cameroun.....</i>	<i>30</i>
CONCLUSION	32
CHAPITRE II : METHODOLOGIE ET MATERIEL.....	33
I-RAPPELS DE QUELQUES PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE.....	34
<i>I-1-Premier principe</i>	<i>34</i>
<i>I-2- Second principe.....</i>	<i>35</i>
I-2-1 Nécessité d'un second principe. Limites du premier principe	35
I-2-2- Réversibilité – Irréversibilité	36
I-2-3 Enoncé	36
I-3- Notion d'exergie.....	37
I-4- Rendement énergétique et exergétique	39
I-4-1- Rendement de quelques procédés.	40

I-4-1-1 Chaleur	40
I-4-1-2 Refroidissement	41
I-4-1-3 Production d'électricité	41
I-4-1-4- Production de travail pour les commandes mécaniques	42
I-4-2- Potentiel d'amélioration exergetique	42
I-4-3- Calcul du rendement moyen	43
II- APPLICATION A L'ETUDE DES SYSTEMES.....	43
III- ACQUISITION DES DONNEES.....	45
CONCLUSION	47
CHAPITRE III : APPLICATION DE L'ANALYSE ENERGETIQUE ET EXERGETIQUE AUX DIFFERENTS SECTEURS D'ACTIVITES DU CAMEROUN	48
I- SECTEUR DU RESIDENTIEL	49
<i>I-1- Evaluation des rendements dans le secteur résidentiel du Cameroun</i>	50
I-1-1- Eclairage	50
I-1-2-Cuisson.....	50
I-1-3- Chauffage de l'eau	51
I-1-5- Réfrigération	51
I-1-6- Appareils électriques.....	52
<i>I-2- Consommation énergétique du secteur résidentiel</i>	52
<i>I-3- Rendement énergétique et exergetique pondéré du secteur résidentiel</i>	54
I-3-1- Energie électrique (première étape)	54
I-3-2- Fuel (seconde étape)	55
I-3-3- Rendement moyen globale (troisième étape).....	55
II- SECTEUR DU TRANSPORT	60
<i>II-1 Consommation énergétique du secteur de transport</i>	61
<i>II-2 Evaluation des rendements moyens et globaux dans le secteur de transport du Cameroun</i>	65

III- AUTRES SECTEUR.....	67
<i>III- 1- Secteur de l'agriculture.....</i>	<i>67</i>
III-1-1 Consommation énergétique du secteur de l'agriculture	68
III-1-2 Rendement énergétique et exergetique du secteur de l'agriculture.....	69
<i>III-2 Autres secteurs tertiaires</i>	<i>70</i>
III-2-1- Evaluation des rendements.....	71
III-2-1-1- Eclairage	71
III-2-1-2- Climatisation	72
III-2-1-3- Appareils électriques	72
III-2-2 Consommation énergétique des autres secteurs	72
III-2-3 Rendement énergétique et exergetique des autres secteurs	73
IV-DISCUSSION	78
<i>IV-1-Evaluation des pertes au secteur résidentiel</i>	<i>78</i>
<i>IV-2-Evaluation des pertes au secteur de transport</i>	<i>81</i>
<i>IV-3-Evaluation des pertes dans les autres secteurs</i>	<i>83</i>
IV-3-1-Evaluation des pertes au secteur agricole.....	83
IV-3-1-Evaluation des pertes dans les autres secteurs	85
<i>IV-4- Présentation générale de la consommation camerounaise.....</i>	<i>86</i>
IV-4-1- Secteur des hydrocarbures	87
IV-4-2- Secteur de l'énergie électrique.....	89
IV-4-3- Flux exergetique au Cameroun	92
CONCLUSION	94
CONCLUSION GENERALE	96
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIES</i>	<i>99</i>
ANNEXES	106
I- LISTE DES PUBLICATIONS	107

II- CADRE INSTITUTIONNEL ET LEGISLATIF DE L'ENERGIE AU CAMEROUN	107
<i>I-1- Secteur de l'énergie électrique</i>	108
I-1-1- Cadre institutionnel	108
I-1-2- Cadre législatif	108
<i>I-2 Secteur des hydrocarbures</i>	108
I-2-1- Cadre institutionnel	108
I-2-2- Cadre réglementaire	109
I-3- secteur des énergies renouvelables.....	109
I-3-1- Cadre institutionnel.....	109
III-RELEVÉ ET CALCUL DE LA CONSOMMATION D'ELECTRICITE DANS UN BATIMENT	110
IV- VALEURS DE L'ENTHALPIE, DU FACTEUR DE QUALITE ET DE L'EXERGIE CHIMIQUE DE QUELQUES SOURCES D'ENERGIE.....	112
V- FICHE D'ENQUETE SUR LES BESOINS ENERGETIQUES DANS LES MENAGES	113

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La perpétuelle recherche de l'amélioration des conditions de vies poussent les hommes à des réflexions afin d'y apporter une solution. Plusieurs scientifiques pensent que de nos jours la possession de l'énergie est un grand pas dans ce processus de développement. C'est ainsi que, plusieurs pays sont à la quête de cette énergie afin de pouvoir résoudre les problèmes auxquels ils sont confrontés. Dans son rapport de l'année 2007, le Groupe d'experts Intergouvernementaux sur l'Evolution du Climat (GIEC) annonce que : « L'essentiel de l'accroissement des températures globalement moyennées depuis le milieu du 20ème siècle résulte très probablement de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre (GES) anthropogènes (liés aux activités humaines) ». Les émissions de CO₂ constituent environ 70 % des émissions totales de GES, et sont surtout liées à la consommation d'énergie fossile, énergie utilisée par la majorité pour la production d'énergie et des biens de première nécessité.

Ainsi le problème de possession de l'énergie n'est pas le seul à être d'actualité, mais il existe également un problème de gestion de cette énergie proprement dite ou encore de gestion efficace de cette énergie. En effet peu importe la quantité d'énergie que l'on possède, si la gestion n'est pas efficace, son utilisation n'aura l'effet escompté. Plusieurs publications ont montré le rôle fondamental que joue l'énergie dans la réalisation des Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMDs) édictés par l'ONU; l'énergie a également des liens étroits avec toutes les activités qui concourent au développement économique et social, et son impact sur l'équilibre écologique actuel et futur est critique.

Depuis plus d'une décennie, le Cameroun est tombé dans une crise énergétique qui se traduit par des délestages réguliers d'électricité, des pénuries de gaz de pétrole liquéfié, la baisse de la production pétrolière et la chute des prix de carburant. Cette situation a contribué à la stagnation de l'économie et à la perturbation de la vie sociale Au niveau du Cameroun, les questions suivantes peuvent être posées : Comment s'effectue la gestion d'énergie ? Quelles sont les voies et moyens nécessaires et utiles pour optimiser le secteur énergétique ?

L'objectif de notre travail est de mener une étude énergétique et exergétique des différents secteurs d'activité au Cameroun (transport, résidentiel, industriel, et autres). Cette étude pourra permettre de mieux appréhender l'utilisation des différentes ressources énergétiques (bois – énergies ; hydrocarbures, énergie électrique) dans ces secteurs. Ensuite, il sera question pour nous de comparer les travaux effectués sur le territoire camerounais avec ceux effectués dans d'autres pays (Malaisie, Arabie Saoudite, Nigéria...) et enfin de proposer des voies et moyens afin de rendre cette utilisation efficiente.

INTRODUCTION GENERALE

Afin de réaliser l'objectif fixé, notre travail débutera par une étude bibliographique détaillée des méthodologies existantes, en vue de déterminer leurs avantages et leurs inconvénients vis-à-vis du but principal de l'étude. Plusieurs éléments essentiels ont été extraits, et des pistes pour surmonter certaines difficultés posées par ces méthodes ont été identifiées. La suite de ce chapitre est une présentation (pas exhaustive) du secteur de l'énergie au Cameroun.

Le chapitre 2 de la thèse présente la méthodologie développée. Elle est en effet basée sur les principes de la thermodynamique (premier et second principe). Dans ce chapitre, les différentes étapes de la méthodologie sont présentées et détaillées. L'identification et la délimitation du système et des différents sous - systèmes s'est avérée fondamentale pour l'application de la méthode développée.

Le chapitre 3 quant à lui traite de l'application des analyses énergétiques et exergetiques au Cameroun et en particulier dans ses différents secteurs d'activités (transport, résidentiel, agriculture et tertiaire). Dans ce chapitre les différentes étapes de l'analyse sont appliquées, en se servant de la méthodologie décrite au chapitre 2. Il est montré également que les analyses énergétiques et exergetique sont des outils d'orientation à la décision car elles permettent de mieux appréhender la gestion des secteurs d'activités afin de les améliorer.

CHAPITRE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE DES ANALYSES ENERGETIQUES ET EXERGETIQUES

C'est une maxime bien connue, la vie est une succession de mouvement et donc de dépense d'énergie (Grandeur qui caractérise la capacité d'un corps ou d'un système à produire du travail, à modifier l'état d'autre système). Dans ce chapitre il sera question pour nous de présenter la notion d'énergie, et introduire aussi la notion d'exergie (travail maximum que peut produire un système), mieux les appréhender tout en présentant les travaux (analyses énergétiques et exergetiques) fait dans plusieurs autres pays. Ensuite il sera question de présenter le Cameroun, sa situation géographique, et son fort potentiel énergétique (offre). Nous terminerons ce chapitre par la demande énergétique.

I-L'ENERGIE

L'énergie est la capacité d'un système à produire le travail. Elle se manifeste sous plusieurs formes, et chacune d'elles a des caractéristiques qui lui sont propres. Elles se rejoignent tout de même en un point à savoir leurs capacités à provoquer le changement. Les différentes formes d'énergies peuvent être classées en deux catégories (Diop, 2001) :

- Les énergies ordonnées
- Les énergies désordonnées

I-1-Les énergies ordonnées

Dans cette catégorie d'énergie, on retrouve l'énergie potentielle et l'énergie cinétique, chacune d'elles ayant les caractéristiques suivantes :

- La possibilité de passer d'un type à l'autre avec conservation totale en opérant de façon réversible.
- Le transfert entre deux systèmes s'effectue uniquement par échange d'énergie travail.
- Le transfert entre deux systèmes n'entraîne pas de variation d'entropie : les procédés dans ce cas peuvent être analysés à l'aide du premier principe de la thermodynamique.
- Les paramètres de l'environnement ne sont pas considérés lors du transfert d'énergie ordonnée entre deux systèmes.

I-2-Les énergies désordonnées

On retrouve toutes les autres formes d'énergies différentes des énergies ordonnées : à savoir les énergies calorifiques et thermiques. Ces énergies possèdent les caractéristiques suivantes (Diop, 2001) :

- Pour avoir un maximum de conversion d'une forme d'énergie désordonnée en une forme ordonnée, il est nécessaire d'avoir un procédé entièrement réversible.
- La limite maximale d'une telle conversion dépend non seulement des paramètres thermodynamiques des procédés mais aussi de l'environnement.
- La conversion engendre une variation d'entropie.
- L'analyse des formes d'énergies désordonnées nécessite l'utilisation du deuxième principe de la thermodynamique.

I-3-Bilan et rendement énergétique

Le premier principe de la thermodynamique, exprime le bilan énergétique d'un système donné en tenant compte des transferts d'énergie entre ce système et l'extérieur. Cependant, il ne prend pas en compte la qualité, ni le niveau d'énergie.

C'est dire que, la connaissance du bilan énergétique, à lui seul, ne suffit ni pour permettre d'améliorer les performances d'un système, ni pour déterminer les perfectionnements qui pourraient être apportés à ce dernier. Pour atteindre ce double objectif, il est nécessaire d'établir le bilan des pertes intervenant aux différents stades de la conversion d'énergie. Le principe de ce bilan consiste à suivre pas à pas l'évolution de l'énergie dépensée et à noter successivement toutes les quantités perdues par le système des éléments externes. L'utilisation du deuxième principe de la thermodynamique permet d'affecter à chaque quantité d'énergie thermique un coefficient tenant compte de la valeur de celle-ci. Et c'est cette correction qui entraîne une transformation du bilan énergétique en un bilan exergetique qui sera détaillé un peu plus loin dans notre étude.

I-3-1-Bilan énergétique

Soit le système suivant, baignant dans l'atmosphère de pression P_0 et de température T_0 .

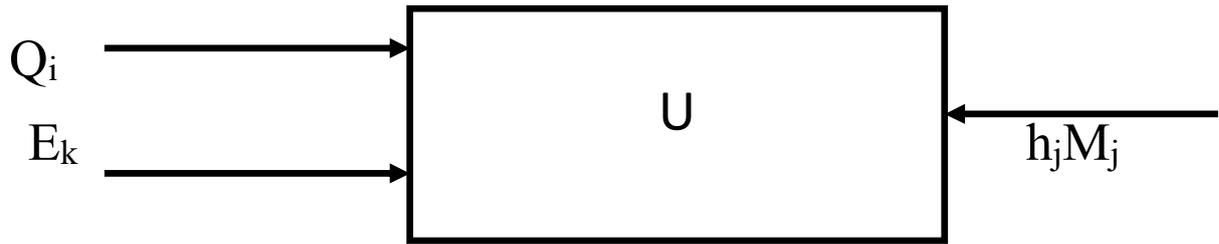


Figure 1 : Etude énergétique

Le bilan énergétique de puissance est exprimé par (Borel, 1991)

$$\frac{dU}{dt} = \sum_k [E_k] + \sum_i [Q_i] + \sum_j [h_j M_j] \quad (1-1)$$

Avec :

U : Energie interne du système

E_k : Puissance travail reçue par le système au niveau d'une machine K

Q_i : Puissance chaleur reçue d'une source T_i

h_j : Enthalpie totale massique du fluide au droit de la section j

M_j : Débit-masse reçu au droit d'une section j

En considérant que, la puissance travail effective E_{ek} fournie par le système est égale à la puissance travail globale, diminuée de celle engendrée par l'augmentation de volume du

système, $\left[\frac{d(U + PdV)}{dt} \right]$ L'équation (1-1) devient :

$$\sum_k [E_{ek}] + \sum_i [Q_i] + \sum_j [h_j M_j] - \frac{d(U + PdV)}{dt} = 0 \quad (1-2)$$

Avec :

$$\sum_k [E_k] = \sum_k [E_{ek}] - P \frac{dV}{dt} \quad (1-3)$$

Par définition nous avons l'énergie effective (Borel, 1991)

$$U_e = U + PV \quad (1-4)$$

A partir des équations (1 - 2) et (1-4) nous obtenons :

$$\sum_k [E_{ek}] + \sum_i [Q_i] + \sum_j [h_j M_j] - \frac{dU_e}{dt} = 0 \quad (1-5)$$

Par définition la puissance transformation effective est (Borel, 1991):

$$W_e = \sum_j [h_j M_j] - \frac{dU_e}{dt} \quad (1-6)$$

Ainsi nous avons le bilan énergétique suivant :

$$\sum_k [E_{ek}] + \sum_i [Q_i] + \sum_n [W_{en}] - 0 \quad (1-7)$$

I-3-2-Rendement énergétique

Pour apprécier le fonctionnement d'un système énergétique, la méthode la plus simple consiste à comparer l'énergie produite à l'énergie dépensée pendant la même durée. Ces quantités peuvent être exprimées au moyen de la même unité (Joule ou Watt). Le rapport de ces deux quantités est égal au rendement énergétique du système. La valeur de ce rendement dépend à la fois de la nature du système, de ses conditions de fonctionnement et du degré de perfection des appareils dont il est composé. Le rendement énergétique est obtenu à partir de la relation (Diop, 2001):

$$\eta = \frac{\sum [E_e^-] + \sum [Q^-] + \sum [W_e^-]}{\sum [E_e] + \sum [Q] + \sum [W_e]} \quad (1-8)$$

Avec :

E_e^- : Puissance travail dépensée

Q^- : Puissance chaleur dépensée

W_e^- : Puissance effective dépensée

E_e : Puissance travail produite

Q : Puissance chaleur produite

W_e : Puissance effective produite

II-ANALYSE EXERGETIQUE

II-1- Historique et définition

La thermodynamique s'appuie sur deux principes fondamentaux : Le premier et le second principe de la Thermodynamique. Le premier principe est basé sur la conservation de la matière et de l'énergie, tandis que le second principe est utilisé pour évaluer la variation de la quantité et de la qualité de l'énergie dans un système donné. Ces deux principes ont été établis respectivement par Von Mayer et Carnot dans la première moitié du 19^e siècle. Dans la seconde moitié, le concept de l'exergie a été défini comme étant un cas spécial de l'énergie disponible de Gibbs d'un corps et d'un milieu lorsque ce dernier est entouré par un milieu à température et pression constante (Dewulf et al., 2008). Aussi il convient de noter que l'utilisation effective de l'analyse exergetique a débuté dans la seconde moitié du 20^e siècle (Belhani, 2008).

Comme nous l'avons dit plus haut, l'énergie peut être stockée de deux façons : ordonnée ou désordonnée. La forme ordonnée se manifeste sans transformation des molécules porteuses d'enthalpies via l'énergie potentielle, l'énergie cinétique. La forme désordonnée se manifeste par la transformation des molécules via l'énergie physique (mécanique, thermique). Un transfert réversible d'énergie ordonné n'entraîne pas une variation de l'entropie du système, tandis qu'une partie seulement de l'énergie désordonnée peut être convertie en d'autre forme d'énergie. C'est cette partie qui représente l'exergie (Belhani, 2008).

L'exergie d'un système peut être définie comme une fonction, thermodynamique qui exprime la capacité de ce système à produire du travail, en raison de son déséquilibre avec l'ambiance dans lequel il se trouve. Ou encore, l'exergie est le potentiel de travail maximum qui peut être obtenu quand une matière (un système) est portée de son état initial, à l'état d'équilibre avec son environnement à partir des processus chimiques et physiques réversibles.

Selon le second principe de la thermodynamique dit de dissipation, il n'y a pas de perte d'énergie mais plutôt des pertes de possibilités d'utiliser l'énergie pour des usages externes (Belhani, 2008).

II-2-Nécessité de l'analyse énergétique et exergetique

L'énergie est un élément clé des interactions entre la nature et la société. Elle est également considérée comme un élément clé de développement économique et, comme chacun le sait, il y a aucune source d'énergie qui est absolument neutre pour respecter l'environnement. Dans ces circonstances, l'énergie a un caractère interdisciplinaire, couvrant le développement durable et l'impact environnemental (Dincer, 2002). A cet égard, toutes les politiques

énergétiques devraient être solides, et faire partie intégrante du processus international de l'adaptation du système d'énergie, qui reconnaît le lien très fort existant entre les besoins énergétiques, et les émissions de pollution. Beaucoup de questions environnementales se rapportent à la production, la transformation et l'utilisation de l'énergie. Par exemple, onze principaux sujets de préoccupation de l'environnement dans lesquelles l'énergie joue un rôle important ont été identifiés Dincer (1998a); Rosen et Dincer (1999).

- Les grands accidents écologiques,
- La pollution de l'eau,
- La pollution maritime,
- L'utilisation des terres et l'implantation,
- La radioactivité,
- L'élimination des déchets solides,
- Les polluants atmosphériques dangereux,
- La qualité de l'air ambiant,
- Les dépôts acides
- L'appauvrissement de l'ozone stratosphérique
- Le changement climatique mondial.

Bien que de nombreuses études aient été publiées dans les années 1970 et 1980 concernant la relation entre l'énergie et l'environnement, ce n'est que récemment qu'un nombre croissant de travaux sur le lien entre l'exergie et l'environnement a été fait. On peut citer, Reistad (1970), Crane et al. (1992), Rosen et Dincer (1997), Ayres et al. (1998), Dincer (1998b), Dincer et Rosen (1999) et Sciubba (1999).

Bejan (1994) a étudié l'application de l'entropie. Son travail avait un triple but :

- Employer l'art de minimisation de la génération d'entropie à un niveau encore inexploré ;
- Présenter un cadre unifié avec une base théorique solide pour la fabrication et l'analyse des politiques propositions énergétiques ;
- Démontrer les avantages potentiels d'un dialogue entre les différentes disciplines, universitaires ou professionnelles,

Bejan et al. (1982) a fait remarquer que la minimisation de génération d'entropie devrait être considérée comme une « *philosophie* » de conception pour l'isolation thermique des systèmes, et son concept devrait être utilisé pour développer une politique énergétique

cohérente et globale. Une telle politique énergétique devrait prévoir la gestion efficace de l'énergie et de l'exergie totale, l'inventaire et la fourniture de tous les combustibles connus et également des sources d'énergie (Bejan et al. 1982).

L'impact de l'utilisation des ressources énergétiques sur l'environnement et la réalisation de l'efficacité énergétique sont mieux évaluées en considérant l'exergie. L'exergie d'une forme d'énergie ou d'une substance est la mesure de son utilité, de la qualité ou du potentiel à causer des améliorations. Il est important de mentionner que, dans la pratique, une compréhension approfondie de l'exergie et les idées qu'elle peut fournir dans l'efficacité, l'impact sur l'environnement et la durabilité des systèmes énergétiques, sont nécessaires pour l'ingénieur ou le scientifique travaillant dans le domaine de l'énergie (Dincer, 2002). La nécessité de comprendre les liens entre l'exergie, l'énergie, et l'impact sur l'environnement est devenue de plus en plus importante. C'est ainsi que Dincer parle de l'interdisciplinarité de l'exergie car elle concilie l'énergie, l'environnement et le développement durable (figure 2).

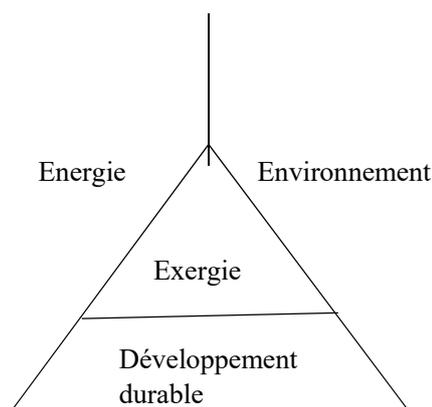


Figure 2: Triangle de l'interdisciplinarité de l'exergie

II-3 La méthode exergetique appliquée à une société

L'utilisation de l'énergie d'un pays peut être évaluée en utilisant l'analyse exergetique, ceci pour avoir un aperçu de son efficacité. Le premier a été appliqué par Reistad (1970) aux États-Unis, tandis que le plus complet en termes d'années semble être Ayres et al. (2003). Car il a fait une analyse entre 1900 et 1998.

Les approches utilisées pour effectuer les analyses d'exergie de pays peuvent être regroupées en trois types (Utlu, H. et Hepbasli, 2008) :

- L'approche de Reistad
- L'approche de Wall
- L'approche de Sciubba.

La première approche considère les flux de porteurs d'énergie pour la consommation d'énergie, tandis que le second prend en compte tous les types de flux énergétiques et matériels. L'approche Reistad a été utilisée dans les analyses de la Finlande, du Canada, du Brésil, de l'Organisation pour la Coopération et de Développement Economique (OCDE), pays hors OCDE, et dans le monde, de l'Angleterre, et de l'Arabie saoudite. Outre cela, les analyses du Ghana, de la Suède, du Japon, de l'Italie et de la Norvège ont suivi l'approche Wall. En outre, une nouvelle approche, la méthode de la Comptabilité Exergétique Etendue (CEE), a été introduite par Sciubba, et appliquée à la société italienne en 1996 par Milia et Sciubba (2000). La CEE attribue également les valeurs exergetiques au travail et à des flux monétaires au sein du système. La méthode d'analyse exergetique a été développée et principalement utilisée pour l'isolation thermique et thermochimique des systèmes ces dernières décennies. Cette méthode a également été développée pour analyser la consommation d'énergie de tout un pays la norvège (Ertasvag et Mielnik, 2000). Elle a été introduite par Reistad (1970, 1975) dans l'analyse des Etats Unis, où l'exergie des transporteurs d'énergie a été suivie par la société. L'utilisation finale de cette analyse a été divisée en trois secteurs qui sont :

- Le secteur industriel ;
- Le secteur des transports ;
- Le secteur résidentiel et commercial.

Des analyses similaires ont été présentées pour le Canada en 1986 par Rosen (1992), le Brésil en 1987 par Schaeffer R et Wirtshafter (1992), et la Turquie en 1995 par Ileri' A, et Gürer (1998). Dans un autre développement de la méthode, Wall (1977, 1986, 1987) a étudié la société suédoise pendant les années 1975, 1980, et 1920 à titre d'exemples. Dans ces analyses, l'exergie de tous les types d'énergies et de flux de matières a été comptabilisée.

II-3-1 Analyse du secteur de transport

Le transport est d'importance fondamentale pour la société humaine, car il fournit la mobilité et facilite l'industrie et le commerce. Néanmoins il y a également beaucoup d'incidences sur l'environnement ainsi, il est crucial que la planification du transport soit effectuée dans les besoins optima d'un voyage de réunion soutenable de façon, à favoriser la

prospérité économique et la conservation environnementale. En évaluant l'efficacité du transport, l'analyse d'exergie est un outil efficace.

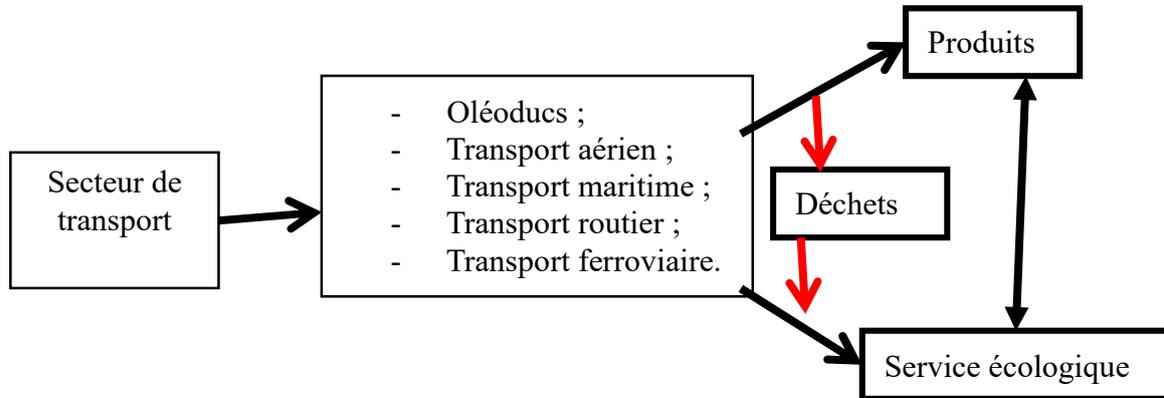


Figure 3: Flux énergétique dans le secteur de transport

Le secteur de transport est caractérisé par l'utilisation excessive des énergies fossiles. L'augmentation du nombre de véhicule dans le monde et leurs fortes utilisations ont conduit plusieurs chercheurs à conclure que le secteur de transport dans le monde n'a pas une utilisation efficace (Steg et Gifford, 2005). Grâce à ses différents moyens de transport (Oléoducs, aériens, routier, ferroviaire), ce secteur est alors un moyen clé du développement. Il permet aux biens et aux personnes de se mouvoir. Le secteur de transport doit être soutenu et mieux examiné afin de permettre une avancée bénéfique non seulement dans le domaine de l'économie mais également dans le domaine de l'environnement ; car n'oublions pas qui parle d'utilisation des énergies fossiles, parle également de pollution de l'environnement et des Gaz à Effet de Serre (GES).

Ainsi donc, l'analyse du secteur de transport par l'approche exergétique conciliera le produit (déplacement) et la protection de l'environnement tout en diminuant les déchets (GES). Le flux énergétique dans le secteur de transport peut être représenté par la figure 3.

L'approche exergétique étant en plein essor, les travaux dans ce secteur ne sont pas légion néanmoins nous retrouvons l'analyse menée en :

- Arabie Saoudite de 1990 à 2001 par Dincer I. (2004a). Le secteur de transport de l'Arabie Saoudite pendant les années de 1990-2001 est analysé. Ces analyses énergétiques et exergétiques sont conduites pour ses trois sous-secteurs, à savoir le transport routier, le transport aérien et le transport maritime. De ces analyses, il en

ressort que, le sous-secteur de routier semble être le plus efficace comparé au transport aérien et au transport maritime. Dans leurs travaux, Dincer et al. font une comparaison des différents rendements énergétiques et exergetiques avec le secteur de transport de la Turquie au cours de l'année 1993 (analyse basée sur les données disponibles) ; et de cette comparaison le secteur de transport turc est le plus efficace.

- Turquie de 1998 à 2004 par Ediger et Camdali (2007). Dans cette étude, Ediger et Camdali visent à examiner l'efficacité énergétique et exergetique dans le secteur de transport turc pendant une période de 17 ans (1988 – 2004). Cette étude est menée pour quatre sous-secteurs (transport par chemin de fer, transport routier, transport maritime, et transport aérien). Pour chaque sous – secteur, il met l'accent sur la quantité et la qualité de la ressource énergétique utilisée afin d'avoir une meilleure appréhension du secteur. De cette étude, il ressort que, le secteur de transport de la Turquie est fortement dépendant du sous – secteur routier car l'efficacité de ce secteur va de 81.5% en 2004 à 91.7% de 2002.
- Malaisie de 1995 à 2003 par Sattar et al. (2007a). Sattar et al. font une application de l'analyse énergétique et exergetique au secteur du transport de la Malaisie au cours des années 1995 à 2003, ceci en prenant en compte les transports routiers, maritimes et aériens. Ensuite, une comparaison des rendements énergétiques et exergetique du secteur de transport de la Malaisie est effectuée avec celui de la Turquie et de la Norvège ; il en ressort que celui de la Malaisie est supérieur à la Norvège et inférieur à celui de la Turquie.
- Grèce de 1998 à 2003 par Koureneos et Nanaki (2008). Ils nous présentent une évaluation d'utilisation d'exergie et d'énergie pour le secteur de transport de la Grèce pour la période plus de 1980-2003. Des analyses énergétiques et exergetiques sont conduites pour les quatre sous-secteurs du secteur de transport grec. Le sous-secteur routier semble être le plus efficace par rapport aux autres sous-secteurs pendant les années entre 1980 et 2003. On le croit que l'analyse d'exergie présentée ici fournit des perspectives dans l'utilisation d'énergie de transport et pourrait aider à la planification d'un système efficace de transport.
- Jordanie de 1985 à 2005 par Jober et al. (2008). Le secteur de transport est responsable environ de 37% de la demande finale d'énergie totale en Jordanie. Ce travail présente analyse d'énergie et utilisation d'exergie dans le secteur de transport de la Jordanie des années 1995 à 2005. Le secteur de transport, en Jordanie, est réparti en deux sous-

secteurs ; le transport routier et le transport aérien. Le dernier est principalement employé pour des vols internationaux.

- Nigeria de 1980 à 2010 par Badmus et al (2012). Dans ce travail, Badmus et al. analysent l'utilisation d'énergie dans le secteur de transport du Nigéria des années 19980 à 2010. Le secteur est dominé par le transport routier, avec une part s'étendant de 70.65% en 1990 à 97.51% en l'année 2005 et a moyen de 88.44%. Le sous-secteur de route est toujours le plus efficace, avec les valeurs d'efficacité énergétique qui s'étendent de 9.93% en 1990 à 19.19% de 1986. Les valeurs correspondantes d'exergie sont 9.28% et 17.93%, respectivement.

Toutes ces analyses ont un point commun : le rendement énergétique supérieur au rendement exergetique. Ceci est dû aux irréversibilités causant les pertes d'énergies.

II-3-2 Analyse du secteur résidentiel

Dans le secteur résidentiel l'utilisation des plusieurs sources d'énergies est remarquée. C'est ainsi qu'en fonction des différents systèmes étudiés et des données disponibles, nous avons la présence d'une source d'énergie ou d'une autre. Il serait donc nécessaire d'avoir une vision efficace sur l'utilisation de l'énergie dans ce secteur.

Dans ce secteur, les différentes utilisations de l'énergie (chauffage, réfrigération, cuisine...) conduisent à la pollution de l'environnement. C'est ainsi donc qu'une amélioration est nécessaire. Le flux énergétique pour ce secteur est représenté par la figure 4.

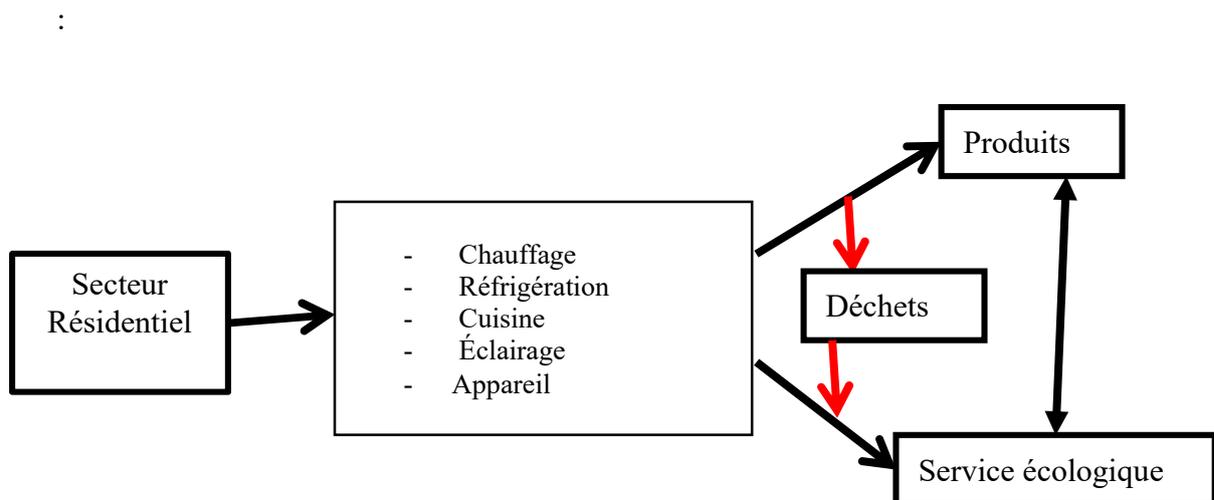


Figure 4: Flux énergétique dans le secteur résidentiel

C'est en allant dans cet ordre d'idée que des chercheurs se sont lancés dans l'étude énergétique et exergétique du secteur résidentiel ; nous pouvons donc citer entre autre l'analyse menée en

- Arabie Saoudite par Dincer et al. L'utilisation d'exergie dans le secteur résidentiel de l'Arabie Saoudite pendant 12 années entre 1990 et 2001 est effectuée. Ces analyses énergétiques et exergétiques sont entreprises pour quatre sous-secteurs, à savoir la climatisation, l'éclairage, la cuisson et autres, et par conséquent les différents rendements énergétiques et exergétiques sont obtenus. De cette analyse, la climatisation est le secteur ayant le rendement énergétique le plus élevé, tandis que, l'éclairage est celui dont le rendement exergétique est le plus élevé. On constate également dans ces analyses que, le rendement exergétique global de ce secteur est de 9,6% tandis que le rendement énergétique est de 76,6%.
- Malaisie par Saidur et al. (2007b). Ces derniers définissent, appliquent et analysent le secteur résidentiel de la Malaisie via le concept « analyse énergétique et exergétique » pendant une période de 8 ans (1997 – 2004). Dans ces analyses, les rendements énergétiques et exergétiques sont déterminés pour les dispositifs utilisés dans ce secteur et valent respectivement 70% et 28%. Les différents flux énergétiques et exergétique, sont illustrés par un organigramme. Le constat selon lequel le rendement énergétique est supérieur au rendement exergétique est également fait ; et on observe également qu'environ 21% de pertes totales d'exergie sont provoquées par le réfrigérateur-congélateur et 12% par le climatiseur. La machine à laver, le ventilateur et le cuiseur de riz contribuent environ 11%, 10% et 8% de pertes totales d'exergie, respectivement.
- Jordanie par Al – Ghandoor et al. (2008). Dans cette étude, Al – Ghandoor et al. présentent une analyse de l'utilisation d'énergie et d'exergie du secteur résidentiel urbain jordanien. Dans la réalisation de ce travail, une enquête a été menée sur 200 ménages et des données de consommation énergétique ont été recueillies. L'analyse exergétique du secteur résidentiel urbain jordanien indique une image moins efficace que celle obtenu par l'analyse énergétique. Les rendements énergétiques et exergétiques sont respectivement égaux à 66,6% et à 15,4%.

Plusieurs autres analyses ont également été menées dans d'autres pays comme la Norvège par Ertesvag et Mielnik (2000) et la Turquie par Utlu et Hepbasli (2003, 2005, 2006) ;

II-3-3 Analyse du secteur industriel

Le développement d'un pays passe par son industrialisation ; c'est ainsi que le secteur industriel nécessite une étude minutieuse afin de pouvoir déceler les lieux de pertes énergétiques et exergétiques afin de trouver des solutions. Ce secteur représente pour la plus part des pays étudiés le secteur le plus « énergivore » pour ce qui est de l'énergie électrique. Ainsi donc, la gestion efficace de l'énergie dans un pays ne saurait être effective si ce secteur n'est pas bien appréhendé.

Lors d'une analyse exergétique des industries, on regroupe en fonction des températures (basses températures $T \leq 121^{\circ}\text{C}$, moyennes températures $121^{\circ}\text{C} \leq T \leq 399^{\circ}\text{C}$, hautes température $T \geq 399^{\circ}\text{C}$ les unités fonctionnelles. Le flux énergétique dans ce secteur est représenté par la figure 5.

Les analyses de ce secteur ont été également menées dans d'autres pays ; ainsi nous avons :

- L'Arabie Saoudite par Dincer (2003). Le secteur industriel de l'Arabie Saoudite a été analysé pendant une période de 12 ans (1990 – 2001) et ceci pour quatre sous – secteurs (industries extractives, les cimenteries, industries de produit chimique et pétrochimiques et les sidérurgies). De cette analyse, il en ressort que le sous – secteur chimique et pétrochimique est le plus efficace en terme d'énergie tandis que, la sidérurgie l'est en terme d'exergie.
- La Turquie par Utlü et Hepbasli (2007, 2008). L'efficacité énergétique et exergétique du secteur industriel turc des années 1990 à 2003 est analysé dans ces travaux. Ces analyses sont faites pour huit sous – secteurs (catégories d'industries) à savoir les industries de fabrication de fer-acier, matière de base produit chimique et pétrochimique, ciment, engrais, sucre, industrie de non-métal, et d'autres industries. A la suite des analyses sectorielles, le sous – secteurs chimique et pétrochimique et, le sous-secteur, sidérurgique semblent être les plus efficaces en terme d'énergie et d'exergie respectivement. Les efficacités d'utilisation d'énergie pour le secteur industriel global turc s'étendent de 63.45% à 70.11%, alors que les efficacités d'utilisation d'exergie varient de 29.72% à 33.23% en années analysées. Le potentiel d'amélioration exergétique pour ce secteur est également déterminé à être 681 PJ en 2003, avec un taux d'augmentation moyenne de 9.5% annuellement pendant les années analysées.

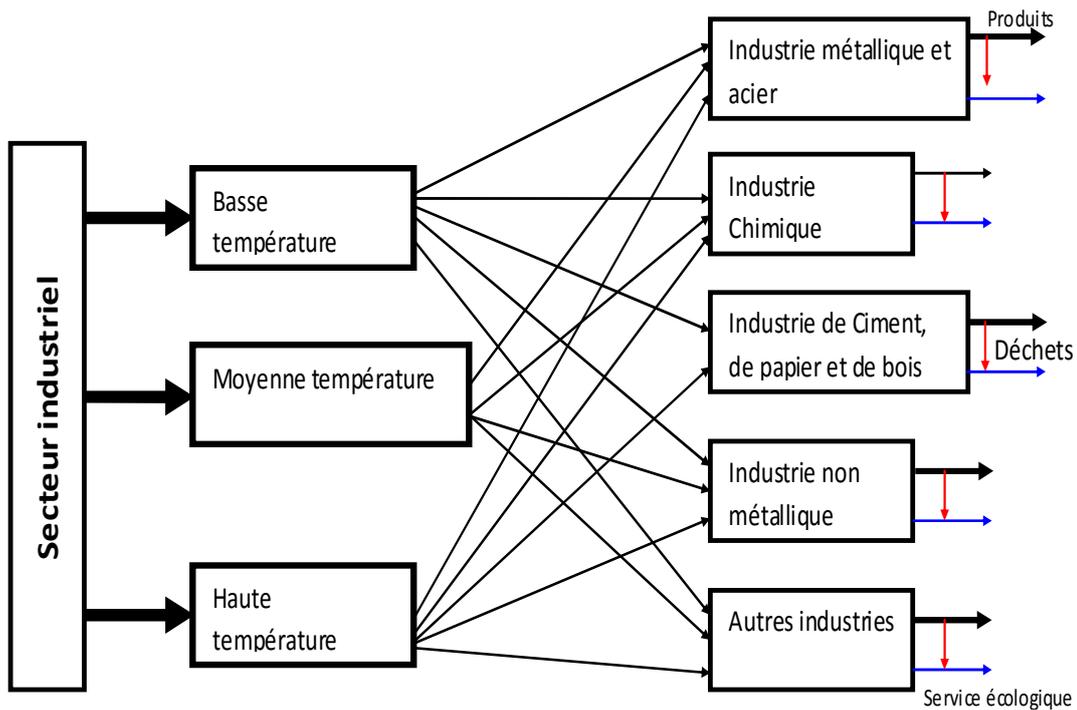


Figure 5: Flux énergétique dans le secteur industriel

- L’Afrique du Sud par Oladiran et Meyer (2009). L’utilisation de l’énergie a été analysée sur une période de 10 ans (1994 – 2003) sur le secteur industriel. Cette étude est faite sur quatre sous – secteurs (sidérurgies, industries extractives, industries chimiques et pétrochimiques et autres industries). Des données d'utilisation primaire-énergie ont été employées pour calculer les différents rendements énergétiques et exergétiques pour les sous-secteurs et alors des valeurs globales pour le secteur industriel ont été obtenues. Les résultats indiquent que le rendement exergétique est considérablement inférieure au rendement énergétique dans tous les sous-secteurs, en particulier dans les mines les processus et d'extraction en carrière, pour lesquels les valeurs étaient approximativement 83% et 16%, respectivement
- Les USA par Al-Ghandoor et al. (2010). Le secteur industriel des USA est analysé suivant 14 sous – secteurs pendant l’année 2002. Les données utilisées pour ce travail ont été collectées par la Manufacturing Energy Consumption Survey (MECS). Les différents rendements énergétiques et exergétiques ont été estimés autour de 63.5% et 38.8% respectivement.

II-3-4- Analyse du secteur Agricole

Les pertes thermo-dynamiques ont lieu habituellement dans les machineries utilisées pour des activités agricoles. Par conséquent, il est important d'identifier et de mesurer les pertes afin de concevoir des stratégies ou des politiques pour les réduire.

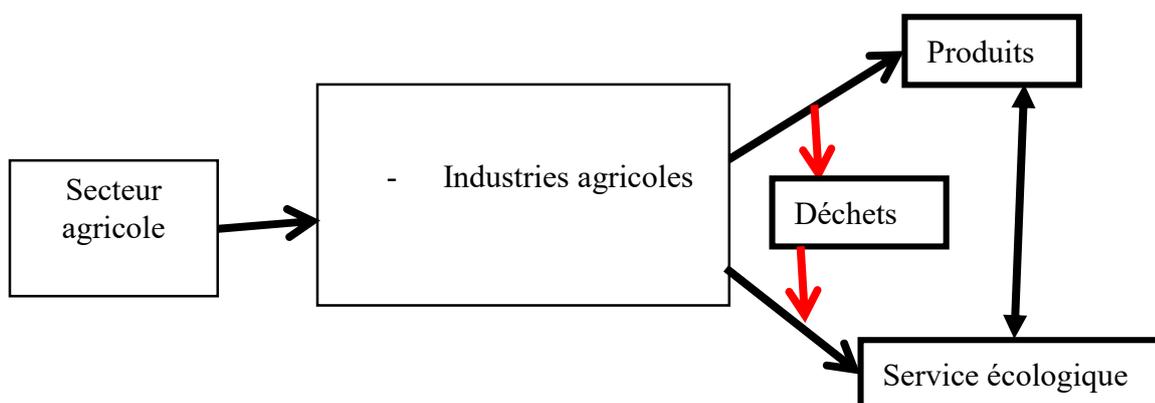


Figure 6: Flux énergétique dans le secteur agricole

Source de ravitaillement en alimentation, l'agriculture est un secteur très important dans un pays dont on ne saurait négliger l'apport dans l'économie. Il va de soi qu'une bonne gestion de ce secteur entraîne également un apport considérable dans l'évolution du pays. Car sa contribution dans le PIB (Produit Intérieur Brut) des pays n'est pas à négliger. Son flux énergétique est représenté par la figure 6.

L'analyse exergétique du secteur agricole n'est pas encore suffisamment explorée. C'est le secteur qui est encore en plein essor (Saidur et al. 2011). Les travaux que nous pouvons citer dans ce secteur sont ceux menés en :

- Arabie Saoudite par Dincer et al. (2005). L'analyse du secteur agricole de l'Arabie Saoudite est présentée pour une période de 12 ans (1990 – 2012). Elle est faite pour deux sous – secteurs (tracteurs et pompes) avec deux principales sources d'énergies ; le diesel pour les tracteurs et l'électricité pour les pompes.
- Malaisie par Saidur et al. (2011). Dans la quête perpétuelle de l'amélioration des conditions de vie meilleures, le secteur agricole malaisien s'est vu analysé via les études énergétiques et exergétiques. Ce secteur est caractérisé par l'utilisation de l'essence, le diesel et le fioul pour le fonctionnement des machines. La moyenne des rendements

énergétique et exergétiques de ce secteur se sont avérées 22% et 20.728%, respectivement, au cours de la période de 1991 à 2009.

- Chine par Nan Li et al. (2012) et Chen et al. (2009). La mécanisation de l'agriculture est un facteur important au développement de l'agriculture en Chine. Trouver un moyen de rehausser tout en contrôlant l'utilisation de l'énergie dans ce secteur sans toutefois affecter négativement l'économie du pays est devenu un challenge. C'est ainsi que Nan Li et al. (2012) font une analyse sur les facteurs qui influencent la consommation du diesel dans le secteur agricole chinois pendant les années 1996 à 2010. Sept sous-secteurs agricoles, quinze catégories des machines agricoles et cinq opérations de ferme sont considérés. Les résultats prouvent que l'affermage et le transport sont les deux plus grands consommateurs diesel, comptabilité pour 86.23% de la consommation diesel totale dans l'agriculture en 2010. Le progrès technologique a mené à une diminution de la consommation diesel et à une augmentation de la productivité de toutes les machines, et il reste beaucoup de potentiel pour le futur progrès.

II-3-6- Analyse des autres secteurs

Le secteur tertiaire ici regroupe les bâtiments administratifs, les hôpitaux, les marchés et supermarchés... Bien que ce secteur ne soit pas de prime abord mis en exergue, il représente une part importante dans la gestion des énergies. Dans ce secteur la consommation des trois sources d'énergie est retrouvée. Son flux énergétique est donné par la figure 7.

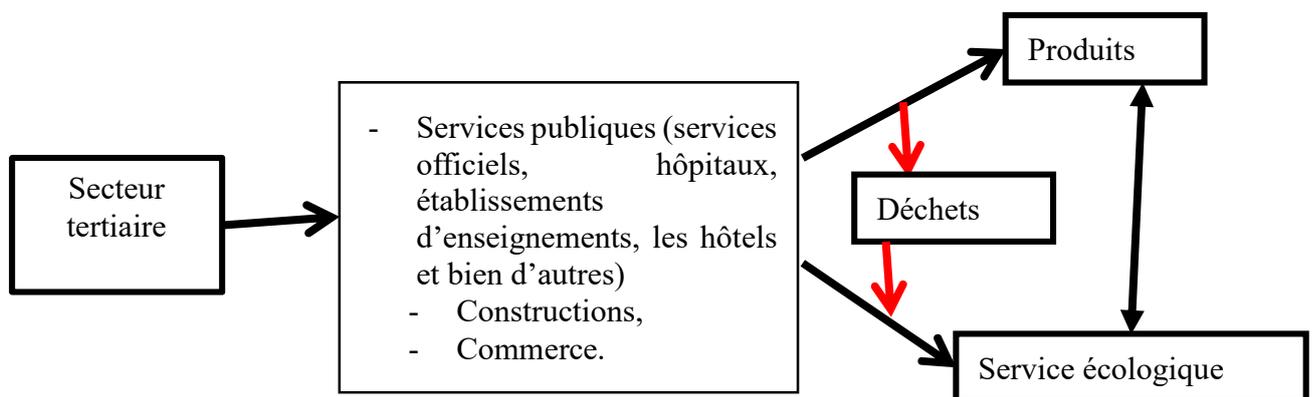


Figure 7: Flux énergétique dans les autres secteurs

Dans la littérature, plusieurs travaux dans ce secteur ont été menés. C'est ainsi que nous retrouvons l'analyse faite en :

- Arabie Saoudite par Dincer et al. (2004b). Le secteur public et privé de l'Arabie Saoudite est analysé pendant les années 1990 à 2001 afin de déterminer les différents rendements énergétiques et exergétiques. Ces différents rendements sont alors présentés à travers des organigrammes représentant les flux d'énergies dans ces différents secteurs (gouvernement, éclairage des rues, les mosquées, les hôpitaux, les associations, et les centres commerciaux). De ces analyses, il en ressort que le sous-secteur hôpital est le plus efficace en terme d'énergie et le gouvernement l'est en terme d'exergie.
- Grèce par Xydis et al. (2007). Ces derniers se sont intéressés à l'efficacité énergétique et exergétique dans les bâtiments plus précisément dans deux hôtels. Ca selon des facteurs comme l'utilisation du bâtiment, le type de construction, l'entretien, le chauffage existant, les systèmes de refroidissement et d'éclairage et d'autres types de services, la consommation d'énergie dans les bâtiments change de manière significative. Ainsi, l'information spécifique disponible sur les caractéristiques d'énergie, l'exécution thermique, les déperditions d'énergie, les charges électriques, et les états de confort jouent un rôle significatif pour le développement soutenable des systèmes de l'hôtel.
- Jordanie par Al – Ghandoor et al. (2011). La présentation d'utilisation d'énergie et d'exergie dans le secteur de service de la Jordanie est faite pendant les années 2007-2011. Elle a été conduite et basée sur de vraies données obtenues à partir des générateurs principaux en Jordanie. Les efficacités globales d'énergie et d'exergie, pour le secteur de service entier, s'avèrent dans la gamme de 35.1 à 38.1%.
- Portugal par Gonçalves et al. (2012). Toujours dans l'idée d'améliorer le confort thermique dans les bâtiments, Gonçalves et al. se sont penchés sur des moyens pouvant réduire la consommation énergétique dans des hôtels au Portugal.

II-4-Exergie des systèmes industriels

Le bilan énergétique est la méthode de base de l'enquête d'un système. Il rend l'analyse de l'énergie possible. La recherche des voies et moyens pour l'amélioration du processus, est la clé de l'optimisation et est également la base à l'élaboration du bilan exergétique.

II-4-1 Terminologie des bilans énergétiques et exergétiques

L'analyse des résultats du bilan énergétique permet de savoir si l'énergie est utilisée de façon efficace dans la région étudiée. Elle permet également de faire une comparaison entre les valeurs théoriques, valeurs mesurées sur les installations présentes dans la région considérée,

et les installations les plus récentes (nouvelles technologies) (Ivar S. Ertesvag, et M. Mielnik, 2000). L'analyse utilise le concept d'énergie et sa conservation. Les formes d'énergie peuvent être exprimées en enthalpie, énergie interne, l'énergie chimique, le travail, la chaleur, électricité. Grâce à l'analyse, on établira également la priorité des processus nécessitant un examen plus approfondi, soit en raison de leurs consommations d'énergie excessive, ou en raison de leurs rendements particulièrement faibles. L'exergie d'une forme d'énergie ou d'une substance est une mesure de son utilité ou de la qualité ou le potentiel de provoquer un changement ou une amélioration. L'exergie est définie comme le travail maximal, qui peut être produit, par un système ou un courant de matière ou d'énergie et il s'agit de l'équilibre avec un environnement de référence spécifiée. Contrairement à l'énergie, l'exergie n'est conservée que pendant le processus idéal et détruit en raison des irréversibilités dans les processus réels (Ertesvag, M. et Mielnik, 2000). Le concept exergie a été introduit pour surmonter les limitations de l'analyse énergétique. L'exergie exprime la valeur pratique de toute substance (ou toute question terrain, par exemple, un rayonnement de chaleur), et est défini comme une capacité maximale de cette substance à effectuer des travaux par rapport à l'environnement humain. Le travail disponible qui peut être extrait à partir d'une source d'énergie dépend de l'état des abords de la source. Plus grande est la différence entre la source d'énergie et de ses environs, plus grande est la capacité à extraire le travail du système. L'analyse exergetique est la méthode thermodynamique moderne utilisée comme outil de pointe pour l'évaluation du processus d'ingénierie. Alors que l'analyse énergétique est basée sur la première loi de la thermodynamique, l'analyse exergetique est basée sur la première et la deuxième loi de la thermodynamique. En outre, les deux analyses utilisent le bilan matière pour le système considéré. L'analyse et l'optimisation d'un processus physique ou chimique, en utilisant les concepts d'énergie et d'exergie, peut fournir deux points de vue différents du processus considéré.

II-4-2-Des études antérieures sur l'évaluation de l'énergie sectorielle et à l'utilisation exergie

Szargut (1998) est le premier scientifique introduisant la consommation d'exergie cumulatif et le degré de perfection cumulatif pour les procédés industriels et de faire la distinction entre l'efficacité deuxième loi (efficacité exergetique ou de l'efficacité rationnelle) et le degré de perfection cumulatif pour les procédés industriels. Toutefois, Kotas (1995), a suivi une approche similaire dans différents procédés industriels. Wall (1986), a présenté les flux d'exergie pour une usine de pâte et de papier et une usine d'acier en établissant les flux d'énergie dans les processus et l'élaboration des pertes d'exergie. En ce qui concerne les études

réalisées sur l'analyse de la Turquie (secteur commercial, résidentiel, industriel et des transports) à ce jour, dix-sept études ont été réalisées. Parmi elles, seize ont suivi l'approche de Reistad, à l'exception d'Ozdogan S, et Arikol M. (1995). La méthodologie utilisée dans cette étude pour analyser l'énergie sectorielle de la Turquie et l'utilisation exergie est similaire à celle de Rosen et Dincer (1997), qui a également utilisé l'approche Reistad avec plusieurs différences mineures. Cependant, l'effet de la variation des températures de références sur les analyses exergetiques ont suscité des interrogations qui ont été les causes de plusieurs recherches.

II-4-3- Définitions de l'état de référence

Afin de quantifier l'exergie d'un système, nous devons spécifier à la fois le système et l'environnement. L'environnement de référence exergetique est utilisé pour normaliser la quantification de l'exergie (Z. Utlu, H. et Arif, 2007). La température de l'environnement est supposée être uniforme à T_0 , et la pression est supposée être uniforme à P_0 (Température et pression atmosphérique). Certaines valeurs de l'énergie et de l'exergie dépendent des propriétés intensives de l'état de référence (environnement). Par conséquent, les résultats des analyses énergétiques et exergetiques sont généralement sensibles aux variations de ces propriétés. Les études sur les impacts de l'état de référence sur l'énergie sont encore en évolution. En effet, Wepfer et Gaggioli ont souligné que les analyses d'exergie dans les usines de fabrications de produits chimiques, sont souvent relativement insensibles aux variations de T_0 and P_0 (Wepfer et Gaggioli, 1980). Beaucoup ont supposé que de petits changements raisonnables dans l'environnement ont peu d'effet sur la performance d'un système donné. La définition de l'état de référence de l'analyse exergetique a été étudiée par Krakow (1988). Il a indiqué que l'analyse exergetique a été une comparaison implicite de la performance des systèmes thermiques réels avec la performance d'idéal, réversibles systèmes thermiques.

Dans les études antérieures menées dans ce domaine, de nombreux auteurs ont utilisé comme valeur unique de la température, les valeurs de 20°C ou 25°C . L'état de référence est normalement sélectionné pour être assimilé à l'environnement (température ambiante et pression atmosphérique). Habituellement P_0 et T_0 sont choisies pour être de 100kPa et $273,15-323,15^{\circ}\text{K}$, et la composition chimique est considérée comme étant similaire à celle de la région accessible de la croûte de la terre (Utlu, A. et Hepbasli, 2008).

II-5-Exergie et énergie

Le tableau 1 présente une étude comparative de l'énergie et l'exergie. Elle nous montre les divergences et les ressemblances.

Tableau 1: Comparaison de l'énergie et l'exergie. (Dincer, 2002)

Energie	Exergie
Dépend uniquement des paramètres de la matière, et indépendante des paramètres de l'environnement. A des valeurs différentes de zéro (égale à conformément mC^2 dans l'équation d'Einstein).	Dépend à la fois les paramètres de la matière et des paramètres de l'environnement. Est égale à zéro dans un système en équilibre avec l'environnement.
Est guidée par la première loi de la thermodynamique pour tous les processus.	Est guidée par la première loi de la thermodynamique uniquement dans des processus réversibles. Dans les processus irréversibles, elle est détruite partiellement ou totalement.
Est limitée par la seconde loi de la thermodynamique pour tous les processus (y compris ceux réversibles). Est le mouvement ou la capacité de produire du mouvement. Est toujours conservée dans un processus, ne peut donc être ni détruite ni produite. Est une mesure de quantité.	Ne se limite pas aux processus réversibles en raison de la seconde loi de la thermodynamique. Est un travail ou sa capacité à produire un travail. Est toujours conservée dans un processus réversible, mais elle est toujours consommée dans un processus irréversible. Est une mesure de la quantité et la qualité en raison de l'entropie.

III- SITUATION DE L'ENERGIE AU CAMEROUN

III-1-Présentation du Cameroun

III-1-1 Présentation géographique

Avec une superficie de $475\ 650^2\ km^2$, le Cameroun est situé dans l'hémisphère nord, légèrement au-dessus de l'équateur ; il s'allonge sur 1200 km (du Sud au Lac Tchad) du 2^{ème}

au 13^{ème} degré de latitude Nord et s'étale sur 800 km (de l'Est à l'Ouest) du 9^{ème} au 16^{ème} degré de longitude Est. Le Cameroun est subdivisé en dix régions abritant toutes des arrondissements et des départements.

Il est caractérisé par sa diversité culturelle, climatique et topographique qui lui vaut le nom d' «Afrique en miniature ». En effet, il renferme plus de 208 ethnies aussi dynamiques les unes que les autres et vivant sous un climat qui varie du type sahélien dans la partie septentrionale au type guinéo-soudanien au Sud. A chacun de ces types de climat correspond une formation végétale allant des steppes au Nord aux forêts denses dans le Sud, en passant par les différents types de savanes à l'Ouest et dans le Centre. S'agissant du relief, les basses terres du Nord et de l'intérieur du pays sont plus étendues que les plaines côtières. Entre ces deux ensembles s'érige une succession de hautes terres et montagnes dont le plus haut est le Mont Cameroun (4095 m). Au Sud se déploie le vaste plateau sud-camerounais, d'une altitude moyenne de 700 mètres. Ces différentes formes de relief influencent significativement la mise en valeur du sol, l'aménagement du territoire et la répartition des potentiels énergétiques.

III-1-2- Végétation et climat

Grâce à sa position géographique, le Cameroun est marqué par une diversité de climats et de végétations associées qui sont généralement regroupés comme suit :

- Climat soudano-Sahélien à l'extrême-nord (précipitations annuelles d'environ 650 mm) ;
- Climat tropical humide au nord (précipitations annuelles d'environ 1200 mm) ;
- Climat équatorial de type de mousson humide à l'ouest et sur le littoral (précipitations annuelles comprises entre 1200 et 6000 mm) et celui de type guinéen au centre et au sud (précipitations supérieures à 6000 mm).

Cameroun

Villes, communications et relief



Figure 8 : Relief du Cameroun

III-1-3- Relief et hydrologie

La diversité du relief (figure 8), de l'hydrologie et du climat et l'immensité de la végétation sont à l'origine des potentiels énergétiques abondants en matière d'énergies renouvelables et d'hydro-électricité. Le tableau 2 nous donne un aperçu global du potentiel énergétique camerounais

Pour rendre efficient la politique de gestion des ressources énergétiques, le Cameroun a établi des textes et lois régissant le cadre législatif et institutionnel du secteur de l'énergie.

Dans la suite, nous essayerons de présenter (pas de façon exhaustive) les différentes institutions et lois qui régissent le secteur de l'énergie au Cameroun.

Tableau 2: Présentation des ressources énergétique du Cameroun

Source d'énergie	Potentiel
Pétrole brut	30 millions de tonnes (SIE-Cameroun, 2011).
Gaz	à 6,6 TCF soit environ 186 Milliards de m ³
Hydro-électricité	Second potentiel hydroélectrique d'Afrique (19,7 GW de potentiel technique équipable pour un productible de 115 TWh/an)
Bois-énergie	Potentiel forestier d'environ 21 millions d'hectares
Energie solaire	Insolation moyenne de 4,9 kWh/m ² /j pour l'ensemble du pays

III-2-Secteur de l'énergie électrique

Le Cameroun possède le second potentiel hydroélectrique d'Afrique (19,7 GW de potentiel techniquement équitable pour un productible de 115 TWh/an) aujourd'hui valorisé à moins de 5% (moins de 1000 MW de puissance installée en 2008) (SIE-Cameroun, 2009). Cependant, la production d'électricité reste toujours fortement dominée par les centrales hydroélectriques, soit environ 76% de la production totale en 2006 (Nkué et Njomo, 2009). Les auto-producteurs marquent de manière significative la production d'électricité au Cameroun avec une contribution d'environ deux fois supérieures à la production des centrales thermiques ENEO (Tamba, 2013)

La production de l'énergie électrique publique au Cameroun est assurée par les centrales hydroélectriques et thermiques d'AES Sonel (aujourd'hui ENEO). La capacité totale installée en 2009 est de 1022 MW (SIE-Cameroun, 2010). La production autonome de l'énergie électrique est de 535 MW en 2009 dont 488 MW en onshore et 47 MW en offshore (fonctionnant exclusivement au gaz) (SIE-Cameroun, 2010). Ainsi, la structure du parc électrique du Cameroun en 2009 est de 1558 MW. Le **Tableau 3** montre le parc de production hydraulique et thermique d'AES Sonel. Cependant, le réseau de transport de l'énergie électrique du Cameroun est long de plus de 27.700 km et est reparti en basse tension (BT), en moyenne tension (MT) et en haute tension (HT) (AES Sonel, rapport d'activité 2007).

Tableau 3: Parc de production électrique d’AES Sonel

Réseau interconnectée	Hydroélectrique (puissance installée)	Production thermique	Barrage de retenu d’eau
Sud	Edea : 263 MW	Yassa : 85,35 MW	
	Song Loulou : 394 MW	Limbe : 85 MW	
		Oyomabang : 35 MW	
		Bassa : 20 MW	Mbakaou : $2,6 \cdot 10^9$ m ³
		Logbaba : 18 MW	Mapé : $3,2 \cdot 10^9$ m ³
		Bafoussam : 14 MW	Bamendjin : $1,8 \cdot 10^9$ m ³
Nord	Lagdo : 72 MW	Djamdoutou : 17 MW	
Est	-	Bertoua : 8,6 MW	
Total	729 MW	197,6 MW	

Source : (Tamba, 2013)

Il ressort de ce tableau que la source d’énergie hydraulique est prépondérante dans la production électrique du pays. Ici nous n’avons pas mentionné la part réservée aux autoproducteurs dans le secteur thermique, qui représente plus du tiers de la puissance totale installée et, reflète la volonté des industriels et des populations à s’alimenter elles-mêmes en énergie électrique au travers des groupes électrogènes pour se prémunir des insuffisances de fourniture en électricité publique ou la substituer dans les zones non encore couvertes par le réseau.

III-3-Secteur des hydrocarbures

Le Cameroun possède un potentiel modeste en ce qui concerne les hydrocarbures. Les réserves prouvées de pétrole brut sont d’environ 30 millions de tonnes (SIE-Cameroun, 2011). Au rythme actuel de la production (3,3 millions de tonnes métriques en moyenne par an), le Cameroun ne disposerait que de sept ans de production pétrolière (Tamba, 2013). Si de nouveaux gisements de pétrole ne sont pas découverts, le Cameroun sera fortement dépendant des importations de pétrole à l’horizon 2030. Néanmoins, de nouveaux permis ont été accordés, notamment dans la zone frontalière du lac Tchad, dans l’offshore du Sud-ouest et du Wouri. Il ne faut pas oublier que des recherches sont entreprises dans le bassin du Rio Del Rey (Ndian River), situé en partie dans la zone de transition à l’Est de la presqu’île de Bakassi qui serait potentiellement riche en brut léger. Le pétrole camerounais est lourd, et n’assure qu’environ 10% à 15% des approvisionnements de la SONARA (Société National de Raffinage). Ainsi, la majeure partie du pétrole brut raffiné par cette structure est importée, notamment du Nigeria, pays voisin disposant d’un pétrole brut léger. La SONARA a entrepris à l’heure actuelle un processus d’extension et de modernisation de ses unités afin d’augmenter sa capacité nominale

de raffinage et de raffiner le pétrole brut camerounais (Metouck, 2008). L'évolution croissante de la consommation actuelle en produits pétroliers fait en sorte que la raffinerie du Cameroun fonctionne à plus de 98,9% de sa capacité nominale (Metouck, 2008).

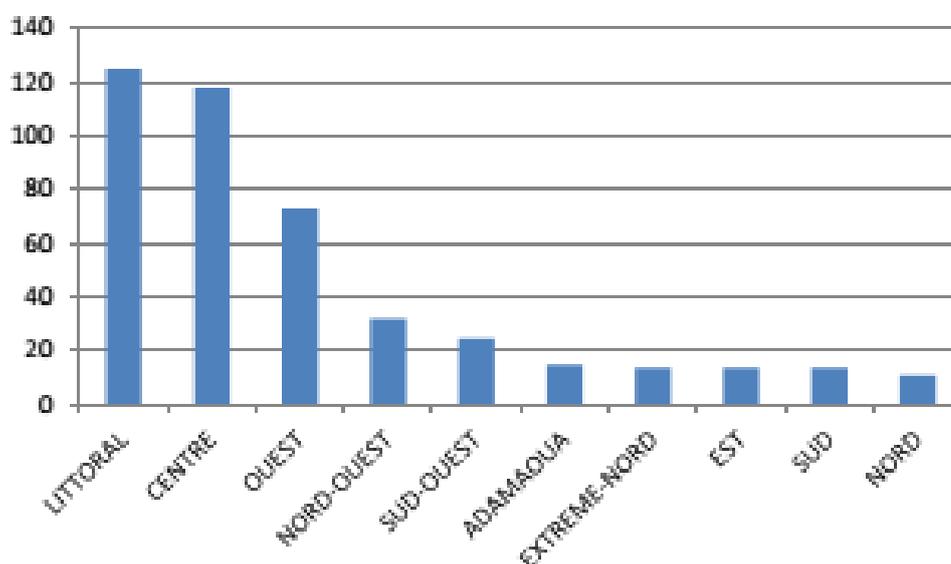


Figure 9: Répartition des stations-services par marketers en 2009 (Source : Tamba, 2013)

Le Cameroun possède également un potentiel en gaz naturel ; aujourd'hui, il est estimé à environ 186 milliards de m³ (SIE-Cameroun, 2011).

Les infrastructures de secteur des hydrocarbures comprennent :

- Une raffinerie, la SONARA, localisée à Limbe située dans la région du Sud-ouest d'une capacité annuelle de traitement de 2 100 000 TM de pétrole brut ; cette raffinerie en cours de modernisation, améliorera sa complexité et augmentera sa capacité de raffinage à 3 500 000 TM.
- Treize (13) dépôts pétroliers implantés dans certaines localités (SCDP, 2009) : Douala (Bonabéri, Bessengué, Mboppi, Déido, Port de pêche), Yaoundé (Nsam, Mvolyé, Olézoa), Bafoussam, Bélabo, Ngaoundéré, Garoua et Maroua ;
- 441 stations-services au 31 décembre 2009 (SIE-Cameroun, 2010), réparties par marketers comme l'indique la Figure 9.

III-4-Secteur des énergies renouvelables

La forêt, la steppe et la savane constituent les principales sources de la biomasse. Deuxième réserve dans le bassin de la République du Congo, le Cameroun possède un potentiel forestier d'environ 21 millions d'hectares qui compte plus de 300 essences (SIE-Cameroun 2009). Les forêts du Cameroun sont sources de bois-énergie pour la grande majorité de la

population rurale et urbaine. Elles se réduisent cependant à un rythme supérieur à 100.000 ha/an (Nkué et Njomo, 2009) du fait d'une exploitation industrielle de bois d'œuvre (meubles, construction des maisons) mal contrôlée et de l'agriculture sur brûlis. Le potentiel brut de biomasse ligneuse disponible dans les industries de première transformation varie entre 496.411 et 805.703 tonnes (Tchouate, 2003). En tenant compte des utilisations actuelles, ce potentiel est réduit au tiers environ (entre 176.663 et 301.862 tonnes) (Tamba, 2013).

En ce qui concerne l'énergie solaire, le Cameroun dispose d'un potentiel abondant et disponible surtout dans sa partie septentrionale. Mais son exploitation reste encore en deçà de son potentiel réel. L'insolation moyenne dans la partie nord du pays est de 5,8 kWh/m²/j (Njomo, 1988). Dans la partie sud, cette insolation moyenne est de 4 kWh/m²/j. Ainsi, on observe une insolation moyenne de 4,9 kWh/m²/j pour l'ensemble du pays. Le potentiel éolien au Cameroun est plutôt faible pour des besoins de production d'énergie. Les vitesses de vent observées sur l'ensemble du territoire atteignent difficilement la valeur minimale de 5 m/sec, mais on trouve régulièrement dans les régions du Nord et de l'Extrême-nord des vitesses de vent de l'ordre de 4 à 4,6 m/s (Nkué et Njomo, 2009). En géothermie, le Cameroun dispose d'un certain nombre de sites sur l'ensemble du territoire. Cependant, l'exploitation de ces ressources n'est pas encore envisagée.

Les infrastructures des énergies renouvelables restent peu connues dans l'ensemble. Bien que le bois-énergie soit de loin l'énergie la plus consommée au Cameroun, sa gestion est totalement informelle malgré l'importance de son chiffre d'affaire. La production de bois de chauffe est principalement assurée par un certain nombre de producteurs que nous pouvons classer suivant les modes et les outils de production, de transport, de conditionnement, de distribution et de leur implication dans la vente au consommateur final. L'on distingue donc : les producteurs du village, les propriétaires des plantations, les petits producteurs, les producteurs moyens et les grands producteurs (Mboumboue, 2009).

III-5- Demande énergétique au Cameroun

De par sa situation économique (pays en développement), le système énergétique du Cameroun dépend fortement des énergies traditionnelles et par conséquent il est moins performant. Au Cameroun, la demande en énergie reste encore insatisfaite et le taux d'accès aux énergies modernes est très faible. Il est de l'ordre de 15% pour l'électricité et de 18% pour le gaz domestique en moyenne dans l'ensemble du territoire national. En outre, l'accès à

l'électricité est inférieure à 5% dans les zones rurales contre 50% environ dans les zones urbaines (Nkué et Njomo, 2009).

La consommation d'énergie peut être définie comme la quantité d'énergie disponible pour l'utilisateur final. Elle ne prend pas en compte les pertes de distribution et les énergies consommées comme matière première pour produire une autre forme d'énergie (SIE-Cameroun, 2011). Au Cameroun, la consommation du bois-énergie en 2010 a représenté 73 % de la consommation totale d'énergie, l'électricité 7 % et les produits pétroliers 20 %. Bien que la consommation de bois pose énormément de problèmes sur le plan environnemental et sanitaire, cette ressource énergétique reste la plus consommée au Cameroun. Par secteur d'activité, le secteur résidentiel se démarque comme le secteur consommant le plus d'énergie 70 % ensuite, viennent les secteurs du transport autres secteurs et industriel avec respectivement 15 %, 9 %, et 6 %. Ceci traduit justement le faible état économique du pays car le développement passe par une forte industrialisation.

Les produits énergétiques modernes (produits pétroliers et électricité) représentent en 2009 en termes de consommation 1.018 ktep et 401 ktep respectivement (SIE-Cameroun, 2010). Le secteur du transport consomme plus de la moitié des énergies modernes. Le transport routier tout seul en consomme 95,8% de part des énergies destinées au secteur du transport et 4,2% pour les autres transports (ferroviaire, aérien, maritime et pipeline).

Le gaz pétrole liquéfié (GPL) est essentiellement consommé par le secteur résidentiel (ménages et hôtels). De l'année 2001 à l'année 2009, la consommation du GPL est passée de 33.700 TM à 50.890 TM, soit une augmentation de près de 51% (SIE-Cameroun, 2010). Et malgré cela, la demande n'est toujours pas satisfaite (Tamba, 2013).

En 2009 dans le secteur industriel, l'énergie la plus consommée est l'électricité (95,59%) (SIE-Cameroun, 2010). La consommation totale d'électricité présente une allure dominée par l'énergie livrée en HT à quatre industries (Alucam, Socatral, Cimencam et Cicam) grosses consommatrices d'énergie appelées clients spéciaux du distributeur AES-Sonel. Leur part dans la consommation d'électricité en 2006 s'est élevée à 124 ktep (1.439 GWh), soit 42% de la consommation finale d'électricité (Nkué et Njomo, 2009).

De 2001 à 2010, la consommation finale d'énergie est passée de 4488,86 10^3 ktep à 5722,52 10^3 ktep. Cependant, la consommation finale d'énergie par habitant (hab) en 2010 est de 0,30 tep/hab au Cameroun, ce qui est inférieur à la moyenne africaine de 0,49 tep/hab et à la moyenne mondiale de 1,26 tep/hab (SIE-Cameroun, 2011).

Conclusion

Rendu au terme de ce chapitre, il a été question pour nous de présenter les notions d'énergie, et d'exergie, de faire une revue de la littérature sur les travaux effectués dans ce domaine, et enfin de présenter le Cameroun avec son grand potentiel énergétique. Nous pouvons constater que, les études énergétiques et exergetiques bien que différentes, ont toutes les deux le même but à savoir l'amélioration de l'efficacité d'un système. Mener de telles analyses dans différents secteurs d'activités serait bénéfique pour tout système (pays) qui se voudrait mener une politique de développement soutenable, car celles-ci décèlent les lieux de pertes énergétiques et permettent de les améliorer.

Au terme de cette revue bibliographique le constat selon lequel une telle étude n'a pas encore été menée pour le Cameroun et donc, l'application d'une telle participera à l'amélioration de l'utilisation de l'énergie et participera au développement du Cameroun.

Dans la suite de nos travaux (chapitre II et III), nous allons respectivement présenter la méthodologie utilisée pour effectuer notre travail, et aussi appliquer ce travail dans les différents secteurs d'activité du Cameroun (transport, résidentiel, agricole et tertiaire).

CHAPITRE II : METHODOLOGIE ET MATERIEL

La réalisation d'une telle étude ne saurait être faite sans une présentation de la méthodologie utilisée. C'est ainsi que nous présenterons dans ce chapitre la méthodologie utilisée pour la réalisation de ce travail. Elle est en effet basée sur les principes de la thermodynamique :

- Les études énergétiques étant basées sur le premier principe
- Les études exergétiques quant à elle sont basées sur le second (suites aux limites du premier principe).

La suite de ce chapitre est l'application à l'étude des systèmes thermodynamiques (pays, systèmes industriels...)

I-RAPPELS DE QUELQUES PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE

I-1-Premier principe

Enoncé : À tout système thermodynamique fermé (S) est associée une fonction d'état E appelée énergie. Au cours d'une transformation quelconque, la variation de E est égale à l'énergie reçue (positive si elle effectivement reçue, négative si elle est effectivement cédée) par le système de la part du milieu extérieur.

Le premier principe est donc un principe de conservation. Le premier principe s'écrit (Borel, 1991) :

$$E_{finale} - E_{initiale} = \Delta E \text{ avec } E = E_c + E_p \quad \text{II-1}$$

Où ΔE est positive si elle est effectivement reçue par le système, et négative si elle est effectivement fournie par le système. E_c est l'énergie cinétique et E_p l'énergie potentielle.

On note généralement (Borel, 1991) :

$$\Delta E = E_{finale} - E_{initiale} \quad \text{II-2}$$

Dans la suite, l'état initial sera marqué par (1) et l'état final par (2).

Dans de nombreux cas (système globalement au repos ou énergie cinétique macroscopique négligeable et sans variation d'énergie potentielle).

$$\Delta E = \Delta(U + E_c + E_p) = \Delta U \quad \text{II-3}$$

L'énergie reçue se décompose en deux formes d'énergie qu'on appelle travail W (c'est le travail défini en mécanique) et transfert thermique ou quantité de chaleur Q (terme supplémentaire par rapport à ce qui a été vu en mécanique).

L'expression du premier principe est donc :

$$\Delta E = Q + W \quad \text{II-4}$$

$$\text{Soit } \Delta E = \Delta(U + E_c + E_p) = W + Q \quad \text{II-5}$$

$$\text{Ou si } E = U \quad \Delta U = Q + W \quad \text{II-6}$$

I-2- Second principe

I-2-1 Nécessité d'un second principe. Limites du premier principe

Lorsqu'on écrit pour un cycle $\Delta U = Q + W = 0$ soit $Q = -W$, il semble qu'il y ait équivalence entre Q et W . En particulier, le premier principe peut laisser penser que le moteur ($W < 0$) avec une seule source de chaleur ($Q > 0$) peut exister et qu'il a un rendement égal à 1 puisque $|W| = |Q|$. L'expérience prouve que ce moteur mono – therme n'existe pas.

D'autre part, rien n'interdit dans le premier principe d'inverser le sens d'une machine thermique, c'est-à-dire de pouvoir lui faire décrire un cycle dans le sens horaire ou trigonométrique : autrement dit, d'après le premier principe, il serait possible d'utiliser un réfrigérateur pour faire avancer une voiture.

On s'intéresse maintenant à une réaction chimique comme (Borel, 1991) :



Si on met en présence le dihydrogène et le dioxygène en proportions stœchiométriques et qu'on amorce la réaction, le premier principe appliqué à la chimie dit que l'on récupère un transfert thermique (égal à la variation d'enthalpie du système si la réaction est mono – bar) de 242 kJ.mol⁻¹. On peut alors penser qu'en fournissant la même quantité d'énergie à une mole d'eau, on peut récupérer du dihydrogène et du dioxygène spontanément. On sait bien que c'est impossible, et qu'il faut avoir recours à des procédés plus complexes. Encore une fois, le premier principe ne donne aucune information sur le caractère irréversible de cette réaction.

De ces constatations, il s'avère que Le premier principe est insuffisant pour expliquer ces phénomènes et étudier la notion d'irréversibilité.

I-2-2- Réversibilité – Irréversibilité

Une transformation est dite réversible si une modification infiniment petite des paramètres extérieurs permet d'en inverser le sens.

Une transformation réelle est en général non réversible mais on peut parfois réaliser des transformations réelles dont les états successifs sont très voisins d'une transformation réversible qui apparaît comme une transformation idéale limite. La raison pour laquelle on s'intéresse à des transformations réversibles est que tout d'abord, pour une machine fonctionnant avec de telles transformations qui sont idéales, les pertes sont minimisées et le rendement augmenté. D'autre part, avec le premier principe il est souvent plus aisé de calculer les échanges d'énergie lorsque la transformation est réversible (Borel, 1991).

Ainsi, il arrive bien souvent que l'on fasse l'hypothèse qu'une machine est réversible sachant que le rendement calculé est maximal, le rendement réel étant inférieur au rendement calculé.

Les principales causes d'irréversibilité sont :

- Les frottements solides ;
- Les frottements fluides ;
- Les gradients de concentration ou de température qui donnent lieu aux phénomènes de diffusion ;
- Les réactions chimiques.

I-2-3 Enoncé

Pour un système thermodynamique donné, il existe une fonction d'état S appelée entropie (du grec enuropia entropia signifiant qui revient en arrière). L'entropie possède les propriétés suivantes (Borel, 1991) :

- L'entropie est une grandeur extensive ;
- Lors d'une évolution adiabatique d'un système fermé : $\Delta S \geq 0$;
- Lors d'une évolution quelconque d'un système fermé, on peut décomposer ΔS en

$$\Delta S = S_{\text{échangée}} + S_{\text{créée}} \quad \text{II-8}$$

$S_{\text{échangée}}$ provient des transferts thermiques et $S_{\text{créée}}$ est un terme de création d'entropie qui est toujours positif (transformation irréversible) ou nul (transformation réversible).

L'expression générale de Séch est :

$$S_{\text{échangée}} = \int \frac{\delta Q}{T_{\xi}} \quad \text{II-9}$$

Avec T_{ξ} température de la surface du système.

Il apparaît donc que contrairement au premier principe qui est un principe de conservation, le deuxième principe est un principe d'évolution

I-3- Notion d'exergie

Un travail utile peut être tiré de deux systèmes à des états thermodynamiques différents interagissant entre eux pour arriver à un état d'équilibre. Un système ou une source d'énergie se trouvant à un état différent de l'état de son environnement, produira du travail utile pour arriver à l'état d'équilibre avec ce dernier. Le travail maximal pouvant être tiré de cette interaction entre le système (ou la source d'énergie) et l'environnement est défini comme étant l'exergie disponible dans la source d'énergie (Bejan, 1996).

Afin de mesurer l'exergie d'un système, nous devons tenir compte de l'environnement dans lequel le système se trouve. Ainsi, l'environnement de référence est utilisé pour normaliser la quantification de l'exergie. Dans une analyse on considère l'environnement comme un système incompressible à température et pression constantes T_0 et P_0 . En outre, il est supposé que les propriétés intensives de l'environnement restent inchangées.

Considérons un système qui interagit avec l'environnement. En appliquant la première loi nous avons :

$$\Delta E = Q + W \quad \text{II-10}$$

Puisque l'environnement est à température constante T_0 l'entropie créée est donnée par :

$$S_{\text{créée}} = \Delta S - \frac{Q}{T_0} \quad \text{II-11}$$

En combinant (II-10) et (II-11) nous avons l'expression du travail (Cengel, 2007):

$$W = \Delta E - T \Delta S + T_0 S_{\text{créée}} \quad \text{II-12}$$

$$W = (E_2 - E_1) + T_0 (S_2 - S_1) - T_0 S_{\text{créée}} \quad \text{II-13}$$

Considérant le fait qu'il n'y ait pas de réaction chimique et d'autre interaction, et que l'état final du système est en équilibre avec l'environnement, nous aurons $E_2 = E_0, V_2 = V_0$,

$S_2 = S_0, E_{c_2} = E_{c_0} = 0, E_{p_2} = E_{p_0} = 0$, l'expression du travail devient :

$$W = -(E_{c_1} + E_{p_1}) + (U_0 - U_1) + T_0(S_0 - S_1) - T_0 S_{créée} \quad \text{II-14}$$

L'expression du travail devient maximum lorsque le processus est réversible et $S_{créée} = 0$. Le travail utile et maximum que l'on peut obtenir à partir de ce système en équilibre avec son environnement est appelé exergie (ε) :

$$\varepsilon = -(E_{c_1} + E_{p_1}) + (U_0 - U_1) + T_0(S_0 - S_1) \quad \text{II-15}$$

Considerons le schéma suivant :

L'exergie liée à l'énergie d'écoulement est :

$$\varepsilon_{écoulement} = P_0 V - P_1 V \quad \text{II-16}$$

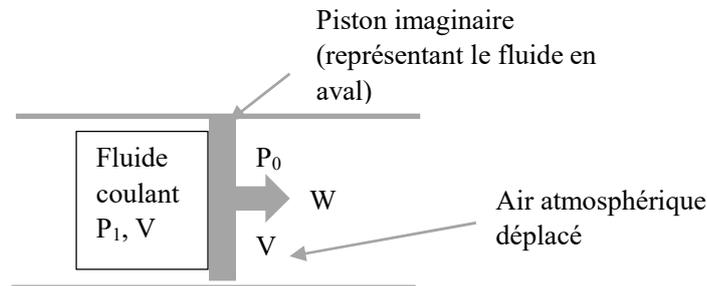


Figure 10: Calcul de l'exergie d'un piston imaginaire. Source : (Cengel, 2007)

$$\text{Or } \varepsilon_{\text{fluide écoulé}} = \varepsilon_{\text{fluide non écoulé}} - \varepsilon_{écoulement}$$

$$\varepsilon_{\text{fluide écoulé}} = -(E_{c_1} + E_{p_1}) + (U_0 - U_1) + T_0(S_0 - S_1) + (P_0 - P_1)V \quad \text{II-17}$$

$$\varepsilon_{\text{fluide écoulé}} = -(E_{c_1} + E_{p_1}) - (U_1 + P_1 V) + (U_0 + P_0 V) + T_0(S_0 - S_1) \quad \text{II-18}$$

En remplaçant $H = U + PV$ (II-18) donne

$$\varepsilon = -(E_{c_1} + E_{p_1}) + (H_0 - H_1) + T_0(S_0 - S_1) \quad \text{II-19}$$

Le terme $(H_0 - H_1) + T_0(S_0 - S_1)$ représente l'exergie physique du système. En analysant de façon particulière la combustion (car source de consommation et de dégagement de

beaucoup d'énergie) en particulier celle des énergies fossiles, plusieurs scientifiques ((Ford, 1975) (Van, 1987)) ont ajouté un terme chimique d'exergie à l'équation ci-dessus. Cette exergie chimique est calculée via un terme appelé facteur (q) de qualité ou d'exergie qui est une valeur associée à la valeur calorifique (H_f) du porteur d'énergie. L'exergie chimique est donnée par (Cengel, 2007):

$$\varepsilon_{ch} = q \times m_f \times H_f \quad \text{II-20}$$

Le facteur de qualité de certaines sources énergétiques est donné en annexe. Ajouté à l'équation (II-19) nous avons :

$$\varepsilon = -(E_{c_i} + E_{p_i}) + (H_0 - H_1) - T_0(S_0 - S_1) + q \times m_f \times H_f \quad \text{II-21}$$

Puisque les écoulements de la masse les plus communs sont des carburants d'hydrocarbure aux conditions proche-ambiantes, pour lesquelles la limite dans les crochets (potentiel, des exergies cinétiques et physiques) dans l'équation (II-20) est approximativement zéro, et l'exergie réduit à l'exergie chimique.

D'autre part, dans les centrales hydroélectriques et éoliennes, les exergies physiques et chimiques sont approximativement zéro en raison des conditions ambiantes très proches de celles de travail. Ainsi, pour les centrales hydroélectriques et éoliennes, l'exergie est réduite aux énergies potentielles et cinétiques respectivement.

Lors d'un transfert d'énergie à température constante T, l'exergie se calcule en appliquant la définition.

$$\varepsilon_q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q \quad \text{II-22}$$

De même l'exergie du travail (qui peut être sous forme d'énergie électrique ou mécanique) est le travail lui-même.

$$\varepsilon_w = W \quad \text{II-23}$$

I-4- Rendement énergétique et exergetique

Au cours de cette étude, les expressions des rendements énergétiques et exergetique seront de la forme :

$$\eta = \frac{\text{énergie output}}{\text{énergie input}} \quad \text{II-24}$$

$$\psi = \frac{\text{éxergie output}}{\text{éxergie input}} \quad \text{II-25}$$

Dans la plupart des processus, l'énergie et d'exergie consommées d'un système peuvent facilement être trouvées, puisque les valeurs d'entrée sont les valeurs de consommation (comme la consommation de l'électricité et de carburant). Mais il est très difficile de déterminer les valeurs produites, qui changent selon l'efficacité de l'équipement utilisé pour le processus. De sorte que les rendements énergétiques soient estimées pour les systèmes complexes et les rendements d'exergétique soient estimés par des relations thermo-dynamiques pour la plupart des processus (Cengel, 2007).

De même, pour la production de l'électricité par les énergies renouvelables (hydrauliques, éoliennes, solaires, biomasse...) l'énergie consommée est véritablement difficile à évaluer, spécialement pour les macros système comme les pays, qui renferment plusieurs différentes centrales. Ainsi, afin de déterminer ces différents rendements, certaines estimations sont faites.

Dans la partie suivante, nous donnerons les expressions de certains rendements pour les processus utilisés au cours de cette étude.

I-4-1- Rendement de quelques procédés.

I-4-1-1 Chaleur

L'électricité et les processus de chauffage du fuel sont pris en compte pour générer la chaleur Q à température constant T . Les rendements énergétiques et exergétique sont respectivement (Cengel, 2007) :

$$\eta_e = \frac{Q}{W} \quad \text{II-26}$$

$$\psi_e = \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_w} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \times \frac{Q}{W} = \eta \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad \text{II-27}$$

$$\eta_f = \frac{Q}{m_f} H_f \quad \text{II-28}$$

$$\psi_f = \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_f} \quad \text{II-29}$$

En utilisant l'expression de l'exergie chimique (II-20) on a :

$$\psi_f = \left(1 - \frac{T}{T_0}\right) \times \frac{Q}{q \times m_f \times H_f} = \frac{\eta}{q} \left(1 - \frac{T}{T_0}\right) \quad \text{II-30}$$

Précisons que pour le facteur de qualité (q) = 1, des relations d'exergie (II-27) et (II-29) sont identiques. Ce qui montre que le facteur de qualité est égale à l'unité pour l'énergie électrique.

D'autre part, pour des processus de chauffage de l'espace et d'eau, la chaleur n'est pas directement employée, elle est plutôt employée par le transfert thermique (Hepbasli, 2005). Le rendement exergetique d'un tel processus est donné par la relation suivante :

$$\psi = \frac{\eta}{q} \left[1 - \left(\frac{T_0}{T - T_0}\right) \ln \frac{T}{T_0}\right] \quad \text{II-31}$$

I-4-1-2 Refroidissement

Les rendements énergétiques et exergetique des dispositifs de refroidissement peuvent être calculés à partir des équations suivantes, où (Q) est la chaleur extraite du réservoir froid, à température T et le COP le coefficient de performance (Cengel, 2007) :

$$\eta = \frac{COP}{100} = \frac{Q}{W} \quad \text{II-32}$$

$$\psi = \eta \left(\frac{T_0}{T} - 1\right) \quad \text{II-33}$$

I-4-1-3 Production d'électricité

Les rendements énergétiques et exergetiques pour la production de l'électricité à partir des énergies fossiles sont respectivement (Cengel, 2007) :

$$\eta = \frac{W}{m_f H_f} \quad \text{II-34}$$

$$\psi = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_f} = \frac{W}{m_f \times q \times H_f} = \frac{\eta}{q} \quad \text{II-35}$$

Pour la plus part des hydrocarbures utilisés dans la production des énergies fossiles, le facteur de qualité est approximativement égale à l'unité d'où la différence entre les rendements énergétiques et exergetiques n'est pas considérable.

D'autre part, comme indiqué plus haut, les centrales hydroélectriques et éoliennes ont pour valeur exergetique les énergies potentielles et cinétiques, leurs rendements énergétiques et exergetiques sont respectivement :

$$\eta = \psi = \frac{W}{\varepsilon_{in}} = \frac{W}{E_{in}} = \frac{W}{E_p} \quad \text{II-36}$$

pour les centrales hydroélectrique et :

$$\eta = \psi = \frac{W}{\varepsilon_{in}} = \frac{W}{E_{in}} = \frac{W}{E_c} \quad \text{II-37}$$

I-4-1-4- Production de travail pour les commandes mécaniques

Dans les industries, l'énergie électrique et l'énergie fossile sont utilisées pour la production du travail mécanique afin d'effectuer les différentes tâches. Les différents rendements énergétiques et exergetiques à cet effet sont (Dincer et al., 2004a) :

$$\eta_e = \frac{W}{W_e} \quad \text{II-38}$$

$$\psi_e = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_{w_e}} = \frac{W}{W_e} = \eta_e \quad \text{II-39}$$

$$\eta_f = \frac{W}{m_f H_f} \quad \text{II-40}$$

$$\psi_f = \frac{\varepsilon_w}{m_f \times q \times H_f} = \frac{W}{m_f \times q \times H_f} = \frac{\eta_f}{q} \quad \text{II-41}$$

I-4-2- Potentiel d'amélioration exergetique

Van Gool (1997) a également noté que l'amélioration maximum du rendement exergetique pour un processus ou système est évidemment réalisée quand la perte ou les irréversibilités ont été réduites au maximum. En conséquence, il a proposé qu'il soit utile d'utiliser le concept de « potentiel d'amélioration exergetique » lors de l'analyse des différents processus ou secteurs de l'économie. Ce potentiel d'amélioration, IP (improvement potential) est donné par la relation (Hammond, 2001) :

$$IP = (1 - \psi)(\varepsilon_{in} - \varepsilon_{out}) \quad \text{II-42}$$

Or $\psi = \frac{\varepsilon_{out}}{\varepsilon_{in}}$ le potentiel devient :

$$IP = \varepsilon_{in} (1 - \psi)^2 \quad \text{II-43}$$

Ou encore,

$$IP = \frac{(1 - \psi)^2}{\psi} \varepsilon_{out} \quad \text{II-44}$$

I-4-3- Calcul du rendement moyen

Le rendement énergétique et exergetique moyen d'un sous-secteur est trouvé en multipliant les différents rendements (énergétique et exergetique) par le ratio d'utilisation d'énergie du secteur en question. Par conséquent, les rendements énergétiques et exergetique moyen de ces sous-secteurs deviennent respectivement (Cengel, 2007) :

$$\eta = \frac{(a_1 \eta_1 + a_2 \eta_2 + \dots + a_n \eta_n)}{100} \quad \text{II-45}$$

$$\psi = \frac{(a_1 \psi_1 + a_2 \psi_2 + \dots + a_n \psi_n)}{100} \quad \text{II-46}$$

Où a_1, a_2 et a_n représente les ratios d'utilisation d'énergie dans les différents sous-secteur, η_1, η_2 et η_n les différents rendements énergétiques, ψ_1, ψ_2 et ψ_n les différents rendements exergetiques de ces sous-secteur.

II- APPLICATION A L'ETUDE DES SYSTEMES

La réalisation d'une étude exergetique ne saurait être effective si le système à étudier n'est pas rigoureusement choisi et délimité, afin de pouvoir identifier toutes les ressources énergétiques présentes et les quantifier.

Pour mieux mener une étude exergetique, il serait judicieux de :

- Scinder le domaine d'étude en système puis en sous-systèmes.
- Identifier les limites, les ressources à l'entrée, les produits et résidus à la sortie (figure 11).

C'est ainsi que le choix de la frontière d'un pays comme la limite du système d'une analyse est très pratique car les données statistiques sont disponibles. Les analyses sont fondées sur les processus qui sont effectivement présents afin d'avoir des données fiables et exactes. C'est ainsi que Dincer (2002) a classé les ressources naturelles par formes de stockage (figure 12).

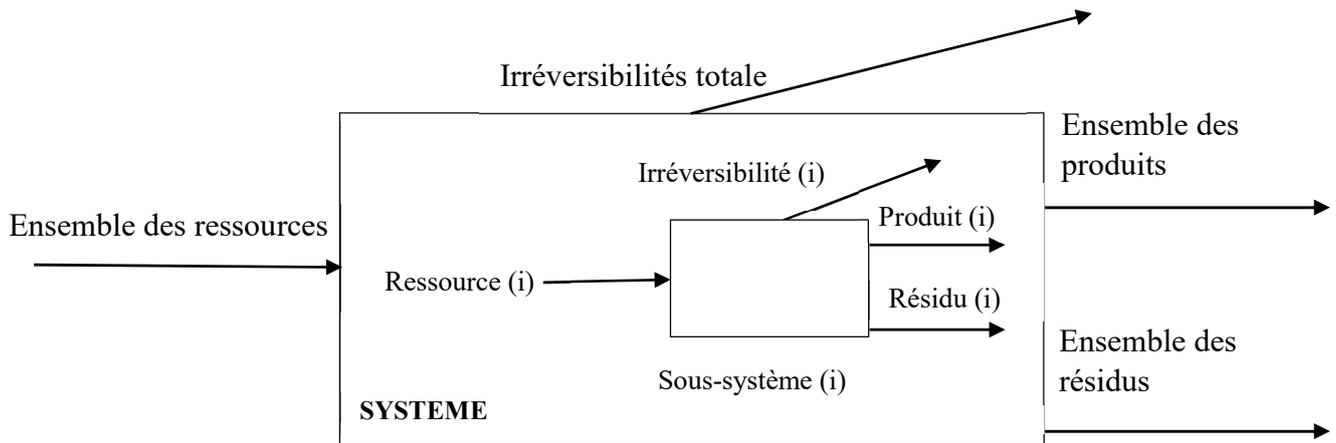


Figure 11: Différente répartition de la zone d'étude. (Tchinda, 2009)

Le contenu exergetique peut être calculé à partir des données énergétiques. En effet nous avons :

$$\text{Exergie contenue dans une ressource énergétique} = \text{Energie} \times \text{Facteur de qualité appliqué à la forme d'énergie en question}$$

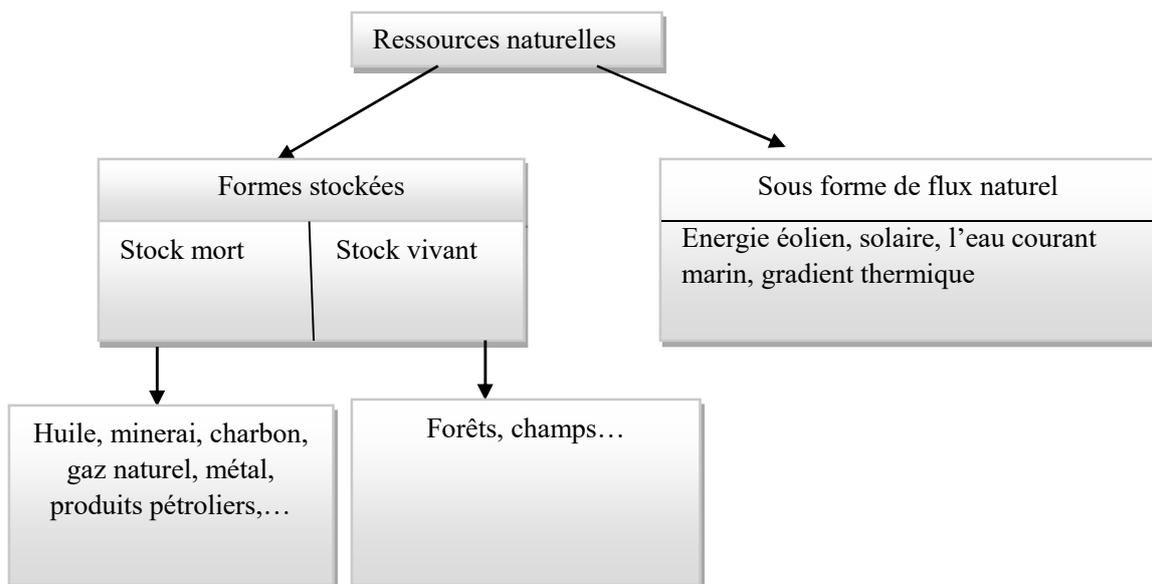


Figure 12: Classification des ressources naturelles par formes de stockage.(Dincer, 2002)

Ces facteurs de qualité (facteur d'exergie) (présentés tableau 4) sont sur la base des vecteurs calorifiques inférieurs, qui sont des quantités dans les statistiques énergétiques. Pour l'énergie

mécanique et électrique, la teneur en exergie est égale à la teneur en énergie. Le Bois de chauffage contient de l'eau et l'énergie du bois de chauffage est la valeur efficace de chauffage, qui est, le pouvoir calorifique inférieur pour combustible humide.

Tableau 4: Facteurs de qualité pour quelques sources naturelles (wall, 1986 ; Dincer, 2002, Ertesvåg et Mielnik, 2000, Utlu et Helpbasli, 2007).

Formes d'énergie	Facteur de qualité (facteur d'exergie)
Energie mécanique	1,0
Energie électrique	1,0
Energie chimique	1,0 et parfois supérieure (dépend de la définition du système)
Energie nucléaire	0,95
Energie solaire	0,9
Vapeur à haute température	0,6
Chauffage modéré (20°C)	0 – 0,2
Energie des chutes d'eau	1,0
Mazout, produits pétroliers	1,06
Gaz naturel	1,04
Charbon	1,06
Coke	1,05
Bois	1,03
Energie géothermique	0,29
La terre	0,0

III- ACQUISITION DES DONNEES

Les analyses énergétiques et exergétiques sont des méthodes de travail basées sur l'analyse des données disponibles. Ainsi donc, la recherche des données a été une étape déterminante dans la réalisation de ce travail. Pour ce faire, elle a été répartie en plusieurs, ceci étapes selon le secteur étudié :

- Pour ce qui est du secteur de transport, grâce à l'appui du Ministère de l'Eau et de l'Energie, nous avons fait des multiples descentes dans différentes structures de la place (la Société National des Hydrocarbures (SNH), la Société Camerounaise des Dépôts Pétroliers (SCDP), la Société National des Raffineries (SONARA) et le Ministère des Transports) pour avoir des informations sur la consommation en produits dérivés du

pétrole. De ces collectes de données, nous avons pu avoir pour les années 2001 à 2010, la consommation des produits pétroliers et ceci pour chaque type de transport et par catégories de produit pétrolier utilisé.

- Pour le secteur résidentiel, grâce du Ministère de l'Eau et de l'Energie nous nous sommes rendu à AES SONEL aujourd'hui ENEO où les données sur la consommation des résidences au Cameroun des années 2001 à 2010 ont été mises à notre disposition. Après cette descente, nous avons mené un sondage sur la consommation énergétique dans les résidences ceci dans les villes de Bafoussam, Yaoundé et Douala. Les principales questions présentes sur la fiche portaient sur :
 - Le nombre et le type d'appareil présent dans le domicile (appareil électrique ou à fuel) ;
 - Les informations détaillées sur chaque type d'appareil (puissances utilisées, fréquence et durée d'utilisation.

De ces informations recueillies, nous avons dressé le profil énergétique des résidences au Cameroun et menée notre étude pour ce secteur.

- Les autres secteurs quant à eux ont été analysés via l'appui du Ministère de l'Eau et de l'Energie, du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural et d'AES SONEL. En effet, une descente dans ces différentes structures nous a permis d'avoir des informations relatives à la consommation énergétique pour le secteur agricole. Ce secteur aussi a été sujet de plusieurs enquêtes menées dans les villes de Bafoussam et Yaoundé.
 - La première a été faite dans les hôpitaux. Principalement dans quatre l'hôpital : génico – obstétrique, hôpital central, hôpital général et le Centre Hospitalier Universitaire ;
 - La seconde dans les hôtels. Hilton, (Djeuga palace, hotel Altitel, et Talotel) ;
 - La troisième dans les Ministères (le Ministère de l'Eau et de l'Energie, le Ministère des Finances, le Ministère de la Santé, le Ministère du Travail, Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural et de la Sécurité Social).

Ces enquêtes ont été effectuées dans le but d'appréhender la consommation énergétique dans ces secteurs. Et le but de ces dernières étaient principalement de collecter les informations sur le type le nombre et la fréquence d'utilisation des appareils.

- Le secteur industriel quant à lui n'a pas pu être analysé, pour cause, la non disponibilité des données.

Conclusion

La connaissance des principes de la thermodynamique a été d'un grand atout dans la compréhension des analyses énergétiques et exergétiques. De part les limites et les imperfections du premier principe (analyses énergétiques), le second principe (représenté ici par l'analyse exergétique) vient, grâce aux irréversibilités, donner une appréhension plus réaliste du système étudié et son rendement montre le lieu où nécessite l'amélioration.

Dans le chapitre suivant, nous essayerons de mettre en œuvre ce qui précède dans l'ultime but de rendre notre travail applicable aux différents systèmes. Ainsi, nous allons mener l'étude énergétique et exergétique des différents secteurs d'activités du Cameroun (transport, résidentiel, agricole et tertiaire).

*CHAPITRE III : APPLICATION DE L'ANALYSE
ENERGETIQUE ET EXERGETIQUE AUX DIFFERENTS
SECTEURS D'ACTIVITES DU CAMEROUN*

Suite à la présentation énergétique du Cameroun faite au Chapitre I, deux questions nous sont venues en esprit : « Comment s'effectue la gestion de l'énergie au Cameroun ? Et comment l'améliorer ? » Afin de pouvoir répondre à ces deux questions, nous avons essayé dans ce chapitre de faire une application de la méthodologie décrite au chapitre précédent aux différents secteurs d'activités du Cameroun (secteur de transport, secteur résidentiel, secteur agricole et autres secteurs). La suite de ce chapitre a consisté à faire une comparaison de nos travaux avec ceux effectués dans les mêmes secteurs d'activités, mais dans d'autres pays (Turquie, Malaisie, Arabie Saoudite...). Ceci dans le but de pouvoir avoir une appréhension globale sur le management de cette énergie à l'échelle mondiale. Nous finissons ce chapitre par une évaluation des pertes énergétiques et exergetiques au Cameroun.

I- SECTEUR DU RESIDENTIEL

L'énergie dans le secteur résidentiel camerounais est utilisée principalement pour la cuisson, l'éclairage et les appareils électriques. Ce secteur consomme les trois sources d'énergies présentes sur le territoire (Bois – énergie, énergie électrique, produits pétroliers). Mais c'est le principal consommateur du bois – énergie. Comme le secteur des énergies renouvelables n'est pas encore développé, leurs utilisations restent insignifiantes dans ce secteur. Dans la suite, nous étudierons l'apport de l'énergie électrique et des énergies fossiles ; et nous introduirons les données relatives au bois – énergie plus tard.

Les données utilisées pour l'analyse de ce secteur ont été recueillies auprès des agences AES Sonel. Dans l'étude de ce secteur, une enquête a été menée afin de mieux appréhender les réalités vécues quotidiennement par les résidences camerounaises. Ainsi les villes de Yaoundé, Bafoussam et Douala ont été sujets de notre enquête pour un total de 300 résidences. Les informations recueillies portaient essentiellement sur :

- le type d'appareil utilisé (appareil électrique ou à fuel) ;
- les informations détaillées sur les appareils électriques (leurs puissances, leurs nombres, la durée d'utilisation journalière...) ;
- le type d'appareil utilisé pour la cuisson ;
- le type d'appareil utilisé pour l'éclairage (ampoules à incandescent ou fluorescent) leur nombre et la durée d'utilisation journalière).

Au terme de cette enquête, la répartition de l'énergie dans les résidences camerounaises a été faite et est présentée dans le tableau 5.

Tableau 5: Répartition de l'utilisation de l'énergie dans le secteur résidentiel au Cameroun

	Electricité (%)	Fuel (%)
Eclairage	35,92	
Télévision	11,37	
Ventilateur	7,18	
Refrégirateur	23,95	
Chargeur de téléphone	2,40	
Ordinateur	11,94	
Radio	7,18	
Appareil de cuisson		100
total		100

I-1- Evaluation des rendements dans le secteur résidentiel du Cameroun

I-1-1- Eclairage

De l'enquête menée, les appareils utilisés pour l'éclairage sont de deux types les tubes incandescents et les tubes fluorescents. D'après les travaux menés par Rosen et Dincer (1997) et Ileri et Gurer (1998), les rendements énergétiques et exergetiques de ces deux appareils sont respectivement 5 % et 4,5% pour les tubes à incandescent, et 20% et 18,5% pour les tubes fluorescents. Comme les résidences camerounaises sont composées des deux types de tube, les différents rendements sont donc :

$$\eta = \frac{20 + 5}{2} = 12,5\%$$

$$\psi = \frac{18,5 + 4,5}{2} = 11,5\%$$

I-1-2-Cuisson

Dans le secteur résidentiel camerounais, la cuisson est en majeure partie faite avec les énergies fossiles et le bois – énergie. Et comme mentionné, nous nous attèlerons de prime abord aux énergies fossiles. Le rendement énergétique de la cuisson en utilisant les énergies fossiles comme source d'énergie est 65 % et 40 % pour le bois énergie ((Al-Ghandoor et al., 2008) ; (Saidur et al., 2007)).

La température utilisée pour la cuisson étant prise à 101°C (valeur issue de l'enquête) soit 374°K, et la température ambiante étant prise à 25 °C soit 298 °K, le rendement énergétique et exergetique de la cuisson est calculé en utilisant la formule II-34.

$$\psi_f = \frac{\eta}{q} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$$

$$\psi_f = 65 \left(1 - \frac{298}{374}\right) = 13,20\%$$

Nous considérons le fait que le facteur de qualité (q) est sensiblement égal à l'unité d'où la négligence de son apport dans l'application numérique.

I-1-3- Chauffage de l'eau

Le chauffage de l'eau pour la plupart des résidences enquêtées, utilise de l'énergie électrique. Le rendement énergétique de la cuisson en utilisant l'énergie électrique comme source d'énergie est 90 % (Hammond, 2001).

La température de chauffage étant prise à 50°C, le rendement énergétique et exergetique de la cuisson est calculé en utilisant la formule II-35.

$$\psi_e = \frac{\eta}{q} \left[1 - \left(\frac{T_0}{T - T_0}\right) \ln \frac{T}{T_0}\right]$$

Réservée à une minorité de résidence (personnes nanties), nous ne tiendrons pas en compte de cette utilisation dans la suite de notre analyse.

I-1-5- Réfrigération

Appareil fonctionnant à l'énergie électrique, les congélateurs et réfrigérateurs sont des appareils donc la température de fonctionnement tourne autour de - 8°C soit 265 °K avec comme coefficient de performance 1,0 (Hammond, 2001). Ainsi le rendement exergetique est calculé en utilisant la formule II-37 :

$$\psi = \eta \left(\frac{T_0}{T} - 1\right)$$

$$\psi = 100 \left(\frac{298}{265} - 1\right) = 7,47\%$$

I-1-6- Appareils électriques

Pour le rendement des appareils électriques (excepté ceux utilisés pour la réfrigération) une estimation a été faite lors des analyses menées par Utlu et Hepbasli (2005) et constat a été établi que, pour ces derniers les rendements énergétiques et exergetiques sont égaux. Le tableau 6 regroupe les rendements de ces derniers, ainsi que la répartition de l'utilisation de l'énergie dans le secteur résidentiel au Cameroun.

Tableau 6: Répartition de l'utilisation de l'énergie dans le secteur résidentiel au Cameroun

Appareils	η_e (%)	T_p (K)	T_0 (K)	ψ_e (%)	Répartition (%)
Eclairage	12,50	-	-	11,50	35,92
TV	80	-	-	80	11,37
Ventilateur	80	-	-	80	7,18
Réfrigérateur	60	298	265	7,47	23,95
Chargeur téléphone	70	-	-	70	2,40
Ordinateur	70	-	-	70	22,94
Radio	80	-	-	80	7,18
Appareil de cuisson	65	298	374	13,20	

I-2- Consommation énergétique du secteur résidentiel

Les données de la consommation énergétique (fuel et énergie électrique) du secteur résidentiel au Cameroun ont été obtenues des services d'AES Sonel (aujourd'hui ENEO), de la SNH (Société National des Hydrocarbures). Grâce à l'enquête menée, nous avons en fonction de la puissance des appareils utilisés, répartis cette consommation du secteur résidentiel telle que présenté dans le tableau 6. Les tableaux 7 et 8 nous présentent cette consommation au cours des années 2001 à 2010, ceci pour chaque type d'appareil utilisé. La consommation exergetique a été obtenue en multipliant chaque donnée énergétique par son facteur de qualité comme explique au chapitre deux (précisons que pour ce qui est de l'énergie électrique le facteur de qualité est égal à l'unité).

Tableau 7: Consommation d'énergie électrique en TJ (Téra Joules) dans le secteur résidentiel

Appareil	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Eclairage	689.66	732.76	786.64	898.00	977.02	1052.45	1074.00	1156.62	1167.40	1275.16

TV	218.30	231.98	249.00	284.25	309.26	333.14	339.96	366.11	369.52	403.63
Ventilateur	137.85	146.67	157.24	179.50	195.29	210.37	214.68	231.19	233.35	254.89
réfrigérateur	459.84	488.58	524.50	598.75	651.44	701.73	716.10	771.19	778.37	850.22
Chargeur	46.08	48.96	52.56	60.00	65.28	70.32	71.76	77.28	78.00	85.20
Ordinateur	229.82	244.18	262.14	299.25	325.58	350.72	357.90	385.43	389.02	424.93
Radio	137.85	146.67	157.24	179.50	195.29	210.37	214.68	231.19	233.35	254.89
Total	1920	2040	2190	2500	2720	2930	2990	3220	3250	3550

Les tableaux 7 nous montrent une forte croissance de la consommation en énergie électrique ce qui est simplement due au fait que, la population camerounaise ne cesse de croître et forcément ce taux d'accroissement entraîne une forte demande en énergie. Mentionnons que, malgré cette forte demande en énergie, le besoins n'est pas toujours satisfait car une estimation de l'Institut National de la Statistique en 2005, 49,% de la population à accès à l'énergie électrique ce pourcentage est monté à 60% en 2010 grâce à l'expansion et l'intensification du réseau électrique de AES Sonel. Pendant cette période aussi, ce taux d'électrification a surtout augmenté dans les zones urbaines mais légèrement dans les zones rurales ceci est due au fait que le nombre de ménage augmente mais la souscription auprès des agence de distribution d'énergie électrique n'est pas effective par ces derniers car ils préfèrent prendre l'électricité chez le voisin.

Pour ce qui est des produits pétroliers (tableau 8), son utilisation première dans les résidences est la cuisson (faible proportion réservée à l'éclairage). Deux principaux produits sont utilisés à cet effet : le butane (gaz domestique et le pétrole lampant).

Tableau 8: Consommation des hydrocarbures en TJ dans le secteur résidentiel

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Butane	1370	1420	1460	1460	1400	2050	1990	2150	2200	2430
Pétrole	4230	4360	5250	4890	4200	3610	335	303	2980	2810
Energies Total	5600	5780	6710	6350	5600	5660	5340	5180	5180	5240
Exergies Total	5978.3	6170.4	716501	6779.9	5978	6035.7	5693.9	55211	5520.6	5582.5

La consommation de GPL est passée de 1920 TJ en 2001 à 3550 TJ en 2010, soit une augmentation de 76% en 9 ans. Malgré cet important accroissement, il importe de relever que la consommation du gaz domestique reste très faible au Cameroun comme en témoigne les

pénuries récurrentes et le faible accès surtout en milieu rural et dans la zone de savane du Nord Cameroun.

L'offre aujourd'hui reste limitée par un système subventionné et administré d'une part et d'autre part, par les problèmes structurels (insuffisance des capacités de stockage, absence de stocks de sécurité, coût élevé des équipements de première consommation, faible interchangeabilité des emballages, etc.). Selon la CSPH (Caisse de Stabilisation des Prix des Hydrocarbures), les mises à disposition de GPL ont augmenté de 9 % entre 2010 et 2011.

La consommation du pétrole lampant est passée de 5600 TJ en 2001 à 5240 TJ en 2010, soit une baisse d'environ 34%. Cette baisse est observée depuis 2003. Ce phénomène pourrait s'expliquer par l'augmentation des prix des produits pétroliers et l'augmentation des zones rurales électrifiées. Cette baisse continue de la consommation du pétrole lampant entraîne une modification de la structure de consommation des produits pétroliers par les ménages.

I-3- Rendement énergétique et exergetique pondéré du secteur résidentiel

Le rendement énergétique en exergetique pondéré est calculé en utilisant trois étapes

I-3-1- Energie électrique (première étape)

Le rendement énergétique en exergetique pondéré des appareils fonctionnant à l'énergie électrique est calculé en utilisant les formule II-49 et II-50 qui peuvent encore être écrites sous la forme

$$\eta_e = \frac{(e_{\text{éclairage}} \times \eta_{\text{éclairage}}) + (e_{TV} \times \eta_{TV}) + \dots + (e_{\text{radio}} \times \eta_{\text{radio}})}{e_{\text{éclairage}} + e_{TV} + \dots + e_{\text{radio}}}$$

$$\psi_e = \frac{(e_{\text{éclairage}} \times \psi_{\text{éclairage}}) + (e_{TV} \times \psi_{TV}) + \dots + (e_{\text{radio}} \times \psi_{\text{radio}})}{e_{\text{éclairage}} + e_{TV} + \dots + e_{\text{radio}}}$$

Où $e_{\text{éclairage}}$ est la quantité d'énergie consommée par l'éclairage, $\eta_{\text{éclairage}}$ le rendement énergétique de l'éclairage, et $\psi_{\text{éclairage}}$ le rendement exergetique de l'éclairage. Un exemple pour l'année 2010 est donné ci-dessous :

$$\eta_e = \frac{(1275.16 \times 12.5 + 403.63 \times 80 + 254.89 \times 80 + 850.22 \times 60 + 85.20 \times 70 + 424.93 \times 70 + 254.89 \times 80)}{(1275,16 + 403,63 + 254,86 + 850,22 + 85,20 + 424,93 + 254,89)}$$

$$\eta_e = 40,50\%$$

$$\psi_e = \frac{(275.16 \times 11.5 + 403.63 \times 80 + 254.89 \times 80 + 850.22 \times 7.47 + 85.20 \times 70 + 424.93 \times 70 + 254.89 \times 80)}{(1275,16 + 403,63 + 254,86 + 850,22 + 85,20 + 424,93 + 254,89)}$$

$$\psi_e = 35,56\%$$

I-3-2- Fuel (seconde étape)

Le rendement énergétique en exergetique pondéré des appareils fonctionnant au fuel calculé en utilisant les formules II-49 et II-50 qui peuvent encore être écrite sous la forme :

$$\eta_e = \frac{e_{cuisson} \times \eta_{cuisson}}{e_{cuisson}} = \eta_{cuisson}$$

$$\psi_e = \frac{e_{cuisson} \times \psi_{cuisson}}{e_{cuisson}} = \psi_{cuisson}$$

Où $e_{cuisson}$ est la quantité d'énergie consommée par l'éclairage, $\eta_{cuisson}$ le rendement énergétique de l'éclairage, et $\psi_{cuisson}$ le rendement exergetique de l'éclairage.

I-3-3- Rendement moyen global (troisième étape)

Afin de calculer le rendement global du secteur résidentiel, nous devons d'abords savoir dans quelles proportions sont utilisées l'énergie électrique et le fuel. Ainsi, ces proportions sont déterminées par les formules suivantes :

$$WF_e = \frac{\sum e}{\sum e + \sum f} \quad \text{III-1}$$

$$WF_f = \frac{\sum f}{\sum e + \sum f} \quad \text{III-2}$$

Un exemple pour l'année 2010 est présenté les autres valeurs sont présentes dans le tableau 9.

Tableau 9: Proportion de l'utilisation de l'énergie au secteur résidentiel

Années	WF_e	WF_f
2001	0.25	0.74
2002	0.26	0.74
2003	0.25	0.75
2004	0.28	0.72
2005	0.33	0.67
2006	0.34	0.66
2007	0.36	0.64
2008	0.38	0.62
2009	0.38	0.61
2010	0.40	0.59

Le rendement énergétique et exergetique globale du secteur résidentiel est donc déterminé par :

$$\eta_g = (\eta_e \times WF_e) + (\eta_f \times WF_f) \quad \text{III-3}$$

$$\psi_g = (\psi_e \times WF_e) + (\psi_f \times WF_f) \quad \text{III-4}$$

Une illustration pour l'année 2010 est présentée ci-dessous et le reste est présenté dans la figure 13

$$\eta_g = (49,50 \times 0,40) + (65 \times 0,59) = 58,15\%$$

$$\psi_g = (36,56 \times 0,40) + (13,20 \times 0,59) = 52,41\%$$

Constat est fait suite à la figure 13 que le rendement exergetique est nettement inférieur au rendement énergétique ; ceci s'explique simplement par le fait des irréversibilités dans le fonctionnement de certains appareils Au fil des années, on constate une augmentation du rendement exergetique tandis que le rendement énergétique baisse légèrement ; ceci est due aux multiples sensibilisations faites par le gouvernement au sujet de l'utilisation efficace de l'énergie en milieu résidentiel dans la logique de l'économie de l'énergie.

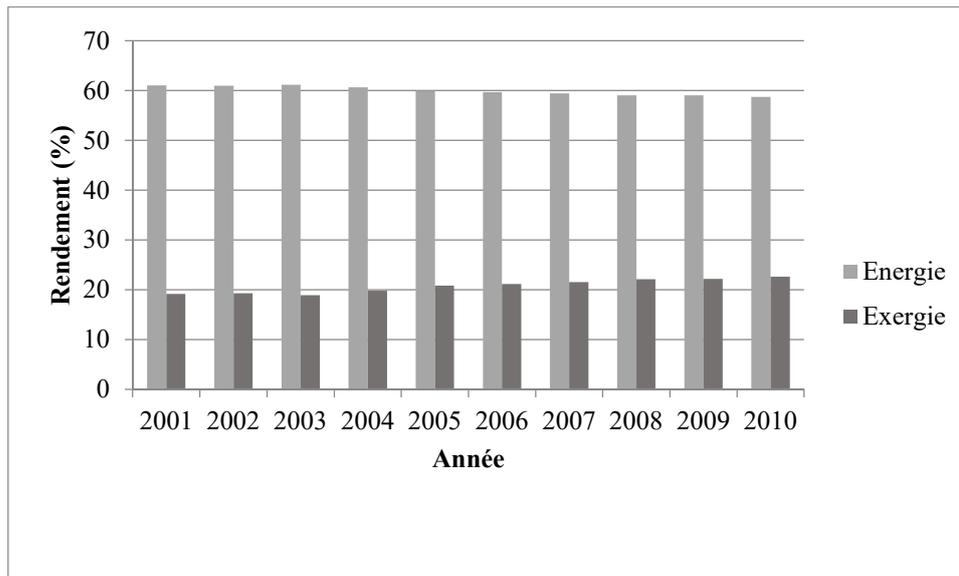


Figure 13: Rendement énergétique et exergetique global du secteur résidentiel au Cameroun

Nous avons classé la consommation au secteur résidentiel en trois grandes parties à savoir appareils électriques, éclairage, et cuissons (tableau 10) ; ceci dans le but de pouvoir déceler quelle est la partie responsable des grandes irréversibilités et par conséquent du faible rendement exergetique. Nous nous rendons compte que les appareils électriques ont le plus haut rendement énergétique et exergetique. Ce constat était prévisible car la majeure partie de ces appareils ont le même rendement énergétique et exergetique (environs 60% et plus) (figure 14).

Tableau 10: Rendement énergétique et exergetique par secteur d'utilisation

	η (%)	ψ (%)	Répartition (%)
Cuisson	65	13.20	59.61
Eclairage	12.50	11.50	14.50
Appareils électriques	70.24	50.61	25.87
Total	58.15	22.41	100

Toujours dans l'optique de mieux comprendre ce secteur, nous avons calculé le ratio (ϕ) entre le rendement énergétique et le rendement exergetique. Pour un système qui se veut efficace, ce ratio doit être très proche de l'unité. La figure 14 montre clairement que la cuisson s'avère être l'activité responsable des grandes pertes exergetiques dans le secteur résidentiel. L'explication que nous pouvons donner à cela est dû au fait qu'il existe une grande marge entre la température de l'environnement et celle utilisée pour faire cuire les aliments d'où les multiples pertes lors de la cuisson des aliments. L'éclairage est l'activité la plus économique comme le montre la figure 14 car ses deux rendements sont très proches (11,5% et 12,5%). Pour

ce qui est des appareils électriques, c'est la réfrigération qui est responsable des pertes trouvées dans cette partie.

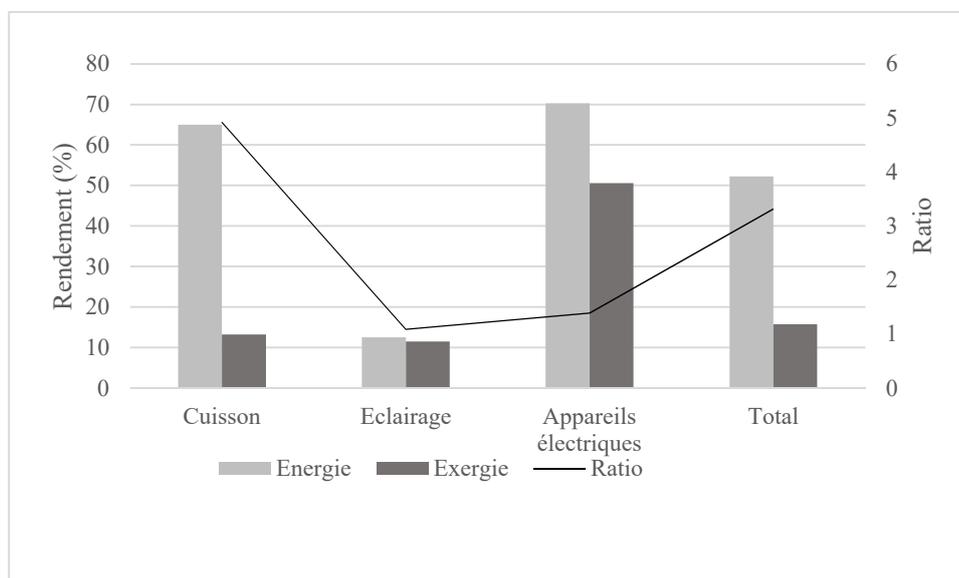


Figure 14: Rendement énergétique et exergetique par utilisation

Tableau 11: Comparaison des différents rendements des secteurs résidentiels

Pays	Années	Rendement énergétique (%)	Rendement exergetique(%)	References
Chine	2005	-	10	(Ertesvag et Mielnik, 2000)
Canada	1986	50	15	(Hammond et Stapleton, 2001)
USA	1970	50	14	(Hammond et Stapleton, 2001)
Brésil	2001	35	23	(Hammond et Stapleton, 2001)
Italie	1990	-	2	(Hammond et Stapleton, 2001)
Malaisie	1997 - 2004	69.32	29.98	(Saidur et al., 2007)
Jordanie	2006	66.60	15.40	(Al-Ghandoor et al., 2008)
Turquie	2004 – 2005	80.98	22.17	(Utlu et Hepbasli, 2007)
Norvège	2000	-	12	(Hammond et Stapleton, 2001)
Arabie Saoudite	2004	76	9	(Dincer et al. 2004c)
Cameroun	2010	58.15	22.41	-

En nous retournant dans les études faites dans plusieurs autres pays (Chine, Canada, USA...) par d'autres chercheurs (tableau 11). Le constat est identique dans tous ces pays à savoir rendement exergetique faible par rapport au rendement énergétique. Nous constatons aussi que le rendement exergetique du Cameroun s'avère être plus élevé que pour certains pays comme la Chine, le Canada, la Norvège... Ceci peut s'expliquer par le niveau de vie du Cameroun et aussi par le climat. En effet de par leurs conditions (moyenne pour la plus part) de vie, la majeure partie de la population camerounaise ne peut pas s'offrir certains appareils gros

consommateur d'énergie et source de beaucoup d'irréversibilités lors de leur fonctionnement (machine à laver, climatisation...). Le climat camerounais est aussi un avantage dans l'amélioration de notre rendement, car il est une des causes des irréversibilités dans les pays occidentaux à cause de l'utilisation du chauffage de l'eau et de l'espace.

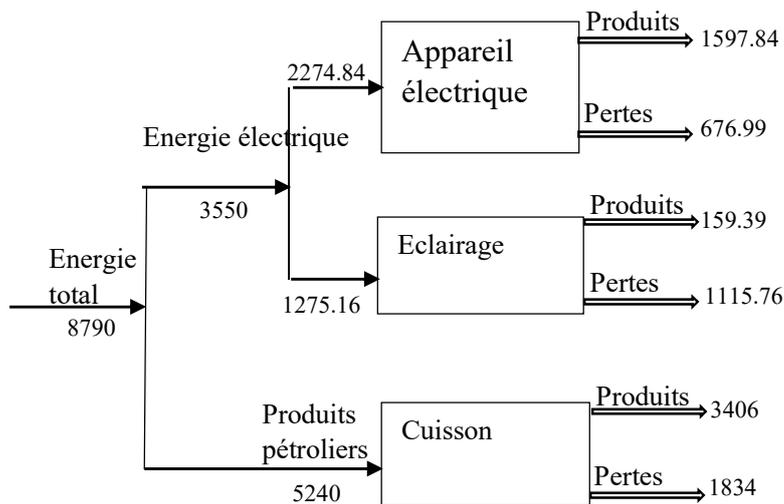


Figure 15: Diagramme de flux énergétique (TJ) dans le secteur résidentiel au Cameroun en 2010

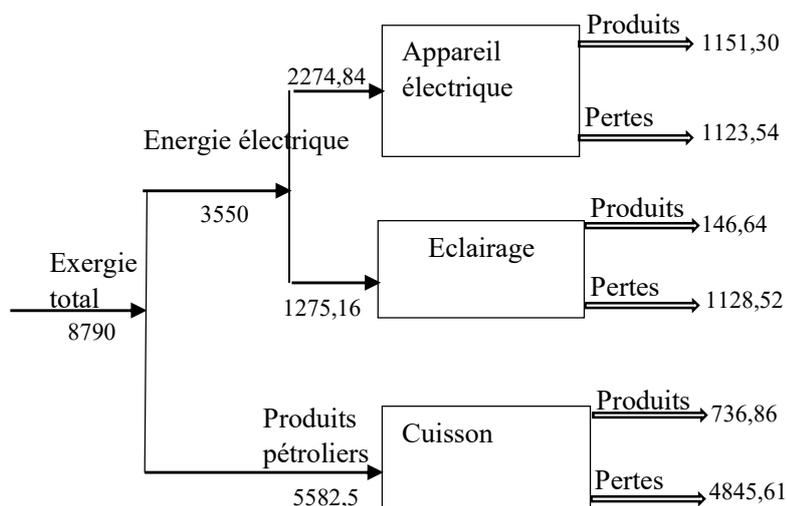


Figure 16: Diagramme de flux exergetique (TJ) dans le secteur résidentiel au Cameroun en 2010

Pour identifier les pertes énergétiques et exergetiques, il est plus judicieux d'utiliser les diagrammes de flux énergétique et exergetique. Ces diagrammes aident aussi dans la compréhension des dispositifs sources de pertes énergétiques. En se basant sur les calculs fait

précédemment, nous avons établi les diagrammes de flux énergétique et exergetique du secteur résidentiel au Cameroun pour l'année 2010. Ces diagrammes présentent aussi l'énergie et l'exergie produits et perdus au cours de cette année (figure 15 et 16).

II- SECTEUR DU TRANSPORT

Dans son dernier rapport de l'année 2007, le Groupe d'experts Intergouvernementaux sur l'Evolution du Climat (GIEC) annonce que « L'essentiel de l'accroissement des températures globalement moyennées depuis le milieu du 20ème siècle résulte très probablement de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre (GES) anthropogènes (liés aux activités humaines) ». Les émissions de CO₂ constituent environ 70 % des émissions totales de GES, et sont surtout liées à la consommation d'énergie fossile. Le secteur du transport fait partie des gros consommateurs de cette énergie. Le secteur de transport est un secteur privilégié car, c'est grâce à ce dernier que l'on peut se déplacer, vaquer à nos différentes occupations quotidiennes. Ainsi donc comprendre son fonctionnement et trouver des moyens afin de le rendre plus efficace, est primordial pour l'évolution d'un pays.

Au Cameroun, le secteur de transport est celui sur lequel s'appuient tous les autres secteurs d'activité. Sa contribution dans le PIB (Produit Intérieur Brut) lors des années 2001 – 2010 est de 4% (Rapport-SIE, 2011). Son influence sur le coût des produits destinés à la consommation est énorme surtout quand ces derniers sont acheminés des zones rurales (lieu de production) vers les milieux urbains (zones d'écoulement).

Au Cameroun, le secteur de transport est divisé en trois sous – secteurs :

- le transport routier ;
- le transport maritime ;
- le transport aérien.

Le transport routier est le moyen de transport le plus utilisé. Ceci se traduit notamment par l'augmentation du nombre de véhicules (personnel comme taxi). Le nombre de motos lui aussi ne cesse de croître surtout avec la venue de « mototaxis ». En 2009, le Ministère des Transports a enregistré près de 35 853 nouveaux véhicules immatriculés ; ce chiffre serait plus important si l'on prend en compte les engins qui circulent dans l'irrégularité. La figure 17 montre l'évolution du parc automobile entre 2001 et 2010. Comme nous pouvons le constater, le véhicules de tourisme (personnel, taxi) sont de loin les plus nombreux.

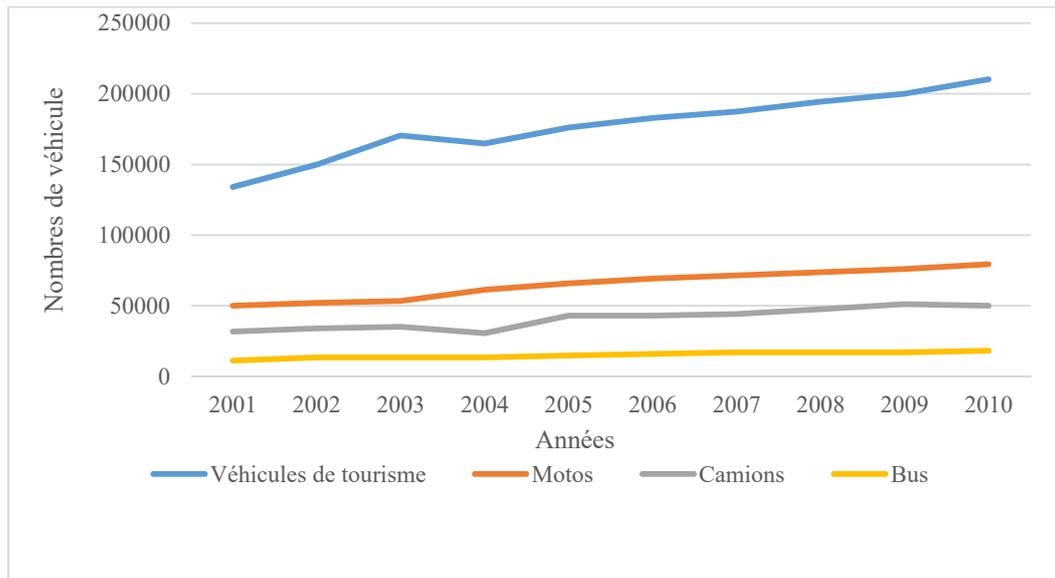


Figure 17: Evolution du parc automobile de 2000 à 2010

Pour ce qui est du transport maritime, La position du Cameroun par rapport à l'Océan atlantique lui donne une façade d'environ 420 km. Le pays dispose, à la faveur de la libération du secteur portuaire, de quatre (04) ports autonomes dont deux (02) maritimes ouverts sur la mer à Kribi et à Limbé, un maritime intérieur ou port d'estuaire à Douala et un fluvial sur le fleuve Benoué à Garoua.

Enfin pour ce qui est du transport aérien, le Cameroun dispose de sept aéroports principaux qui réalisent l'essentiel du trafic aérien. Ceux-ci se subdivisent en trois aéroports internationaux : Douala, Nsimalen et Garoua, et quatre aéroports nationaux : Ngaoundéré, Maroua, Bamenda et Bertoua. Seuls Ngaoundéré et Maroua sont en service. Il existe également huit aérodromes fonctionnels, et 15 aéroports publics pouvant accueillir des vols réguliers (Transtat, 2006). Les aéroports de Nsimalen et de Garoua ont les plus longues pistes d'atterrissage avec 3.400 m de long. En termes de plus gros porteur pouvant utiliser les pistes d'atterrissage, seules les pistes des trois aéroports internationaux peuvent recevoir les gros avions à l'exemple du Boeing 747 de l'ex-Camair. La capacité des aéroports est de 1.500.000 passagers par an pour les aéroports internationaux de Douala et de Nsimalen.

II-1 Consommation énergétique du secteur de transport

Le tableau 12 nous présente la consommation énergétique et exergetique (par types de produit et par différents sous – secteurs) du secteur de transport pendant les années 2001 à 2010.

Ces données ont été prises auprès de la SNH et du Ministère de l'Eau et de l'Energie. Ces valeurs sont en Péta Joules).

Tableau 12: Consommation énergétique par type de vecteur énergétique du secteur de transport

Année	Mode de transport	Type de fuel	Consommation énergétique			Consommation exergetique	
			Ktoe	PJ	%	PJ	%
2001	Routier	Gasoline	275.640	11.540	45.250	12.232	44.850
		Diesel oil	314.640	13.173	51.640	14.092	51.670
	Aérien	Jet kerosene	18.790	0.787	3.090	0.845	3.100
		Air fuel	1.770	0.074	0.290	0.0784	0.290
2002	Routier	Gasoline	277.130	11.602	43.570	12.296	43,36
		Diesel oil	317.630	13.298	49.960	14.231	50.180
	Aérien	Jet kerosene	18.860	0.789	2.960	0.845	2.980
		Air fuel	22.210	0.930	3.490	0.986	3.470
2003	Routier	Gasoline	307.030	12.855	48.860	13.621	48.510
		Diesel oil	303.270	12.697	48.280	13.589	48.400
	Aérien	Jet kerosene	19.450	0.814	3.07	0.866	3.080
		Air fuel	0	0	0	0	0
2004	Routier	Gasoline	306.350	12.826	47.570	13.600	47.200
		Diesel oil	321.690	13.468	49.940	14.413	50.020
	Aérien	Jet kerosene	17.850	0.747	2.780	0.802	2.780
		Air fuel	0.020	0	0	0	0
2005	Routier	Gasoline	334.990	14.025	49.730	14.872	47.790
		Diesel oil	318.020	13.315	47.180	14.242	45.770
	Aérien	Jet kerosene	14.640	0.613	2.160	0.653	2.100
		Air fuel	7.940	0.332	1.160	0.350	1.120
2006	Routier	Gasoline	342.370	14.334	49.200	15.190	4.930

		Diesel oil	334.870	14.020	48.200	15.001	48.320
	Aérien	Jet	8.830	0.369	1.270	0.396	1.270
		kerosene					
		Air fuel	10.350	0.433	1.470	0.455	1.470
2007	Routier	Gasoline	349.680	14.640	49.440	15.518	49.820
		Diesel oil	347.800	14.561	49.170	15.579	50.010
	Aérien	Jet	11.620	0.486	1.650	0.524	0.170
		kerosene					
		Air fuel	0		0	0	0
2008	Routier	Gasoline	364.440	15.258	50.210	16.175	49.850
		Diesel oil	349.890	14.649	48.200	15.675	48.310
	Aérien	Jet	12.280	0.514	1.690	0.550	1.690
		kerosene					
		Air fuel	1.070	0.045	0.140	0.047	0.150
2009	Routier	Gasoline	373.270	15.628	44.820	16.568	44.480
		Diesel oil	446.930	18.712	53.650	20.020	53.740
	Aérien	Jet	12.600	0.527	1.510	0.567	1.520
		kerosene					
		Air fuel	2.140	0.089	0.250	0.095	0.250
2010	Routier	Gasoline	366.450	15.342	41.380	16.260	41.060
		Diesel oil	505.680	21.172	57.100	22.652	57.210
	Aérien	Jet	12.300	0.515	1.370	0.545	1.380
		kerosene					
		Air fuel	3.210	0.134	0.350	0.137	0.350

Il est évident que le secteur de transport du Cameroun puisse être assimilé seulement au transport routier qui représente environ 97% du secteur de transport. En effet, au Cameroun, le transport aérien est la plupart du temps utilisé pour des déplacements à l'extérieur du pays. C'est pourquoi son utilisation est presque insignifiante. Le transport routier, qui est habituellement utilisé, est caractérisé par la domination des voitures et des motos (figure 17). Cette augmentation du parc peut être expliquée par la lutte contre le chômage ; elle pousse la jeunesse camerounaise dans l'achat des motos et taxis afin de subvenir à leurs besoins.

Dans le tableau 13 nous regroupons cette énergie par différent secteur et nous constatons que, le transport routier est de loin le plus utilisé et le plus « énergivore » de ce secteur.

Tableau 13: Consommation énergétique par sous - secteur

	Transport routier		Transport aérien	
	Energie	Exergie	Energie	Exergie
2001	24.710	26.310	0.861	0.918
2002	24.900	26.520	1.720	1.830
2003	25.550	27.210	0.810	0.850
2004	26.300	28.000	0.750	0.850
2005	27.340	29.110	0.940	1.001
2006	28.350	30.190	0.800	0.850
2007	29.200	31.010	0.490	0.520
2008	29.910	31.850	0.555	0.588
2009	34.340	36.570	0.620	0.656
2010	36.510	38.880	0.640	0.679

La consommation globale du secteur de transport est présentée dans la figure 18.

En 2001 cette consommation était de 27,03 PJ tandis qu'en 2010 elle est de 39,3 PJ. Cette progression exergetique traduit le besoin énorme et la forte mobilité durant les années 2001 et 2010. Nous pouvons également constater que, pour les années 2009 et 2010, il y a eu une forte augmentation. Ce qui est attribué à la forte vente des véhicules. En effet, lors de ces deux dernières années, le nombre de véhicules vendus a augmenté de 18% (Institut National de Statistique INS, 2011).

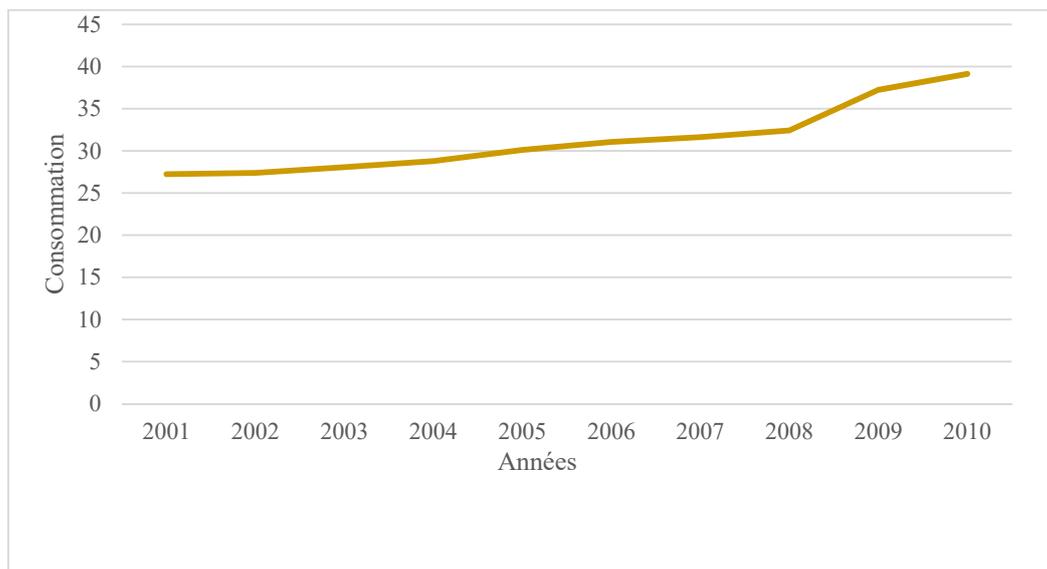


Figure 18: Consommation exergetique du secteur de transport

II-2 Evaluation des rendements moyens et globaux dans le secteur de transport du Cameroun

Comme mentionné plus haut le relief maritime camerounais ne permet pas une circulation aisée des biens et des personnes c'est pour cela que dans la suite nous analyserons uniquement les transports routiers et aériens.

Beaucoup d'études ((Dincer et al., 2004a,c) ; (Saidur et al.2007) ; (Jaber et al.,2008)) sur l'utilisation sur des rendements énergétiques et exergetiques stipulent que les rendements énergétiques dans les différents sous – secteurs du transport sont 22% et 28% respectivement pour le transport routier et le transport aérien. Le rendement exergetique pour la production de travail des commandes mécaniques est défini dans l'équation (II-45) avec le rendement énergétique divisée par le facteur de qualité du porteur d'énergie utilisé puisque les dispositifs de transport produisent du travail mécanique. Les rendements exergetiques sont trouvés en conséquence et présentés dans la figure 19, en utilisant la valeur des facteurs de qualité dans l'annexe A et les valeurs du tableau 12. Un exemple pour l'année 2010 est présenté ci-dessous :

$$\eta_g = \frac{((22 \times 41,38) + (22 \times 57,10) + (28 \times 1,37) + (28 \times 0,35))}{100} = 22,14\%$$

$$\psi_g = \frac{22}{1,06} \times 41,38 + \frac{22}{1,07} \times 57,10 + \frac{28}{1,07} \times 1,37 + \frac{22}{1,06} \times 0,35 = 20,78\%$$

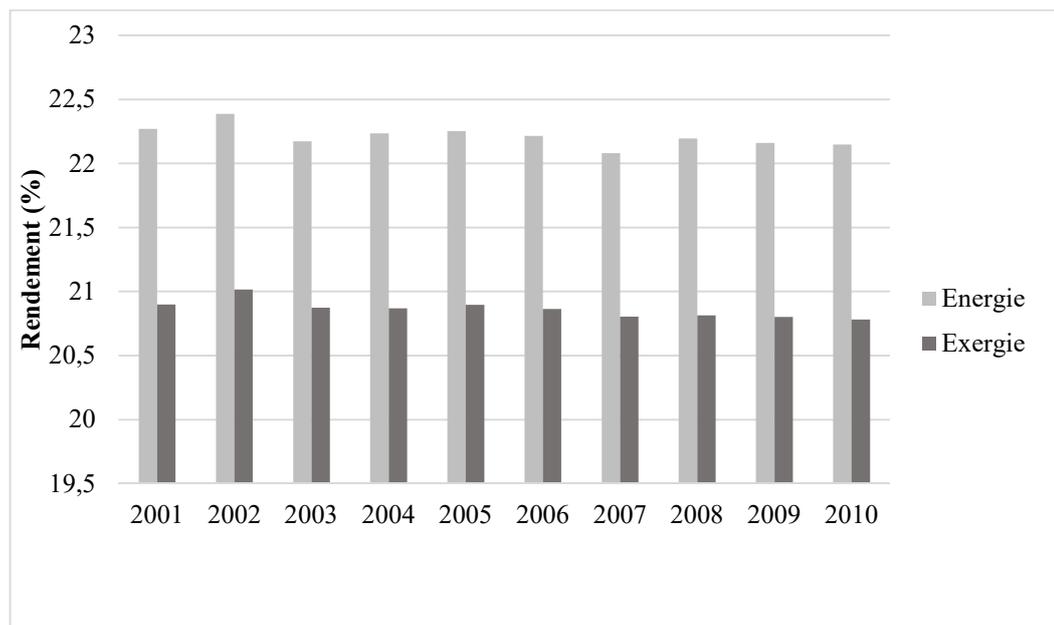


Figure 19: Rendement énergétique et exergetique global du secteur de transport au Cameroun

Les résultats de cette figure indiquent une légère augmentation des rendements en 2002, 2004 et 2005. La légère augmentation des rendements énergétiques et exergetiques en 2004 et 2005 est attribuée à l'établissement du transport en commun. En effet, le début des années 2000 a été marqué par la création de deux grandes sociétés de transport en commun (Bus et Socatur) dans les villes de Yaoundé et de Douala.

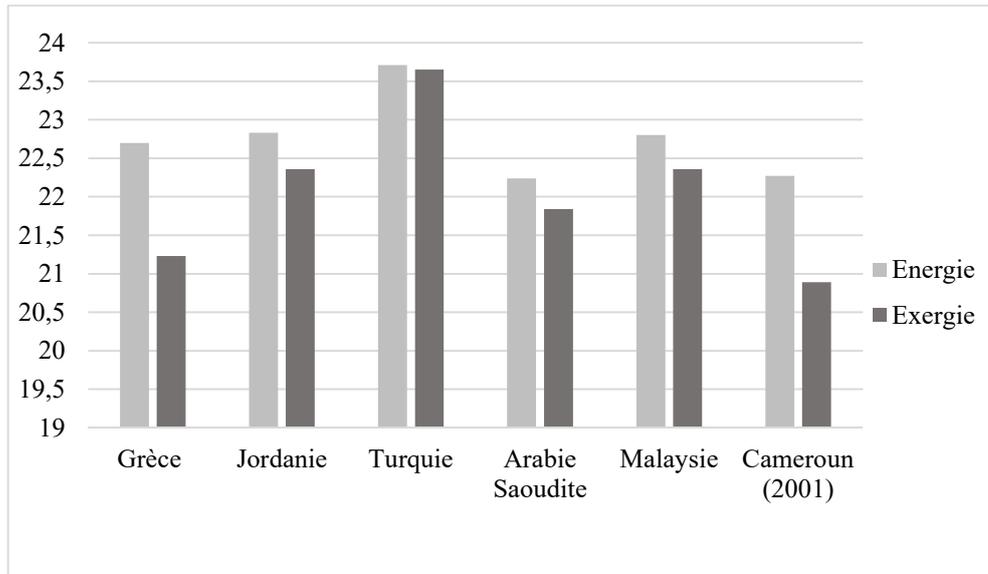


Figure 20: Comparaison des différents rendements de secteurs de transport

Une comparaison des rendements globaux énergétiques et exergetiques du secteur du transport du Cameroun pendant l'année 2001 avec les secteurs de transport de l'Arabie Saoudite, de la Grèce de la Jordanie, de la Malaisie, et de la Turquie, est présentée, sur la figure 20, (Dincer et al., 2004c ; Utlu et Hepbasli, 2006 ; Saidur et al. 2007 ; Jaber et al., 2008 ; Koroneos et Nanak Evanthia, 2008). On observe que les rendements énergétiques et exergetiques du secteur du transport du Cameroun sont les plus bas. La raison de ce faible rendement est la situation économique du Cameroun, les états physiques des véhicules (40% des véhicules ont plus de 10 ans (Rapport-SIE, 2011)) et le mauvais état des routes. Elle peut être également attribuée à la vente frauduleuse des produits pétroliers et le frelatage.

Les flux d'énergies dans le secteur de transport au Cameroun peuvent être résumés dans la figure 21.

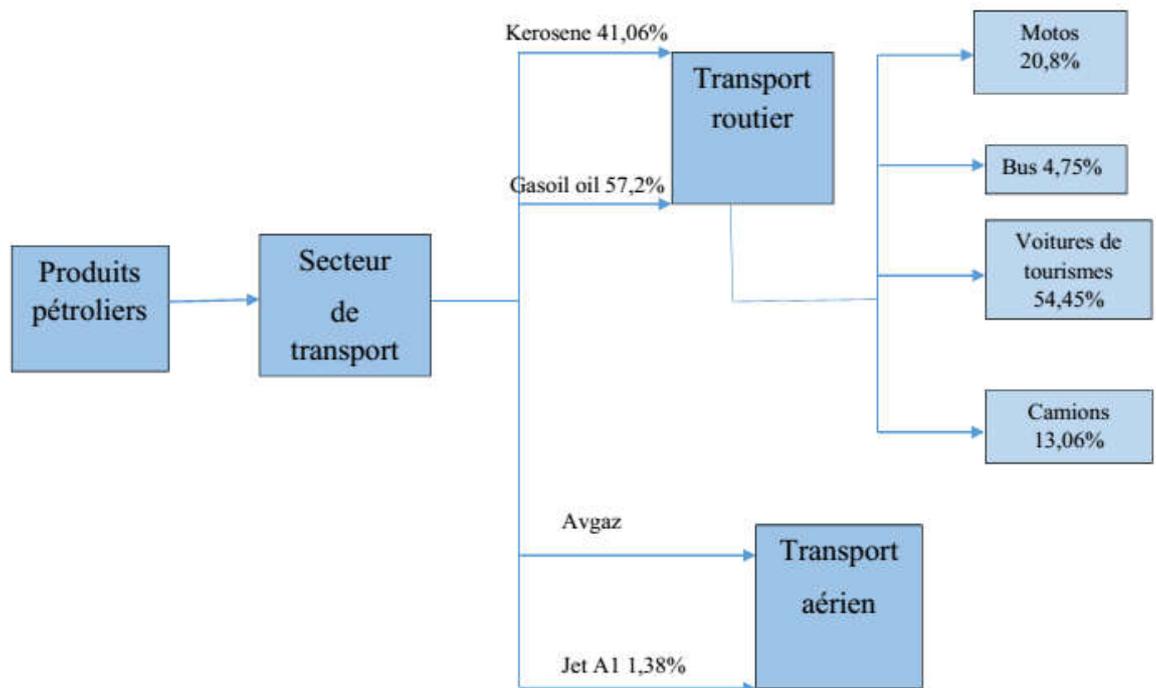


Figure 21: Flux énergétique dans le secteur de transport (2010)

III- AUTRES SECTEURS

Les autres secteurs au Cameroun regroupent plusieurs structures à savoir :

- L'agriculture
- Les hôtels et restaurants ;
- L'Administration ;
- L'exploitation forestière ;
- Eclairage public ;
- Les services publics et commerciaux ;
- Les autres secteurs du tertiaire.

Le secteur de l'agriculture représentant un intérêt, son étude particulière sera faite ensuite suivra celle des autres sous-secteurs.

III- 1- Secteur de l'agriculture

Considéré comme l'Afrique en miniature, le Cameroun comporte une grande diversité de paysages, de zones géomorphologiques et climatiques qui sont regroupées en entités régionales ou zones agro écologiques distinctes. Il comporte aussi d'abondantes ressources foncières

encore largement sous exploitées ; un fort potentiel de terres irrigables estimé à environ 240 000 ha, des populations rurales très entreprenantes et dynamiques et une position géographique hautement stratégique.

Mieux que les autres pays de la sous-région CEMAC (Communauté Economique et monétaire de l'Afrique Centrale) dont les populations, peu nombreuses, sont essentiellement concentrées dans deux ou trois villes, le Cameroun dispose d'une population très dynamique de plus de 20 millions d'habitants répartis entre les zones rurales et urbaines et bénéficient des conditions naturelles très favorables à la production agricole.

Tous ces atouts font du Cameroun aujourd'hui, le grenier de la sous-région de l'Afrique centrale. De ce fait, le défi d'une gestion efficiente du secteur agricole et de la sécurité alimentaire du pays ne concerne pas seulement le niveau national, mais il s'étend à l'échelle sous régionale dont la négligence peut conduire à une instabilité sociale du pays.

Le secteur agricole du Cameroun consomme le fuel et l'électricité. La consommation de l'électricité est effectuée par les pompes qui sont conduites par des moteurs électriques (très peu utilisé) et par les ampoules pour l'éclairage, tandis que la consommation pétrolière est réalisée par beaucoup de différents dispositifs. Cependant, les dispositifs agricoles principaux sont vus pour être comme tracteurs et combiner-moissonneuses.

III-1-1 Consommation énergétique du secteur de l'agriculture

Les données sur la consommation énergétique du secteur agricole de 2001 à 2010 ont été obtenues Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, de AES Sonel, et du Ministère de l'Eau et de l'Energie et elles ont été converties en Téra Joules. Le tableau 14 nous donne la consommation énergétique et exergetique de ce secteur.

De ce tableau, nous pouvons faire le constat que très peu d'énergie fossile est utilisé dans le secteur agricol ; ce qui implique aussi une basse utilisation des engins destinés à l'industrialisation de ce secteur. Ceci traduit fortement le fait qu'au Cameroun le secteur agricole bien qu'important pour la population n'est pas industrialisé. Les méthodes rudimentaires sont encore utilisées par les populations dans la production des différentes cultures. D'où le fait qu'il n'existe pas beaucoup d'entreprises industrielles agricoles au Cameroun. La majeure partie des cultures exportées est produite par des personnes qui utilisent les « efforts humains » et pas des engins appropriés pour la production à grande échelle.

Tableau 14: Consommation énergétique et exergetique du secteur agricole (TJ)

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Electricité	190	170	180	180	210	190	140	170	170	180
Energie du fuel	6,93	5,48	6,15	6,05	6,15	7,54	6,4	7,36	7,56	8,44
Exergie du fuel	7,34	5,80	6,51	6,41	6,51	7,99	6,78	7,80	8,01	8,94
Energie totale	196,93	175,48	186,15	186,05	216,15	197,54	146,4	177,36	177,56	188,44
Exergie totale	197,34	175,80	186,51	186,41	216,51	197,99	146,78	177,80	178,01	188,94

III-1-2 Rendement énergétique et exergetique du secteur de l'agriculture

Les analyses d'énergie et d'exergie dans le secteur agricole du Cameroun sont effectuées sur sa consommation de l'électricité aussi bien que sur sa consommation de produit pétrolier. L'électricité est employée pour l'éclairage et le produit pétrolier pour les engins destinés à la production. Le secteur agricole au Cameroun n'est pas vraiment industrialisé ; les techniques rudimentaires conséquentes sont toujours en train d'être employées.

Les engins utilisés ici pour le secteur agricole étant des tracteurs, le calcul du rendement de ce secteur obéit aux hypothèses de calcul faites pour le secteur de transport d'où les approximations faites pour le secteur de transport restent valable pour le secteur agricole (uniquement pour les tracteurs et autres appareils utilisés dans ce secteur). Ainsi les différents rendements sont calculés et présentés dans la figure 22.

Une comparaison avec les travaux faits dans la littérature est présentée dans la figure 23 (Turquie par Ediger et Huvaz (2006) Arabie saoudite par Dincer et al. (2005) Norvège par Ertesvag (2003) et l'Iran par Avara et Karami (2010). La faible efficacité du secteur camerounais est sans doute due à son non industrialisation.

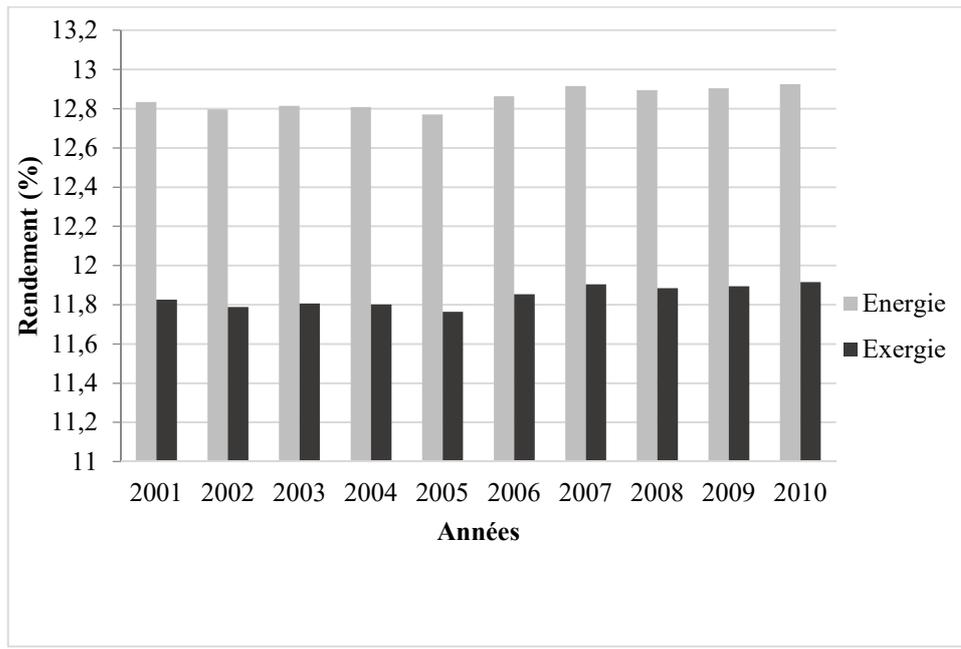


Figure 22: Rendement énergétique et exergetique du secteur agricole au Cameroun

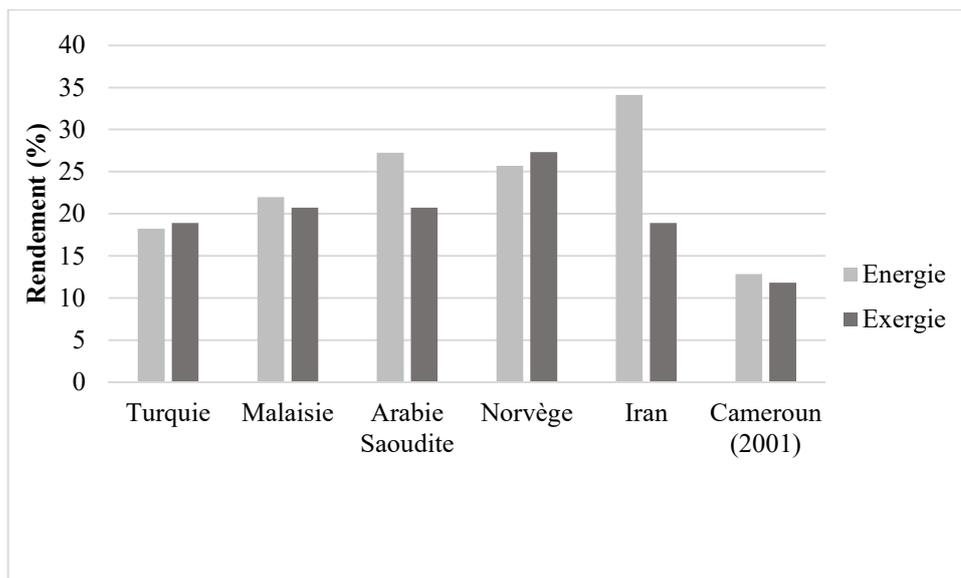


Figure 23: Comparaison du secteur agricole du Cameroun avec celui d'autres pays.

III-2 Autres secteurs tertiaires

Compte tenu de la diversité de la nature des activités dans ce groupe, on constate que toutes les formes d'énergie sont utilisées. Les analyses faites dans la suite seront uniquement relatives à l'énergie électrique car ce sont les données qui ont été mises à notre disposition par AES Sonel et le Ministère de l'Eau et de l'Energie.

Afin de s'appréhender de la consommation énergétique dans ce secteur, nous avons mené une enquête. Elle a été faite dans la ville de Yaoundé et Bafoussam, spécialement sur :

- Quatre Ministères (le Ministère de l'Eau et de l'Energie, le Ministère des Finances, le Ministère de la Santé, le Ministère du Travail et de la Sécurité Social) ;
- Quatre hôpitaux (l'hôpital génico – obstétrique, hôpital central, hôpital général et le Centre Hospitalier Universitaire) ;
- Quatre hôtels (Hilton, Djeuga palace, hotel Altitel, et Talotel).

Le but de cette enquête était de recueillir les informations sur :

- le type d'appareil utilisé (appareil électrique ou à fuel) ;
- les informations détaillées sur chaque appareil utilisé (leurs puissances, la durée d'utilisation journalière, leurs nombres...);
- le type d'appareil utilisé pour l'éclairage (ampoule à incandescent ou fluorescent) leur nombre et la durée d'utilisation journalière.

Au terme de notre enquête, nous avons regroupé les activités utilisatrices d'énergies en trois groupes :

- La climatisation ;
- L'éclairage ;
- Les appareils électriques.

III-2-1- Evaluation des rendements

III-2-1-1- Eclairage

De même que dans le secteur résidentiel, les appareils utilisés pour l'éclairage dans ce secteur sont de deux types : les tubes fluorescents et les tubes à incandescents. Ainsi comme indiqué dans le paragraphe I-1-1, d'après les travaux menés par Rosen et Dincer (1997) et Ileri et Gurer (1998), les rendements énergétiques et exergetiques de ces deux appareils sont respectivement 5 % et 4,5% pour les tubes à incandescent, et 20% et 18,5% pour les tubes fluorescents. Comme les résidences camerounaises sont composées des deux types de tube, les différents rendements sont donc :

$$\eta = \frac{20+5}{2} = 12,5\%$$

$$\psi = \frac{18,5+4,5}{2} = 11,5\%$$

III-2-1-2- Climatisation

Lors de notre enquête, nous nous sommes rendus compte de que, plusieurs bureaux visités possédaient un climatiseur et, d'après les études antérieures, l'analyse des rendements des climatiseurs nécessite une attention particulière par rapport aux autres appareils électriques. De par les études antérieures, son rendement énergétique est estimé à 100% ((Al – Ghandoor et al., 2008) ; (Dincer at al., 2004b)). Le rendement exergetique de cet appareil est calculé en utilisant la formule II-31 :

$$\psi = \eta \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$$

$$\psi = 100 \left(1 - \frac{298}{303}\right) = 1,65\%$$

III-2-1-3- Appareils électriques

Les appareils électriques ici regroupent plusieurs types d'appareil selon le lieu enquêté. Dans les bureaux administratifs nous rencontrons des ordinateurs, des imprimantes, des photocopieurs. Les hôpitaux ont d'autres types d'appareils appropriés à leurs services ainsi que les hôtels. Les études menées par Dincer et al. (2004b) et Ertesvag (2004) nous donnent le rendement énergétique de ces appareils. Ainsi, en utilisant l'expression II-31 nous avons :

$$\psi = 180 \left(1 - \frac{298}{303}\right) = 1,32\%$$

Le tableau 15 nous donne un récapitulatif des autres secteurs (sous – secteur, appareils rencontrés, température d'utilisation, rendement énergétique et exergetique).

III-2-2 Consommation énergétique des autres secteurs

La consommation énergétique dans ce secteur est présentée comme suit (tableau 16). Les activités des autres secteurs ont aussi un impact sur le bilan énergétique national car elles représentent 20% de la consommation finale totale. Leur fonctionnement nécessite un apport en énergie et le plus souvent sous des formes les plus variées. Concernant la consommation en

énergie électrique, les niveaux de tension d'approvisionnement sont la basse et la moyenne tension.

Tableau 15: Répartition d'énergie et différents rendements aux autres secteurs

Sous - secteurs	Appareils rencontrés	Température d'utilisation (K)	Rendement énergétique et exergetique (%)	
			η_e	ψ_e
Administrations	Climatiseurs	303	100	1.65
	Appareils électriques	303	80	1.32
	Éclairages	-	12.50	11.50
Hôtels	Climatiseurs	303	100	1.65
	Appareils électriques	303	80	1.32
	Éclairages	-	12.50	11.50
Éclairage de rues	éclairages	-	12.50	11.50
Autres (églises, marchés, super marchés, ..)	Climatiseurs	303	100	1.65
	Appareils électriques	303	80	1.32
	Éclairages	-	12.50	11.20
Hôpital	Climatiseurs	303	100	1.65
	Appareils électriques	303	80	1.32
	Éclairages	-	12.50	11.50

Tableau 16: Consommation (TJ) énergétique dans les autres secteurs

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Hôtels	270	270	300	320	340	360	360	350	400	420
Administrations	600	720	650	640	730	830	770	1230	890	970
hôpitals	268	326	320	328	350	382	378	400	452	466
Éclairage de rues	134	163	160	164	175	191	189	200	226	233
Autres	938	1141	1120	1148	1225	1337	1323	1400	1582	1631
Total	2210	2620	2550	2600	2820	3100	3020	3580	3550	3720

La consommation de la basse tension est fortement dominée par le secteur tertiaire (églises, marchés, supermarchés...) tandis que, l'administration est le secteur qui consomme beaucoup en moyennes tensions.

III-2-3 Rendement énergétique et exergetique des autres secteurs

Des résultats issus de notre enquête, nous avons pu classer la consommation dans les autres secteurs suivant le tableau 17.

Tableau 17: Répartition de la consommation énergétique par utilisation

Sous – secteurs	Eclairage (%)	Appareils (%)	Climatisation (%)
Hôtels	40	35	25
Hôpitaux	35	35	30
Administration	40	35	25

En utilisant les données des tableaux 15, 16 et 17, les rendements énergétiques et exergetiques des sous – secteurs des autres secteurs sont calculés. Un exemple pour l'année 2010 est présenté :

Hotels:

$$\eta_h = \frac{(100 \times 105) + (80 \times 147) + (12,5 \times 147)}{105 + 147 + 147}$$

$$= 57,37\%$$

$$\psi_h = \frac{[(1,65 \times 105) + (1,32 \times 147) + (11,5 \times 147)]}{105 + 147 + 147}$$

$$\psi_h = 4,90\%$$

Administration:

$$\eta_a = \frac{(100 \times 242,5) + (80 \times 339,5) + (12,5 \times 388)}{242,5 + 339,5 + 388}$$

$$\eta_a = 58\%$$

$$\psi_a = \frac{(1,65 \times 242,5) + (1,32 \times 339,5) + (11,5 \times 388)}{242,5 + 339,5 + 388}$$

$$\psi_a = 5,47\%$$

Hôpitaux:

$$\eta_{hp} = \frac{(100 \times 116,5) + (80 \times 219,02) + (12,5 \times 130,48)}{116,5 + 219,02 + 130,48}$$

$$\eta_{hp} = 66,1\%$$

$$\psi_{hp} = \frac{(1,65 \times 116,5) + (1,32 \times 219,02) + (11,5 \times 130,48)}{116,5 + 219,02 + 130,48}$$

$$\psi_{hp} = 4,25\%$$

Eclairage de rue:

$$\eta_{er} = \frac{12,5 \times 233}{233}$$

$$\eta_{er} = 12,5\%$$

$$\psi_{er} = \frac{11,5 \times 233}{233}$$

$$\psi_{er} = 11,5\%$$

Autres:

$$\eta_{au} = \frac{(100 \times 407,75) + (80 \times 570,85) + (12,5 \times 652,4)}{407,75 + 570,85 + 652,4}$$

$$\eta_{au} = 58\%$$

$$\psi_{au} = \frac{(1,65 \times 407,75) + (1,32 \times 570,85) + (11,5 \times 652,4)}{407,75 + 570,85 + 652,4}$$

$$\psi_{au} = 5,47\%$$

En utilisant la répartition énergétique par sous – secteur, les rendements globaux des autres secteurs sont calculés en utilisant les formules suivantes et présentés à la figure 24.

$$\eta_g = \sum Re \times \eta_i$$

Où Re représente la repartition énergétique de chaque sous – secteur et η_i son rendement énergétique

$$\eta_g = (57,37 \times 0,112) + (58 \times 0,260) + (66,1 \times 0,125) + (12,5 \times 0,062) + (58 \times 0,438)$$

$$\eta_g = 56,093\%$$

$$\psi_g = \sum Re \times \psi_i$$

$$\psi_g = (4,90 \times 0,112) + (5,47 \times 0,260) + (4,25 \times 0,125) + (11,5 \times 0,062) + (5,47 \times 0,438)$$

$$\psi_g = 5,63\%$$

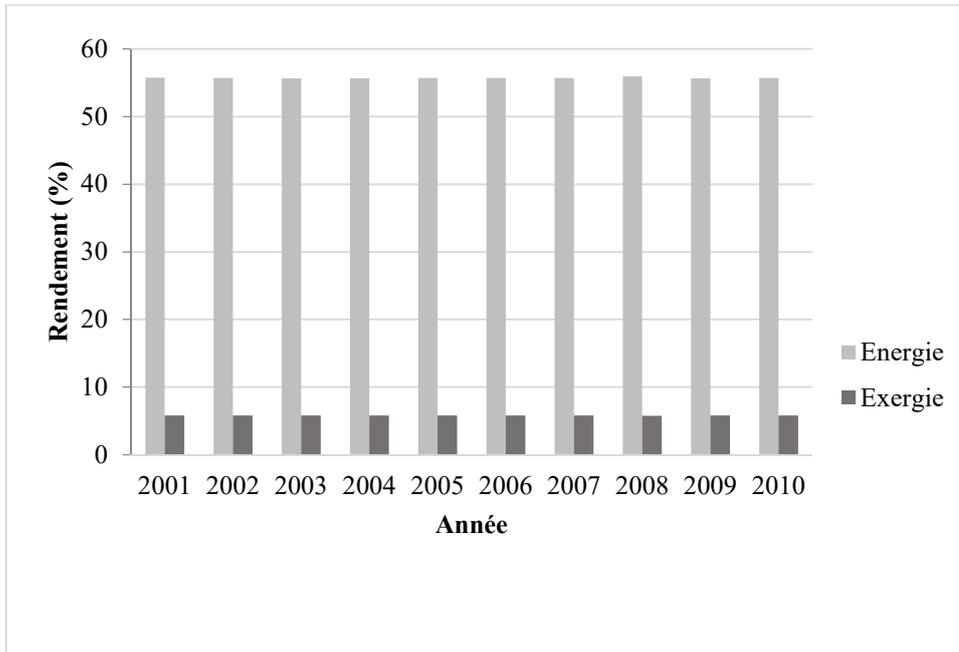


Figure 24: Rendement énergétique et exergetique des autres secteurs au Cameroun

Afin de savoir lequel des sous – secteurs est le moins efficace, nous avons calculé le ratio énergie sur exergetie. Nous nous rendons compte que le sous – secteur le moins efficace est l’hôpital avec un ratio supérieur à 12 (figure 25). La raison pouvant expliquer cela est la forte utilisation de la climatisation (30 %) appareil qui lors de son utilisation renferme beaucoup d’irréversibilités.

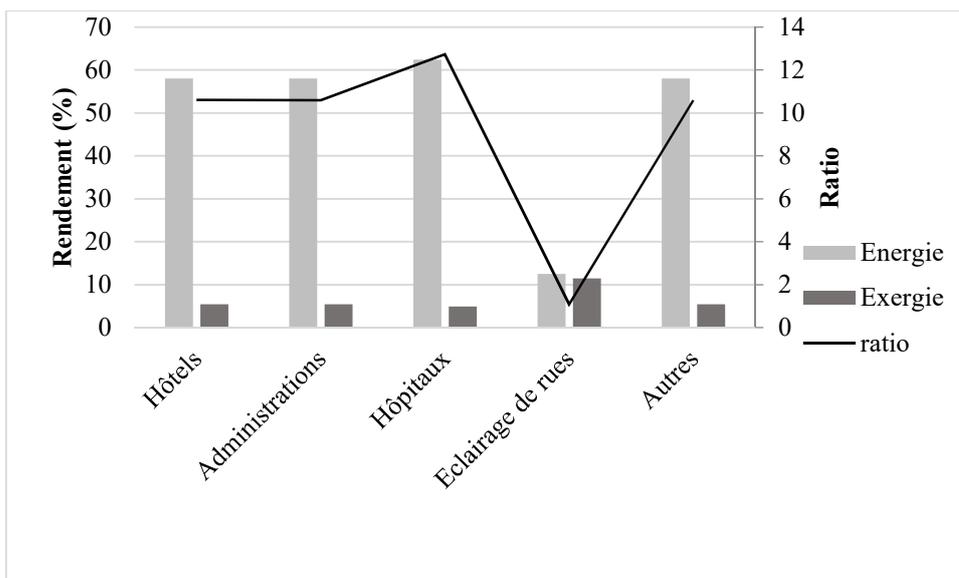


Figure 25: Rendement énergétique et exergetique par sous - secteurs

En faisant une comparaison de nos travaux avec ceux menés dans d'autres pays en occurrence l'Arabie saoudite, la Norvège et la Suède (tableau 18), nous constatons que le rendement exergetique du secteur commercial du Cameroun est inférieur à celui de la Suède, la Norvège et l'Arabie Saoudite et de la Turquie. La raison est le remplacement de l'énergie fossile par l'énergie électrique dans ce secteur. En effet, dans le but de rendre l'utilisation de l'énergie efficiente dans ce secteur, les gouvernements suédois et norvégiens ont remplacé les systèmes de chauffage fuel par des systèmes électriques (système plus efficient) (Ertesvåg, 2001).

Tableau 18: Comparaison des autres secteurs du Cameroun

Pays	Années	Rendement	Commerciaux	Administrations	Hôpitaux	Hôtels	Reference
Arabie Saoudite	2000	Energie (%)	75.6	68	82.86	-	Dincer et al., 2004b
		Exergie (%)	5.78	9.85	6.86	-	
Cameroun	2010	Energie (%)	58	58	66.10	57.37	
		Exergie (%)	5.47	5.47	4.1	4.90	
Norvège	2000	Energie (%)	35	-	-	--	Ertesvag, 2004
		Exergie (%)	29.40	-	-	-	
Suède	1994	Exergie (%)	13	-	-	-	Wall, 1994
Turquie	1995	Energie (%)	55	-	-	-	Iler et al., 1998
		Exergie (%)	6	-	-	-	

Les flux énergétiques et exergetiques pour l'année 2010 (secteur agricole y compris) peuvent être résumés dans la figures 26 et 27.

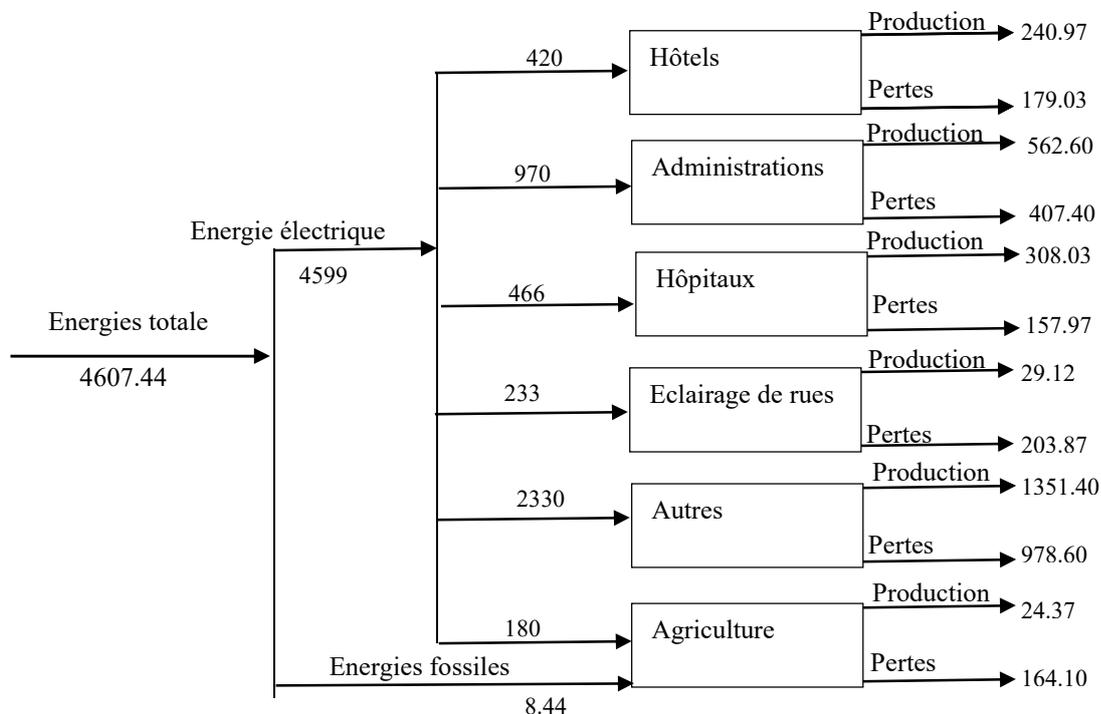


Figure 26: Flux énergétique (TJ) dans les autres secteurs

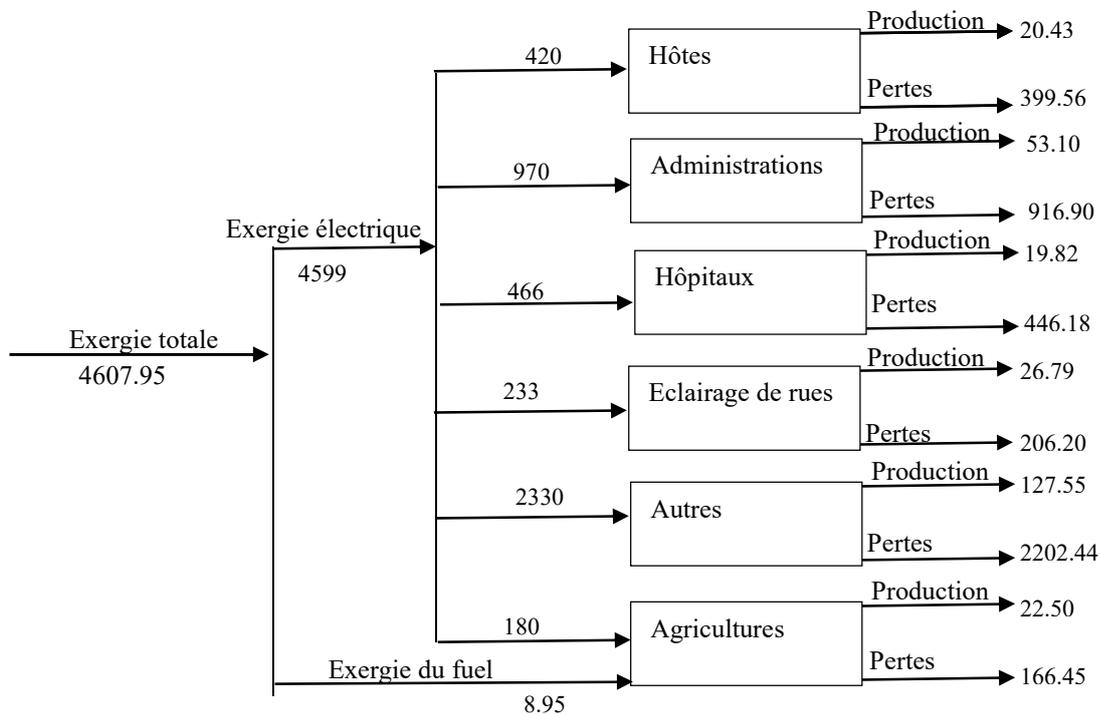


Figure 27: Flux exergetique (TJ) dans les autres secteurs

IV-DISCUSSION

IV-1-Evaluation des pertes au secteur résidentiel

Dans les études faites plus haut le bois énergie a été exclu car les données sur la production du bois – énergie ne sont pas connues (secteur pour l'instant informel). Néanmoins en introduisant la consommation du bois – énergie dans le secteur résidentiel, nous obtenons un autre rendement car le bois énergie représente majoritairement la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel (tableau 19).

D'après ce tableau il en ressort de manière évidente que le bois énergie occupe à plus de 90 % la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel et son utilisation est uniquement réservée à la cuisson. En calculant une fois de plus le rendement exergetique sous les hypothèses présentées au paragraphe I nous obtenons :

Tableau 19: Evolution de la consommation d'énergie (PJ) dans le secteur résidentiel (bois – énergie inclus)

secteurs	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Bois – énergie	127.03	130.68	134.44	138.29	142.26	145.46	148.1	151.11	158.08	158.08
Exergie	141,0	145,05	149,23	153,5	157,91	161,46	164,39	167,73	175,47	175,46
fuel	5,6	5.8	6.7	6.33	5.54	5.65	5.32	5.18	5.16	5.22
Exergie	0,596	0,61	7,1	6,71	5,87	5,99	5,64	5,49	5,47	5,53
Energie électrique	1.92	2.04	2.18	2.49	2.72	2.92	2.97	3.21	3.24	3.55
Total exergie	143.51	147.71	158.51	162.70	166.5	170.37	173	1176.43	184.18	184.55

$$\psi_b = 40 \left(1 - \frac{298}{374} \right) = 8,12 \%$$

Ainsi, le nouveau rendement de ce secteur devient :

$$\eta_g = (\eta_e \times WF_e) + (\eta_f \times WF_f) + (\eta_b \times WF_b) \quad \text{III-5}$$

$$\psi_g = (\psi_e \times WF_e) + (\psi_f \times WF_f) + (\psi_b \times WF_b) \quad \text{III-6}$$

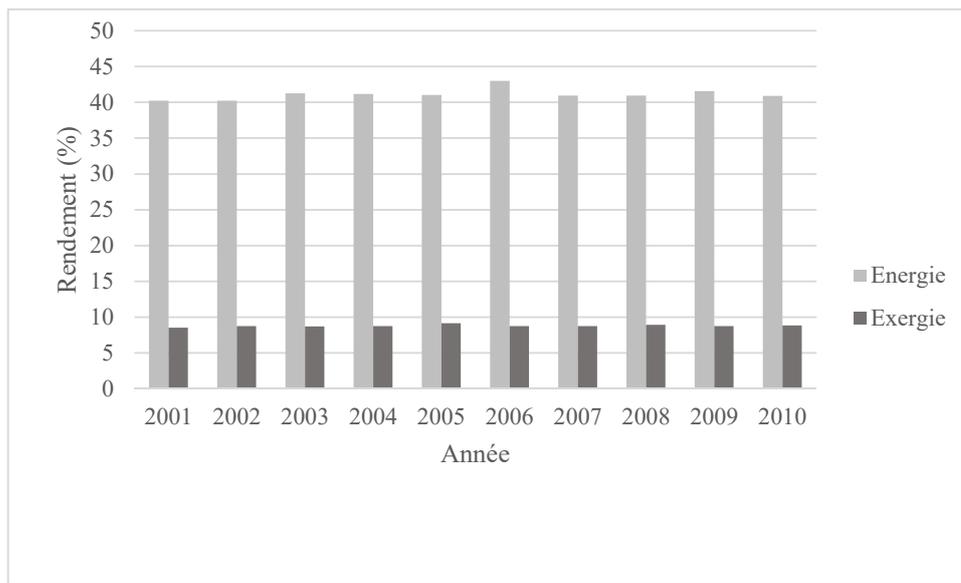


Figure 28: Rendement énergétique et exergetique du secteur résidentiel bois énergie inclus

Avec η_b , ψ_b les rendements énergétique et exergetique du bois – énergie et WF_b le pourcentage d'utilisation du bois énergie dans le secteur résidentiel.

Les résultats sont présentés sur la figure 28.

En utilisant les données du tableau 19 et ceux de la figure 21, l'évaluation de l'énergie et de l'exergie output est donnée par le tableau 20 et les pertes exergetiques par la figure 29.

Tableau 20: Energies et exergetie output du secteur résidentiel

Année	Energies output				Exergies outputs			
	Fuel	électricité	Boi- énergie	Total	Fuel	électricité	Boi- énergie	Total
2001	3,64	0,95	50,81	55,40	0,78	0,70	11,42	13,30
2002	3,75	1	52,27	57,03	0,80	0,74	11,74	13,82
2003	4,36	1,08	53,77	59,22	0,93	0,80	12,08	14,23
2004	4,12	1,23	55,31	60,68	0,88	0,90	12,43	14,56
2005	3,64	1,34	56,90	61,89	0,77	0,99	12,79	14,94
2006	3,67	1,45	58,18	63,31	0,79	1,07	13,07	14,15
2007	3,47	1,48	59,24	64,19	0,74	1,09	13,31	15,15
2008	3,67	1,60	60,44	64,40	0,72	1,17	13,58	15,48
2009	3,67	1,60	63,32	68,20	0,72	1,18	14,21	16,12
2010	3,40	1,75	63,23	68,39	0,73	1,29	14,21	16,24

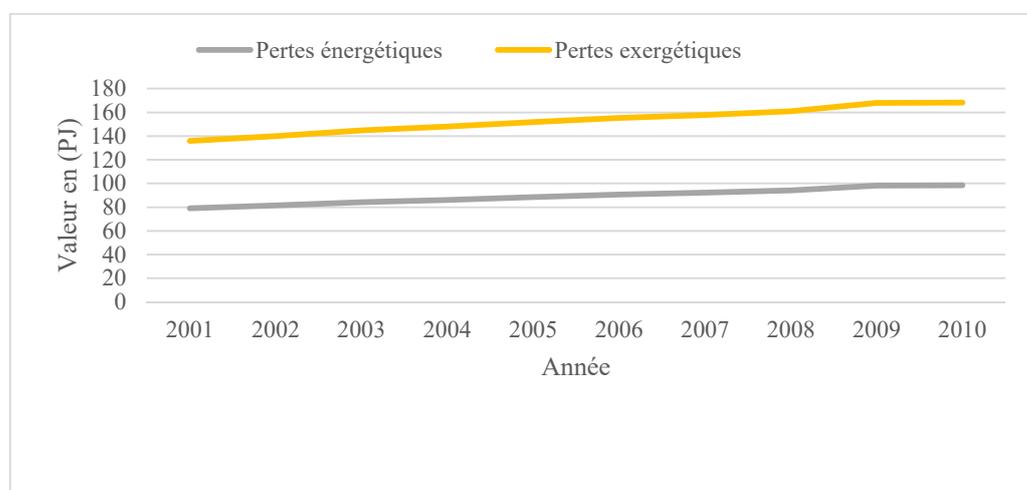


Figure 29: Pertes énergétiques et exergetiques du secteur résidentiel

De la figure 29 nous pouvons faire le constat que la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel au Cameroun reste encore inefficace. En effet, de part les différents rendements énergétiques et exergetiques calculés (rendement qui se situe autour de 8 % et 40 %) respectivement), nous constatons que plus de la moitié de l'énergie produite est perdue tandis que plus des 9/10 d'exergie produite sont perdues.

Ce résultat traduit sans doute l'état de notre pays (pays sous développé) les moyens mis en place pour son développement ne sont pas effectifs ; la forte utilisation du bois énergie comme source d'énergie pour la cuisson ne facilite pas l'efficacité du secteur. De plus, la faible disponibilité de l'énergie électrique pour les populations n'est pas un atout à l'amélioration de ce rendement. Comme nous l'avons dit au chapitre II, le facteur de qualité lié à l'utilisation de l'énergie électrique est l'unité d'où une forte utilisation de cette énergie entraîne forcément une baisse des irréversibilités et une amélioration du rendement. Mais la réalité du secteur résidentiel au Cameroun est qu'en 2010, 60% de la population camerounaise a accès à l'électricité. La raison principale est la non extension du réseau électrique (processus qui a été enclenché). De plus, d'après le taux d'accès comptable à l'électricité qui se définit comme le ratio entre le nombre d'abonnés et le nombre total de ménages, le nombre de nouveaux abonnés n'est pas très élevé. En effet il est resté très stable entre les années 2000 à 2006 mais après il a subi une augmentation d'environ 1 % tout en restant toujours très faible ; passant ainsi de 16,2% en 2007 à 18,9 % en 2010 (Rapport SIE, 2010). Cet indicateur montre clairement que les nouveaux abonnés sont très peu nombreux, d'où la nécessité de réhabiliter le réseau électrique au Cameroun.

IV-2-Evaluation des pertes au secteur de transport

Des données du tableau 12, et des rendements énergétiques et exergetiques du secteur de transport, nous présentons les valeurs énergétiques et exergetiques outputs du secteur de transport. Elles sont données dans le tableau 21. Et les pertes par la figure 30.

La figure 30 nous présente les pertes enregistrées dans le secteur de transport. Ces pertes traduisent l'état des lieux de ce secteur. En effet bien que sa contribution n'est pas à négliger dans l'économie du pays (4% du PIB) les moyens mis sur pied pour le rendre efficace ne sont pas toujours efficaces. Ce constat traduit aussi juste le fait du développement économique de notre pays car de part sa situation de Pays en Voie de Développement, le Cameroun ne dispose pas des moyens pour mettre sur pied des systèmes de transport qui utilisent de l'énergie

électrique comme la Turquie, la Grèce... Ceci étant, le trafic, et la fraude qui régissent la vente de l'énergie fossile va de plus en plus croissant.

Tableau 21: Energies et exergies outputs du secteur de transport

Années	Energie outputs		Exergies outputs	
	Routier (PJ)	Aérien (TJ)	Routier (PJ)	Aérien (TJ)
2001	5,2534	8,141	5,2550	8,172
2002	5,3089	6,846	6,3106	6,877
2003	5,4470	7,074	5,4468	7,107
2004	5,6240	5,822	5,6247	5,848
2005	5,8135	8,86	5,8128	8,872
2006	6,0662	6,191	6,0659	6,188
2007	6,3186	2,243	6,3186	2,253
2008	6,4584	2,883	6,4578	2,893
2009	7,4210	3,059	7,4241	3,069
2010	7,9919	0,271	7,9979	0,28

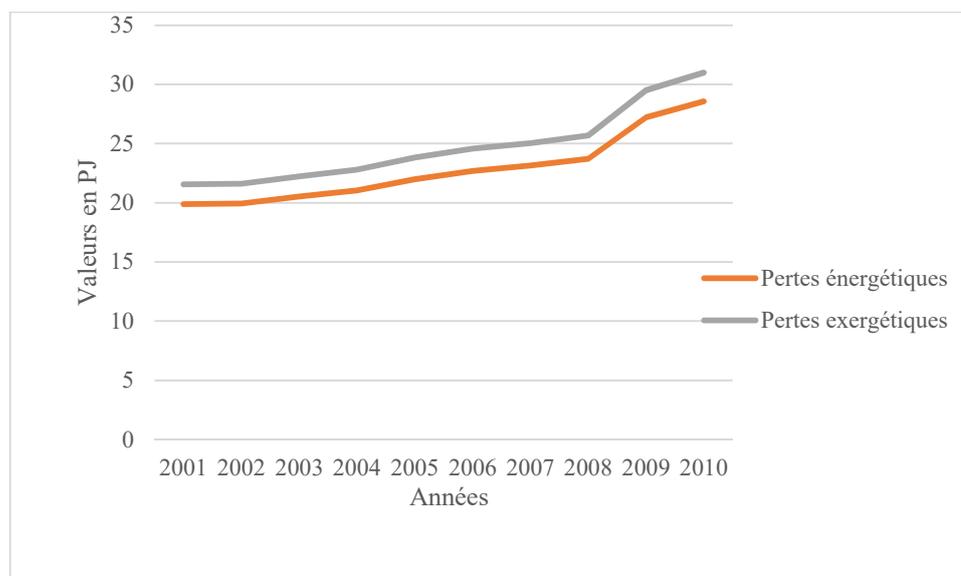


Figure 30: Pertes énergétiques et exergetiques du secteur de transport.

L'état défectueux des routes aussi n'est pas un atout pour l'amélioration de l'efficacité de ce secteur. Plus les routes son défectueuses, plus elles entraînent une détérioration rapide des moteurs des véhicules et ceux-ci augmentent la consommation en carburant des véhicules pour fournir un faible rendement. La politique gouvernementale gagnera donc à réaménager les routes afin de faciliter une libre circulation des biens et des personnes.

IV-3-Evaluation des pertes dans les autres secteurs

IV-3-1-Evaluation des pertes au secteur agricole

Afin d'évaluer les pertes (figure 31) dans ce secteur, nous calculons les énergies et exergies outputs et les présentons dans le tableau 22.

Tableau 22: Energies et exergies outputs du secteur agricole

Années	Energies outputs (TJ)	Exergies outputs (TJ)
2001	25,27	23,33
2002	22,45	20,72
2003	23,85	22,02
2004	23,83	21,99
2005	27,60	25,47
2006	25,40	23,46
2007	18,90	17,47
2008	22,87	21,13
2009	22,91	21,17
2010	24,35	22,51

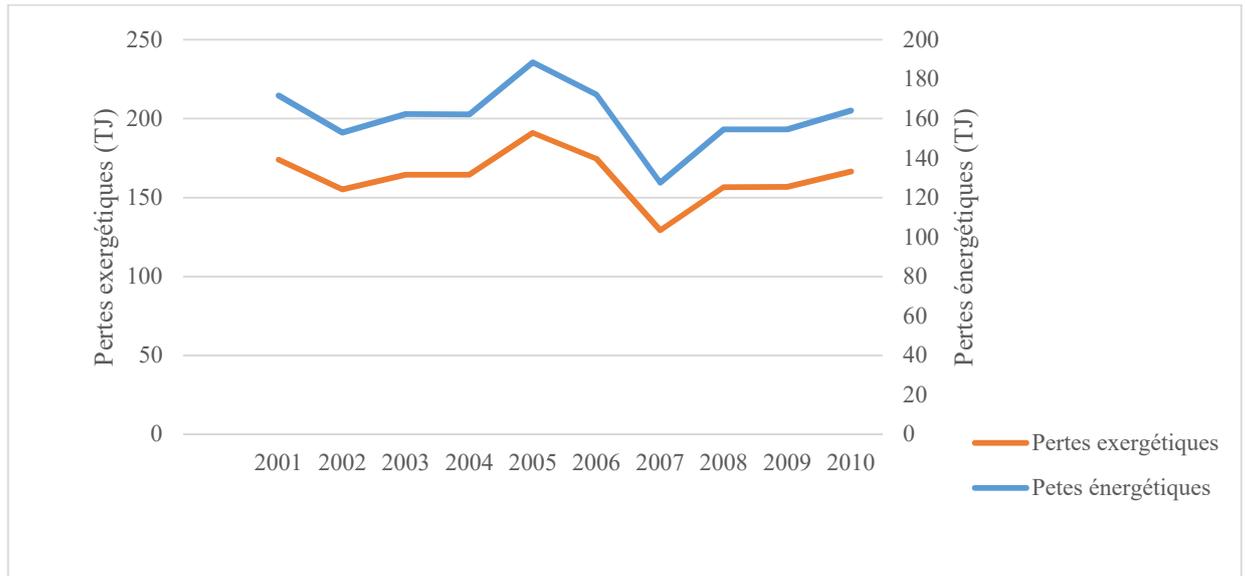


Figure 31: Pertes énergétiques et exergetiques du secteur agricole.

Vue ces importantes pertes, des politiques doivent être mises en place car la défaillance de ce secteur n'aura pas de conséquence sur le Cameroun uniquement, mais dans toute la sous-région. Les actions à mener passent notamment par :

- la modernisation de l'appareil de production actuelle, constituée essentiellement de petites exploitations et exploitations familiales et qui regorgent encore de réserves de productivités énormes ;
- la promotion et le développement des moyennes et grandes exploitations agricoles.

La modernisation de l'appareil de production vise la mobilisation des réserves de productivité grâce à une utilisation plus accrue des facteurs modernes de production comme les engrais, les pesticides, le matériel végétal amélioré, les machines agricoles.

C'est pour cela que des actions à soutenir et à encourager sont les suivantes :

- faciliter grâce aux appuis divers et multiformes, l'acquisition des engrais et pesticides par les organisations professionnelles ;
- encourager la mécanisation grâce entre autre à une politique d'acquisition des tracteurs à travers les pays amis ;
- soutenir de manière multiforme les filières à fort enjeu de sécurité alimentaire à l'instar des filières maïs, riz, sorgho, manioc, pomme de terre, patate douce, banane plantain, huile de palme ;

- encourager la mise en place des petites unités de transformation et de conditionnement des produits agricoles.

Pour ce qui est de la seconde action à mener à savoir la promotion et le développement des moyennes et grandes exploitations agricoles, le gouvernement a entrepris certaines actions comme le projet pilote d'appui à l'installation des jeunes agriculteurs, qui a été une réussite sur les sites de Wassandé dans l'Adamaoua et Nlobesse dans le Sud. A présent, l'extension du projet sur l'ensemble du territoire national est entreprise. La signature des conventions avec les opérateurs économiques à l'instar des groupes Afriland et Fadyl, le GIC KWATAL NDEMRI, la société GREEN LAND et le RADEM pour ne citer que ceux-là, y participent également.

IV-3-1-Evaluation des pertes dans les autres secteurs

Du tableau 22, les valeurs de l'énergie output des chaque sous – secteur sont évaluées et données dans le tableau 23. Les pertes énergétiques enregistrées dans ce secteur sont également présentées dans la figure 32.

Tableau 23: Energie et exergeries outputs dans les autres secteurs

Années	Energies outputs					Exergies outputs				
	Hôtels	Adm.	Hop.	Ecl.	Autres	Hôtels	Adm.	Hop.	Ecl.	Autres
2001	154.84	348	177.14	16.75	1240.78	13.23	32.82	11.39	15.41	124.15
2002	154.84	417.6	215.48	20.37	1470.08	13.23	39.38	13.85	18.74	147.62
2003	172.05	377	211.52	20	1430.17	14.7	35.55	13.6	18.4	143.51
2004	183.52	371.2	216.80	20.5	1457.86	15.68	35.00	13.94	18.86	146.28
2005	194.99	423.4	231.35	21.87	1582.11	16.66	39.93	14.87	20.12	158.59
2006	206.46	481.4	252.50	23.87	1739.69	16.74	45.40	16.23	21.96	174.37
2007	206.86	446.6	249.85	23.65	1693.88	17.64	42.11	16.05	21.73	169.92
2008	20.72	713.4	264.4	25	2015.52	17.15	67.28	17	23	201.01
2009	229.40	516.2	298.77	28.25	1990.18	19.6	48.68	17.21	25.99	200.01
2010	240.87	562.6	308.02	29.12	2086.60	20.58	53.05	19.80	26.79	209.45

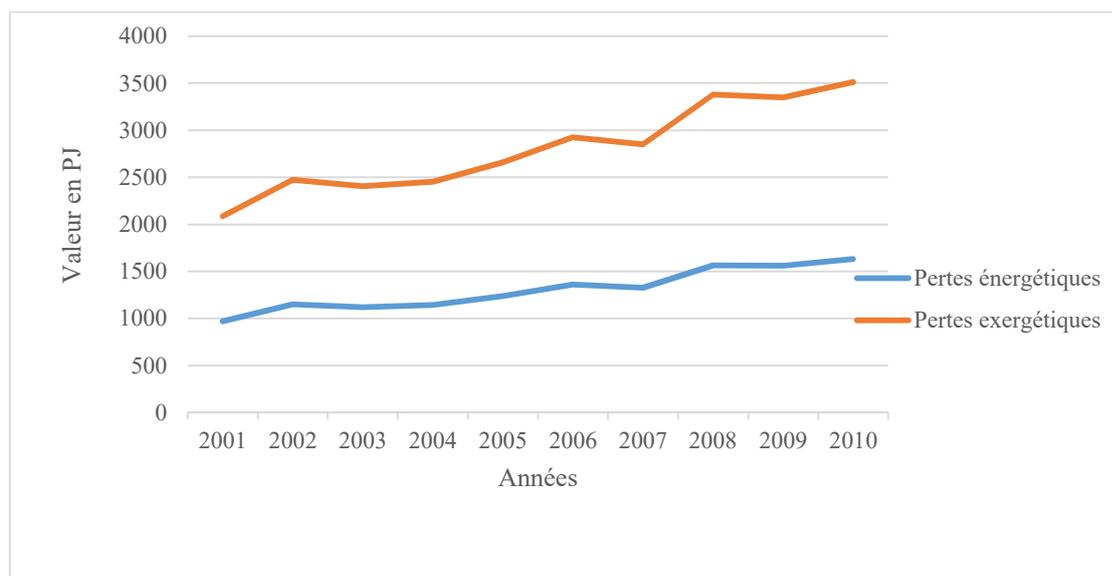


Figure 32: Pertes énergétiques et exergetiques des autres secteurs

Les pertes croissantes d'énergies et d'exergies que l'on rencontre dans ce secteur sont dues soit à la mauvaise gestion des équipements disponibles, soit aussi le matériel utilisé n'est pas efficient. En effet, le souci d'économie ne se fait pas ressentir chez bon nombre de services administratifs (éteindre les appareils après usage, les ampoules lorsque le bureau est fermé...). Cette négligence bien qu'elle soit banale aux yeux de certains, est un facteur qui augmente la consommation énergétique pourtant cette énergie n'est pas utilisée efficacement. Face à cela, le Ministère de l'Eau et de l'Energie à travers ses multiples actions, a entrepris de faire reforme et un audit dans les bâtiments administratifs, ceci aura pour but, non seulement de repérer les zones de consommation inefficientes d'énergie, mais également de trouver des voies et moyens afin d'installer du matériel de pointe (appareil basse consommation énergétique, système d'éclairage intelligent...) dans les structures gouvernementales, tout ceci dans le but de réduire les dépenses énergétiques.

IV-4- Présentation générale de la consommation camerounaise

Précisons que le secteur industriel n'a pas été analysé dans le cadre de notre étude la difficulté rencontré a été l'accès aux données. Mais dans le cadre de ce paragraphe, nous utiliserons juste les consommations du secteur afin de mener la suite de nos analyses.

Le tableau 24, nous présente la consommation énergétique et exergetique du Cameroun par différent secteur.

Tableau 24: Consommation (PJ) global du Cameroun par secteur d'activité

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Transport	27,03	27,15	27,87	28,58	29,9	30,82	31,38	32,21	36,96	39,29
Résidentiel	143,59	147,7	158,51	162,77	166,5	170,37	173,	176,42	184,17	184,55
Industriel	12,15	12,75	12,68	12,09	13,03	12,58	13,02	14,06	15,12	15,04
Autre secteurs	16,88	17,72	18,08	18,6	19,26	19,92	20,12	21,1	21,83	22,07
Total	204,92	210,87	217,13	222,32	228,64	233,37	237,58	243,83	258,13	260,96

Ce tableau nous présente la répartition énergétique au Cameroun. Elle est de loin dominée par le secteur résidentiel tout au long de ces dix dernières années. Ceci s'explique par l'utilisation abusive du bois énergie dans ce secteur. Pour un pays qui se veut émergent, la consommation énergétique finale devrait être dominée par le secteur industriel et non par le secteur résidentiel qui couvre à plus de 70% la consommation énergétique du pays. Suite à nos analyses du secteur résidentiel, l'utilisation du bois – énergie était réservée majoritairement à la cuisson. En faisant un ratio de cette activité sur la consommation globale au Cameroun, nous constatons qu'environ 40 % de l'énergie produite au Cameroun est destiné à la cuisson (tableau 25) ; en d'autres termes le Cameroun produit de l'énergie pour « manger ». Un tel constat nous renchérit encore dans notre assertion selon laquelle la politique de gestion de l'énergie doit encore être revue surtout sur le cas du bois – énergie. Des mesures doivent donc être prises afin de mieux réguler son utilisation, la rendre plus bénéfique à l'ensemble des autres secteurs d'activité.

Tableau 25: Part de la cuisson (PJ) dans la consommation d'exergie au Cameroun.

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
cuisson	137,77	141,80	152,17	156,19	159,84	163,55	166,08	169,37	176,81	177,17
Total	414.41	407.62	401.2	388.71	377.83	392.38	392.62	394.66	380.74	359.39

IV-4-1- Secteur des hydrocarbures

La production pétrolière du Cameroun en 2010 a été d'environ 3,3 millions de tonnes. La société TOTAL Exploration-Production reste le plus gros producteur avec 61% des parts. Cette production poursuit le mouvement de baisse entamé depuis 1985, date du pic pétrolier observé au Cameroun. Entre 2001 et 2010, la production pétrolière du Cameroun a chuté de plus de 40%. Cependant l'intensification de la prospection pétrolière, propulsée ces dernières années

par la Société Nationale de Hydrocarbures (SNH), augure une inflexion de cette tendance à la baisse (Rapport – SIE, 2011).

Malgré cette forte production, seule une infime partie du pétrole camerounais est exploitée sur place, environ 90 % de ce pétrole est exporté, tandis que le pétrole consommé au Cameroun est importé (tableau 26). En effet, la SONARA ne disposerait pas des équipements adéquats afin de transformer le pétrole brut (trop lourd) extrait de nos sols. Ainsi, la conséquence première est que, pour subvenir aux besoins de la demande, le Cameroun doit importer le pétrole afin de le raffiner. Bien que les recettes des exportations pétrolières soient bénéfiques pour le pays (car en 2010, les recettes pétrolières représentent 21% des recettes budgétaires du Cameroun. Cette part est en baisse par rapport à 2009 (27%) et 2008 (37%)), ce tableau nous montre que, même si nous raffinons le pétrole extrait de notre sol sur place, la part des exportations restera toujours élevée puisque la production est supérieure à la consommation (inputs) et à l'importation. Afin de surmonter de déficit, la réhabilitation de la SONARA devient primordiale.

En évaluant dont les pertes enregistrées dans la gestion des hydrocarbures, nous les séparons en deux parties :

- Les Pertes issues de la gestion gouvernementales (avant l'entrée dans les différents secteurs d'activités) « pertes 1 ». En réalité les considérer comme pertes serait un abus de langage puisqu'elles renferment aussi en plus des fraudes (frelatage), les parts dédiées à l'exportation dont les ventes constituent une des entrées dans le budget de l'Etat (figure 33).
- Les pertes issues du faible rendement de chaque secteur d'activité « pertes 2 » (figure 34).

Tableau 26: Importations pétrolières (PJ)

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Production	229,77	218,05	207,38	190,91	175,85	185,34	181,88	178,83	156,15	137,34
Importation	65,14	52,42	72,71	80,02	77,11	77,2	86,68	86,14	73,41	87,8
Inputs	33,3	33,6	35,6	35,7	36,2	37,2	37,5	38,1	42,9	44,9

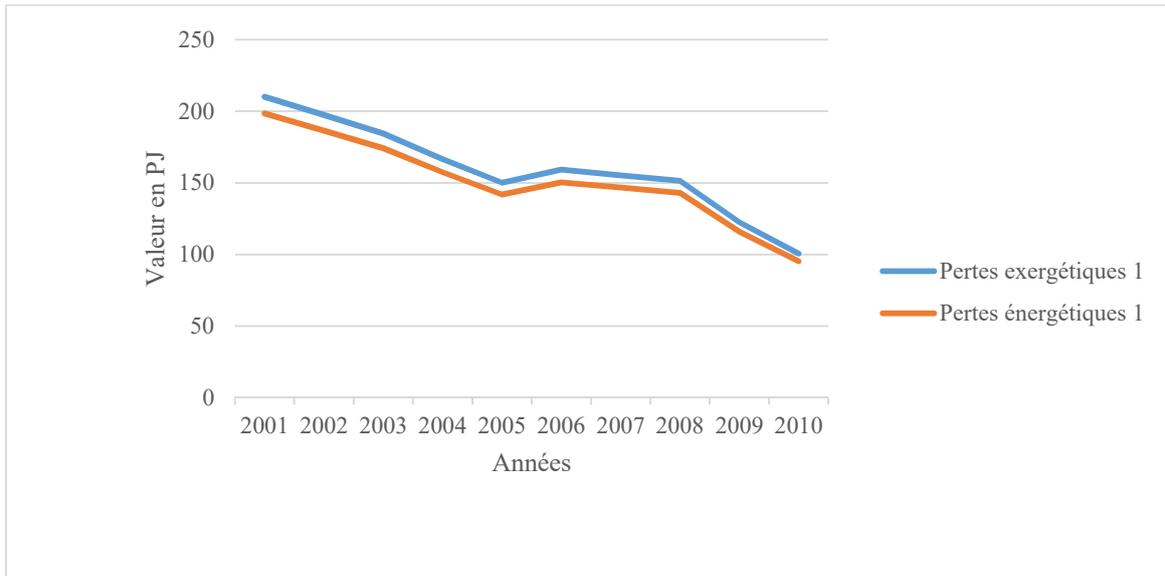


Figure 33: Pertes énergétique 1 et exergetique 1

Nous constatons qu'au fil des années ces pertes subissent des régressions. Ceci traduit l'effort qui est entrepris au niveau du gouvernement à travers la création de la Commission de Coordination de Lutte contre la Fraude des Produits Pétroliers (CCLFPP) dont la mission première est d'assainir le secteur des produits pétroliers et gaziers.

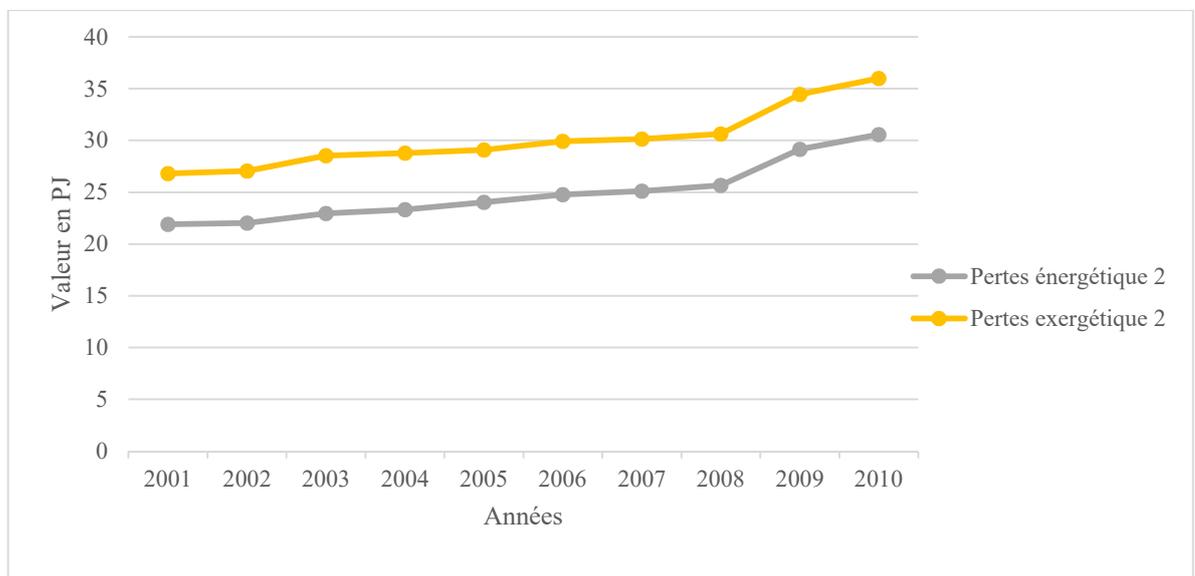


Figure 34: Pertes cumulées en énergie fossile

IV-4-2- Secteur de l'énergie électrique

Malgré le potentiel énorme que regorge le Cameroun tant bien en hydro – électricité qu'en énergie solaire, la production de l'énergie électrique ne comble pas le besoin de la population

(demande supérieure à l'offre). Plusieurs raisons expliquent cette insuffisance de l'offre mais la principale est la présence de beaucoup de pertes dues à la vétusté du matériel de production (matériel qui de par sa vieillesse ne produit pas un rendement élevé), et les pertes issues du transport de cette énergie (acheminement vers le lieu de consommation). Ces pertes s'élèvent à 25% de l'énergie produite (tableau 27). Cette offre (insuffisante) pousse beaucoup de particulier (surtout les industriels) à se tourner vers l'autoproduction afin de couvrir leurs besoins.

Précisons que les données inputs ici incluent le secteur industriel mais dans les outputs, nous ne tenons pas compte de ce secteur et nous analysons uniquement les données des secteurs étudiés plus haut (résidentiel, transport et tertiaire)

Tableau 27: Bilan de la gestion de l'énergie électrique (PJ)

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Production SONEL	12,7	12,3	13,3	14,1	14,4	14,9	15,3	16,2	17,0	14,7
Energies inputs	9.69	9.3	9.15	10.3	10.89	11.58	11.36	11.95	11.99	10.38
Energies outputs	2.19	2.48	2.51	2.69	2.92	3.19	3.17	3.61	3.60	3.94
Exergies outputs	0.82	0.89	0.94	1.06	1.15	1.24	1.26	1.37	1.38	1.50

Une des voix de résolution de ce problème a été le délestage. Elle se traduit par la privation d'énergie électrique d'une zone pour en satisfaire une autre zone. Cette politique cause de nombreuses difficultés (incendies, pertes en vies humaines, détérioration d'appareil etc). Remarquons qu'une fois de plus, cette politique de développement n'est pas propice pour le développement d'un pays.

Pour remédier à cela, le gouvernement entreprend des projets à court, moyen et long termes parmi lesquels les uns sont déjà réalisés et d'autres en cours de réalisation nous avons :

- à court terme, l'implémentation, en deux phases, d'un Programme Thermique d'Urgence (PTU) qui consiste à construire quatre centrales thermiques d'une capacité énergétique de 100MW. Dans la phase 1 du projet, une capacité totale de 40 MW est installée par le biais des trois centrales thermiques diesel de Bamenda (20 MW), Mbalmayo (10 MW) et Ebolowa (10 MW). La phase du programme prévoit la location d'une centrale thermique à Ahala, en périphérie de la ville de Yaoundé, pour une production de 60 MW ;
- à moyen terme, la mise à contribution des grandes réalisations suivantes :

- Barrage de MENVE'ELE (230 MW)
 - Centrale à Gaz de Kribi (256 MW)
 - Barrage de MEKIN (12 MW) avec une retenue d'eau de 150 millions de m³
 - Barrage de NATCHIGAL (275 MW)
- A long terme, l'entrée en action du barrage de LOM PANGAR (avec usine de pied de 30 MW). C'est un barrage de retenue d'eau de 6 milliards de m³ qui permettra aux barrages d'Edéa et de Songloulou d'être saturés à leurs puissances nominales respectives de 263 MW et 384 MW. Il permet surtout d'envisager d'autres barrages.

De nombreux autres projets sont en gestation pour d'autres sites, notamment en relation avec les pays voisins.

Les pertes enregistrées « dans l'utilisation de l'énergie électrique sont classées aussi en deux grandes parties :

- Les pertes issues de la production, du transport et de la fraude « pertes 1 » ;
- Les Pertes issues du faible rendement des secteurs d'activités « pertes 2 ».

Nous constatons d'après la figure 35 que, l'évolution des pertes 1 va de plus en plus croissant, ce qui laisse croire que les mesures prises par le gouvernement pour la lutte contre la fraude dans ce secteur restent inefficaces.

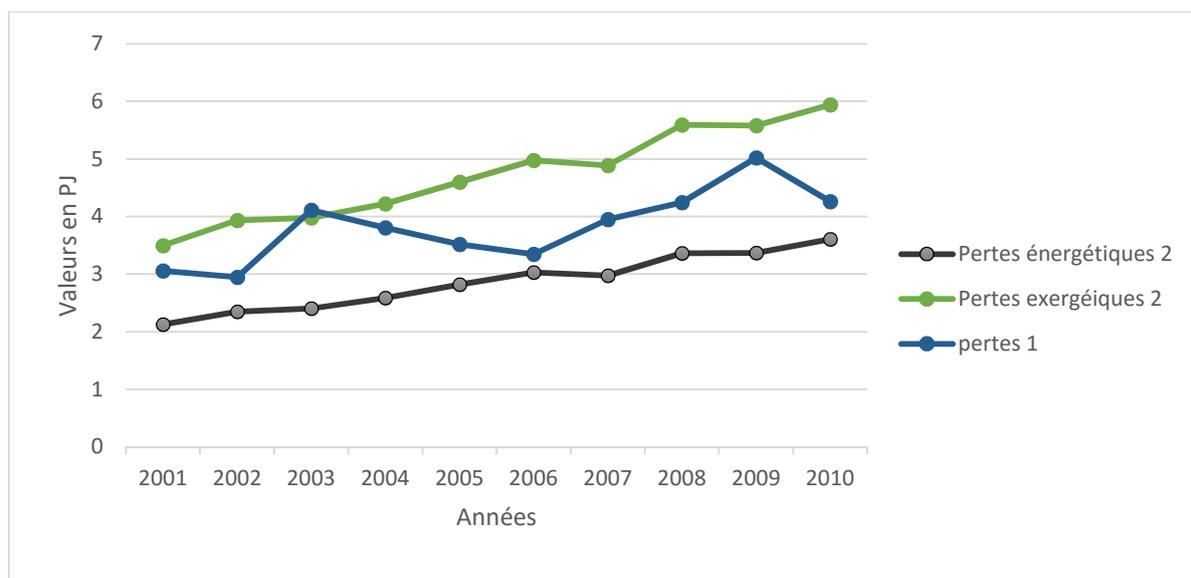


Figure 35: Pertes sur le secteur de l'énergie électrique

IV-4-3- Flux exergetique au Cameroun

Des analyses présentées précédemment, la gestion énergétique au Cameroun peut être regroupée et présentée sous forme de flux par la figure 36.

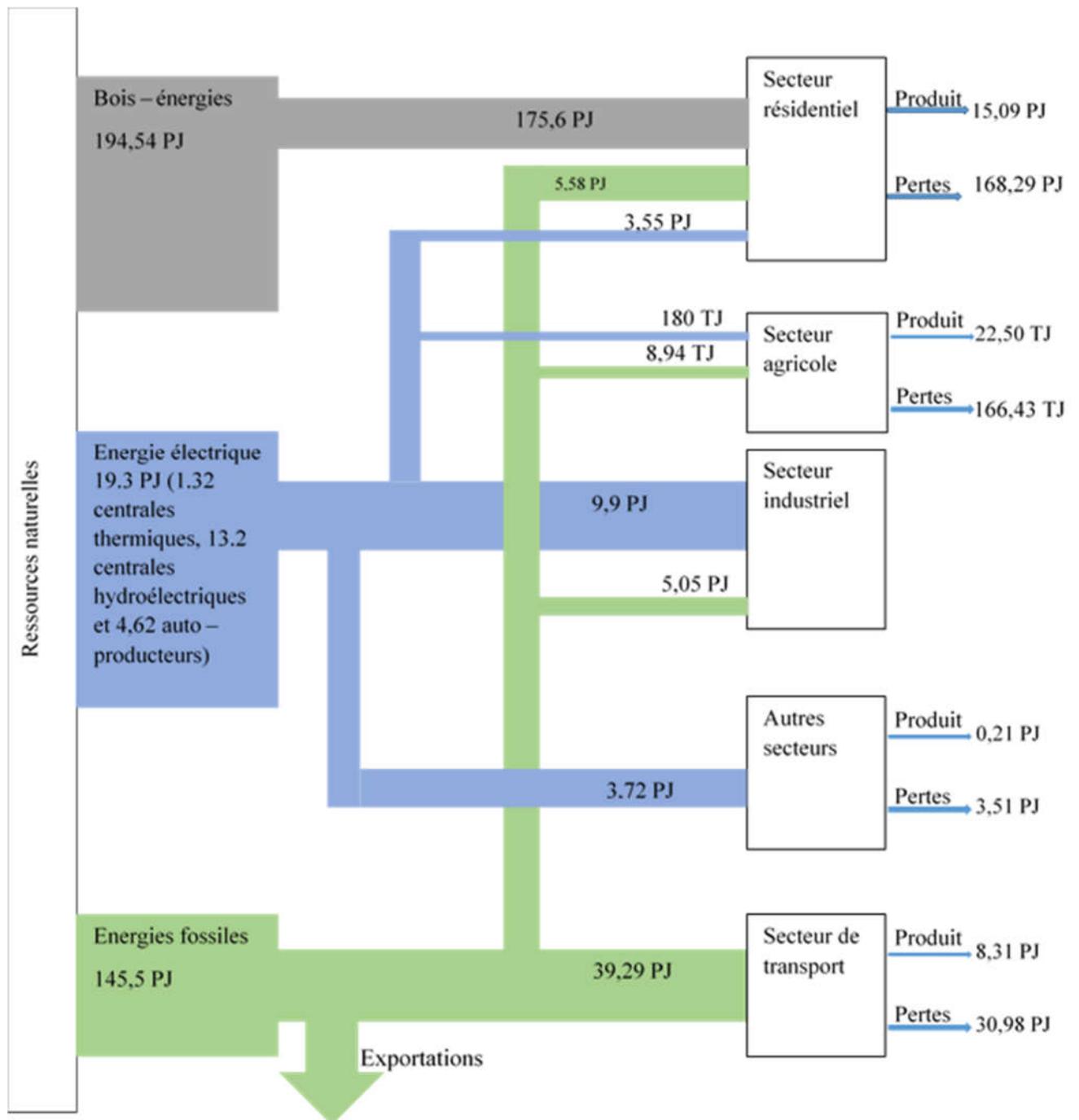


Figure 36: Flux exergetique au Cameroun en 2010

Afin de pouvoir évaluer le rendement général du Cameroun (rendement issus des quatre secteurs analysés), nous avons fait le ratio des énergies et exergies outputs sur les inputs de chaque année et le rendement « partiel » (puisqu'il sera complet quand l'analyse du secteur industriel sera effectuée) du Cameroun est présenté sur la figure 37.

La figure 37 nous présente des rendements énergétiques et exergetiques relativement constant autour de 38 % et 10 %. Ces faibles valeurs des rendements remettent en question la politique de gestion du Cameroun qui doit être revue afin d'améliorer la situation économique du pays.

La figure 30 nous présente les pertes enregistrées dans le secteur de transport. Ces pertes traduisent l'état des lieux de ce secteur. En effet bien que sa contribution n'est pas à négliger dans l'économie du pays (4% du PIB) les moyens mis sur pied pour le rendre efficace ne sont pas toujours efficaces. Ce constat traduit aussi juste le fait du développement économique de notre pays car de part sa situation de Pays en Voie de Développement, le Cameroun ne dispose pas des moyens pour mettre sur pied des systèmes de transport qui utilisent de l'énergie électrique comme la Turquie, la Grèce... Ceci étant, le trafic, et la fraude qui régissent la vente de l'énergie fossile va de plus en plus croissant.

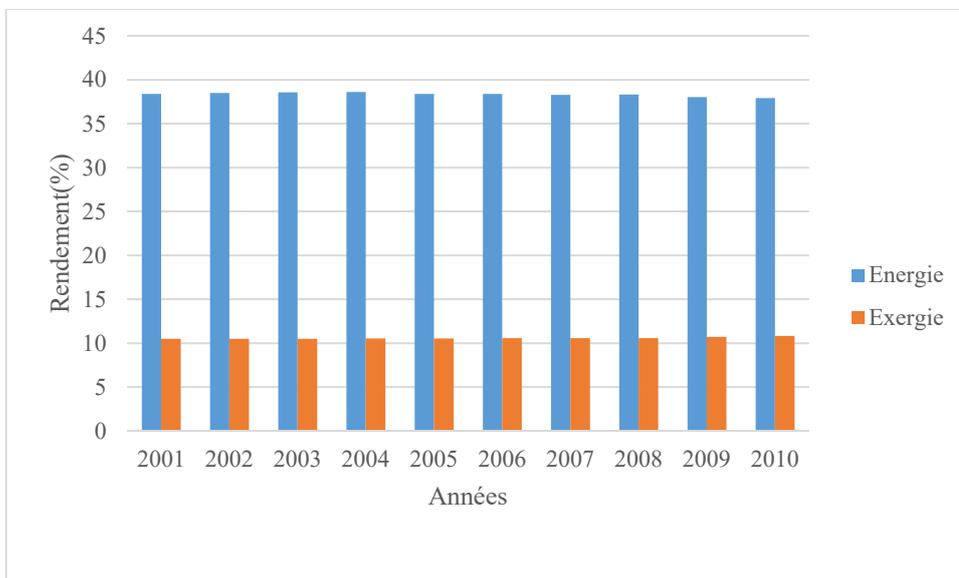


Figure 37: Rendement énergétique et exergetique au Cameroun

Le tableau 28 présente la répartition de l'énergie dans d'autres pays. Une observation nous laisse penser que, la gestion de l'énergie au Cameroun doit avoir une nouvelle orientation. En effet en France et en Malaisie, la consommation énergétique est développée par le secteur

industriel, mais au Cameroun c'est le secteur résidentiel qui vient en avant et avec une avance considérable (50%). La raison de la dominance du secteur résidentiel c'est la mauvaise gestion du bois – énergie (source d'énergie principale de ce secteur) dont l'utilisation première et majeure dans le secteur est la cuisson. Ainsi, une utilisation plus efficace de cette source d'énergie sera plus bénéfique pour le secteur résidentiel en particulier, et pour le pays en général

Tableau 28: Présente la répartition de l'énergie dans d'autres pays.

Pays	Secteur résidentiel (%)	Secteur de transport (%)	Secteur industriel (%)	Autres secteurs (%)
France	32,2	32,1	21,1	14,7
Malaisie	14	36	43	7
Cameroun	71	14	8	6

Conclusion

Rendu au terme de ce chapitre, où il a été question de faire une application des analyses énergétiques et exergetiques aux différents secteurs d'activités du Cameroun, cette analyse consistait à :

- répartir notre système (Cameroun) en plusieurs sous – systèmes (secteurs d'activités : transport, résidentiel, agricole et autres) ;
- identifier pour chaque sous – système le type d'énergie utilisé ;
- évaluer pour chaque énergie, la valeur exergetique qu'elle renferme ;
- évaluer les différents rendements (énergétiques et exergetiques) de chaque secteur d'activité ;
- évaluer les différentes pertes dans chaque secteur d'activités ;
- faire une comparaison de nos différents rendements avec ceux effectués dans d'autres pays ;
- mener une étude globale sur la gestion de l'énergie au Cameroun et évaluer les rendements énergétiques et exergetiques du Cameroun.

Au terme de ces analyses, nous pouvons faire le constat que, du fort potentiel énergétique dont dispose le Cameroun, son utilisation reste toujours controversée et inefficace. Afin de pouvoir mieux l'utiliser, plusieurs actions sont entreprises. Nous pouvons citer les grands projets dans le domaine de l'hydro – électricité. Le secteur du bois – énergie quant à lui doit

avoir une meilleure utilisation car c'est l'énergie qui est de loin la plus utilisée ; l'utiliser plus efficacement sera bénéfique pour le pays.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Parvenu au terme de notre analyse, où il a été question pour nous de faire une étude énergétique et exergetique des différents secteurs d'activités du Cameroun, nous avons centré nos travaux sur trois parties :

- Dans la première partie intitulée revue bibliographique, il a été question de présenter les études énergétiques et exergetiques menées dans le monde (dans les systèmes industriels comme dans les différents secteurs d'activités), ensuite de faire un bref aperçu sur le potentiel et la demande énergétique au Cameroun ;
- La seconde partie a été essentiellement celle de la méthode utilisée pour mener notre analyse. Elle est essentiellement basée sur les principes de la thermodynamique (premier et second principe). La notion d'exergie a été introduite suite aux insuffisances du premier du principe. Il serait important de mentionner que, lors des analyses exergetiques, la délimitation du système à étudier et l'identification des ressources disponibles dans ce système sont des étapes essentielles pour mener une bonne analyse ;
- La troisième et dernière partie de notre travail a été celle de l'application de la méthodologie décrite au chapitre 2. En effet le Cameroun a été le système à étudier et nous l'avons divisé en plusieurs sous – systèmes (transport, résidentiel, agriculture et tertiaire). Des analyses menées, constat a été fait que les différents rendements énergétiques et exergetiques du Cameroun s'avèrent être relativement bas et inférieurs à ceux de plusieurs autres pays. Toujours dans ce chapitre nous avons essayé d'évaluer les rendements énergétiques et exergetiques du Cameroun. Nous avons trouvé que ces rendements sont également bas (ils oscillent entre 38 % et 10 % respectivement pour les rendements énergétiques et exergetique). Compte tenu de la situation économique du pays, les faibles valeurs de ces rendements ne sont pas une grande surprise. L'évaluation des différentes pertes énergétiques et exergetiques a été faites dans ces différents secteurs d'activités, et dans le pays tout entier et nous constatons que malgré le fort potentiel en énergie et la forte production énergétique et exergetique, beaucoup d'efforts restent à faire dans le management de cette énergie afin que son utilisation soit efficiente.

Compte tenu des difficultés rencontrées dans le secteur industriel, il ne nous a pas été possible de mener l'analyse de ce secteur d'activité (difficulté d'accès à l'entreprise et plus encore lorsqu'il est question de collecter les données liées aux dépenses énergétiques ; car ces données sont jugées sensibles et elles restent secrètes et ne sont pas divulguées). Nous comptons

Conclusion générale

donc à la suite de nos travaux, trouver les moyens de compléter notre étude en finalisant avec le secteur industriel, ceci dans le but d'améliorer l'étude du Cameroun et avoir une visibilité complète sur la gestion du secteur de l'énergie. L'étape qui suivra nos travaux sera celle de la prospection. Afin de pouvoir apporter un point de vue scientifique sur la politique gouvernementale menée au Cameroun, à savoir celle qui vise à hisser le pays au rang de pays émergent, il faudra bien prospecter la gestion de l'énergie dans les années futures. C'est la raison pour laquelle une étude antérieure a d'abord été menée, afin de comprendre comment la gestion de l'énergie s'effectue. Cette étude terminée, suivra celle de la prospection toujours dans le but de pouvoir accompagner ceux qui détiennent le pouvoir décisionnel dans l'orientation et la gestion de l'énergie au Cameroun.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIES

Références bibliographique

AES-Sonel, 2008. Rapport d'activité 2007. AES-Sonel, pp 52.

Al-Ghandoor A., J.O. Jaber, I. Al-Hinti. « Energy and Exergy Use in the Utility Sector of Jordan during 2007-2010 ». Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering. Volume 5, Number ISSN 1995 3, June -6665 2011Pages 281 - 284

Al-Ghandoor A., Al-Hinti I., Akash B. and Abu-Nada E.,. Analysis of energy and exergy, use in the Jordanian urban residential sector, International Journal of Exergy 20085, No. 4.

Al-Ghandoor A., Phelan P.E., Villalobos R., and Jaber J.O. « Energy and exergy utilizations of the U.S. manufacturing sector » Energy 35 (2010) 3048 - 3065

Ahamed J. U, R. Saidur, Majuski H.H., Mekhilef S., Ali M.B., Furqon M.H. « An application of energy and exergy analysis in agricultural sector of Malaysia ». Energy Policy 39 (2011) 7922 - 7929

Avara, A., Karami, M. « Energy and Exergy efficiencies in agricultural and utility sectors of Iran compared with other countries ». In: Proceedings of the International Conference on Mechanical and Electrical Technology (ICMET2010), pp. 6–10

Ayres, R.U, Ayres, L.W., Martins, K. « Exergy, waste accounting, and life-cycle analysis ». Energy 1998, 23, 355–363.

Ayres RU, Ayres LW, Warr B. “Exergy, power, and work in the US economy, 1900–1998.” Energy 2003; 28: 219–273

Badmus, I., Osunleke, A.S., Fagbenle, R.O. and Oyewola, M.O. « Energy and exergy analyses of the Nigerian transportation sector from 1980 to 2010 ». International Journal of Energy and Environmental Engineering, 2012 Vol. 3, p.23

Belhani Mehdi « Analyse de cycle de vie exergétique de système de traitement des eaux résiduaires » décembre 2008, 507 pages.

Bejan, M., Bejan, A. « Supply-side approach to energy policy ». Energy Policy 1982, 10, 153–161.

Bejan, M., « Energy policy, in Entropy Generation through Heat and Fluid Flow ». Wiley, New York, 1994.

Bejan, G. Tsatsanoris et M. Moran, « Thermal Design and Optimization », Wiley-Interscience Publication, 1996.

Borel Lucien. « Thermodynamique et énergétique. » Edition. 1991, 483 pages.

Cengel Y. “Thermodynamic Concepts-I-II, Summer Course On Exergy And Its Applications Proceedings”, July 10-12, 2007.

Chen G Q., Jiang M.M., Z.F. Yang, B. Chen, Xi Ji , J.B. Zhou. « Exergetic assessment for ecological economic system: Chinese agriculture ». *Ecological Modeling* 220 (2009). 397 – 410.

Crane, P., Scott, D.S., Rosen, M.A. « Comparison of exergy of emissions from two energy conversion technologies, considering potential for environmental impact ». *International Journal of Hydrogen Energy* 1992, 17, 345–350.

Diop Mballo « Analyse énergétique et exergetique d'une tranche vapeur a la centrale CII de bel-air 2001» 76 pages.

Dewulf J., Van Langenhove H., Muys B., Bruers S., Bakshi B. R., Grubb G., Paulus D. M., Sciubba E. « Energy : Its potential and limitations in Environmental science technology ». *Environ., Sci., Technol.*, 2008, 42 (7), 2221 – 2232.

Dincer, I. « Thermodynamics, exergy and environmental impact. Proceedings of the ISTP-11 ». The Eleventh International Symposium on Transport Phenomena, 29 November–3 December 1998, Hsinchu, Taiwan, pp. 121–125.

Dincer, I., « Energy and environmental impacts: present and future perspectives ». *Energy Sources* 1998, 20 (4/5), 427–453.

Dincer I, Hussain MM, Al-Zaharnah I. « Energy and exergy use in the industrial sector of Saudi Arabia ». *IMEchE-Part A. J Power Energy* 2003;27(5):481–92. Kluwer Academic, the Netherlands, 1999 pp. 221–230.

Dincer I. « The role of exergy in energy policy making ». *Energy Policy* 2002, 30 137–149.

Dincer, I., Rosen, M.A., « The intimate connection between exergy and the environment. In: Bejan, A., Mamut, E. (Eds.), *Thermodynamic Optimization of Complex Energy Systems* ». Dincer, I., Hussain, M.M. and Al-Zaharnah, I. « Energy and exergy utilization in transportation sector of Saudi Arabia », *ApplTherm Eng.*, 2004a Vol. 24, pp.525–538.

Dincer, I., Hussain, M.M. and Al-Zaharnah, I « Energy and exergy use in public and private sector of Saudi Arabia » *Energy Policy* 32 (2004) 1615–1624

Dincer, I., Hussain, M.M., Al-Zaharnah, I. « Energy and exergy utilization in agricultural sector of Saudi Arabia ». *Energy Policy* 2005 33, 1461–1467.

Références bibliographique

Ediger, VS -, Huvaz, O. « Examining the sectoral energy use in Turkish economy (1980–2000) with the help of decomposition analysis ». *Energy Conversion and Management* 2006 47 (6), 732–745.

Ediger, V.S. and Camdali, Ü. « Energy and exergy efficiencies in Turkish transportation sector, 1988–2004 », *Energy Policy*, 2007 Vol. 35, pp.1238–1244.

Ertesvag , M. Mielnik “Exergy analysis of the Norwegian society” N-7491 Trondheim, Norway Received 5 January 2000. *Energy* (2000) 25 957–973.

Ertesvag, I.S. “ Energy, exergy, and extended-exergy analysis of the Norwegian society 2000”. *Energy* 2003 30, 649–67.

Gonçalves Pedro, Adélio Rodrigues Gaspar, Manuel Gameiro da Silva. « Energy and exergy-based indicators for the energy performance assessment of a hotel building ». *Energy and Buildings* 52 (2012) 181–188

Ford, K.W. “APS studies on the technical aspect of more efficient use of energy I”, 1975.

Hepbasli A. “Modeling of Sectoral Energy and Exergy Utilization”. *Energy Sources* 2005; 27:903–912.

Ileri´ A, Gurer T. “Energy and exergy utilisation in Turkey during 1995.” *Energy* 1998 23 (12) 1099–1106

Jaber, J.O., Al-Ghandoor, A. and Sawalha, S.A. ‘Energy analysis and exergy utilization in the transportation sector of Jordan’, *Energy Policy*, 2008 Vol. 36, pp.2995–3000.

Koroneos, C.J. and Nanak Evanthia, A. “ Energy and exergy utilization assessment of the Greek transport sector”, *Sciences Direct Resources, Conservation and Recycling*, 2008 Vol. 52, pp.700–706.

Milia D, Sciubba E. « Exergy-based lumped simulation of complex systems: an interactive analysis tool. In: *Proceedings of the second international workshop on advanced energy studies*». Italy: 2000. p. 513–523.

Mboumboue, E., 2009. *Évaluation du potentiel des énergies renouvelables pour undéveloppement durable au Cameroun. Master II, Université de Yaoundé II, 2009, pp 108.*

Metouck, C. “ Sonara New, *Revue trimestrielle d’information de la Sonara* n° 72, octobre 2008, pp 40.

Nan Li , Hailin Mu, Huanan Li and Shusen Gui. « Diesel Consumption of Agriculture in China ». *Energies* **2012**, 5, 5126-5149; doi:10.3390/en5125126

Njomo, D. “ Les solutions solaires aux besoins énergétiques prioritaires des populations rurales des pays en développement. *Revue de l'Énergie*, n°404, 1988, pp 498-503.

Nkué, V., Njomo, D., 2009. Analyse du système énergétique camerounais dans une perspective de développement soutenable. *Revue de l'Énergie*, n°588, mars-avril 2009, 102-116.

Oladiran M. T. et Meyer J. P. « Energy and exergy analyses of energy consumptions in the industrial sector in South Africa » *Applied Energy* 2007, 84, 1056 – 1067.

Ozdogan O, Arikol M. « Energy and exergy analyses of selected Turkish Industries ». *Energy* 1995;20:73–80.

Reistad, G.M. « Availability: concepts and applications ». Ph.D. Thesis, University of Wisconsin, Madison, 1970.

Reistad GM. « Available energy conversion and utilization in the United States. » *ASME J Engng Power* 1975 97 429–434.

Rosen MA. « Evaluation of energy-utilisation efficiency in Canada using energy and exergy analysis ». *Energy* 1992;17(4):339–50.

Rosen, M.A., Dincer, I. « On exergy and environmental impact ». *International Journal of Energy Research* 1997, 21, 643–654.

Saidur, R., Sattar, M.A., Masjuki, H.H., Ahmed, S. and Hashim, U. « An estimation of the energy and exergy efficiencies for the energy resources consumption in the transportation sector in Malaysia ». *En. Pol.*, 2007a Vol. 35, pp.4018–4026.

Saidur R., H.H. Masjukia, M.Y. Jamaluddin. « An application of energy and exergy analysis in residential sector of Malaysia » *Energy Policy* 35 (2007b) 1050–1063

SIE-Cameroun, 2009. **Système d'Information Énergétique : Rapport 2009**, Ministère de l'énergie et de l'eau, décembre 2009, pp 169.

SIE-Cameroun, 2011. **Situation Énergétique au Cameroun : Rapport 2011**, Ministère de l'énergie et de l'eau

Schaeffer R, Wirtshafter RM. “An exergy analysis for the Brazilian economy: from energy production to final energy use.” *Energy* 1992; 17 (9) :841–55.

Références bibliographique

Sciubba, E. « Exergy as a direct measure of environmental impact. In: Aceves, S.M. et al. (Eds.) ». Proceedings of the ASME Advanced Energy Systems Division, 1999, AES-Vol. 39, pp. 573–581.

Steg, L. and Gifford, R. « Sustainable transportation and quality of life », Journal of Transport Geography, (2005) Vol. 13, pp.59–69.

Tchinda René. « Le concept exergetique pour un développement durable » Université Marien Gouabi, Brazzaville, 02 Mars- 07 Mars 2009

Tchouate, H. P., 2003. « Contribution des énergies renouvelables au développement durable du secteur électrique : le cas du Cameroun ». Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.

Van Gool W. « The Value of Energy Carriers ». Energy 1987; 12(6): 509.

Utlu, Z., Hepbasli, A. “A study on the evaluation of energy utilization efficiency in the Turkish residential—commercial sector using energy and exergy analyses”. Energy and Buildings; 2003 35 (11): 1145–1153.

Utlu, Z. et Hepbasli, A. “Analysis of energy and exergy use of the Turkish residential—commercial sector. Building and Environment; 2005 40: 641–655.

Utlu, Z. et Hepbasli, A. “Estimating the energy and exergy utilization efficiencies for the residential—commercial sector: an application”. Energy Policy; 2006 34 (10): 1097–1105.

Utlu, Z. et Hepbasli, A. « A review and assessment of the energy utilization efficiency in the Turkish industrial sector using energy and exergy analysis method ». Renewable and Sustainable Energy Reviews 11 (2007) 1438–1459

Utlu, Z., Hepbasli, A. “Energetic and exergetic assessment of the industrial sector at varying dead (reference) state temperatures: A review with an illustrative example. » Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 (2008) 1277–1301

Van Gool W. « The Value of Energy Carriers ». Energy 1987; 12(6): 509

Van Gool W. Energy policy: fairy tales and factualities. In: Soares ODD, Martins da Cruz A, Costa Pereira G, Soares IMRT, Reis AJPS, editors. Innovation and technology-strategies and policies. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher; 1997. p. 93–105.

Wall G. “Exergy — a useful concept within resource accounting.” Report No. 77-42, Institute of Theoretical Physics, Chalmers University of Technology and University of Göteborg, Göteborg, Sweden, 1977.

Références bibliographique

Wall G. “Exergy — a useful concept”. Dr. thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 1986

Wall G.” Exergy conversion in the Swedish society.” *Resour Energy* 1987;9 (1) :55–73.

Wall G, Sciubba E, Naso V. “Exergy use in the Italian society.” *Energy* 1994; 19 (12): 1267–74.

Xydis G., C. Koroneos, A. Polyzakis. « Energy and exergy analysis of the Greek hotel sector: An application » *Energy and Buildings* 41 (2009) 402–406.

ANNEXES

I- LISTE DES PUBLICATIONS

- **Talla Konchou F.A., Aloyem Kaze C. V. and Tchinda René** « Energy Analysis and Exergy Utilization in the Residential Sector of Cameroon » Energy and Power Engineering, 2015, 7, 93-104 ;

- **Talla Konchou F.A., Aloyem Kaze C. V. and Tchinda René** « An application of energy and exergy analysis at the transportation sector of Cameroon » International Journal of Exergy 2015, 18 (2);

II- CADRE INSTITUTIONNEL ET LEGISLATIF DE L'ENERGIE AU CAMEROUN

Le secteur de l'énergie au Cameroun peut être répartie en trois grandes parties : le secteur de l'énergie électrique, celui des hydrocarbures et celui des énergies renouvelables. Tous ces différents secteurs sont gérés par plusieurs institutions. Nous avons :

- La Présidence de la République qui oriente la politique générale du secteur ;
- Le Premier Ministère qui coordonne l'action de l'ensemble du Gouvernement et donc des ministères intervenant dans les différents sous-secteurs ;
- Le Ministère en charge des Finances qui assure la tutelle financière du secteur ;
- Le Ministère de l'Eau et de l'Energie qui assure la tutelle technique dudit secteur.

Plusieurs autres Ministères interviennent aussi dans le secteur de l'énergie en fonction de leurs attributions et des missions confiées par la Présidence.

Le cadre législatif du secteur énergétique camerounais comprend entre autres les lois suivantes :

- Loi N°2011/022 du 14 décembre 2011 régissant le secteur de l'électricité au Cameroun qui vient remplacer la loi n° 98/022 du 24 décembre 1998 ;
- Loi N° 2006/012 du 29 décembre 2006 fixant le régime général des contrats de partenariat ;
- Loi N° 2002/004 du 19 avril 2002 portant charte des investissements en République du Cameroun ;
- Loi n° 2012/006 du 19 avril 2012 portant code gazier ;

- Loi n° 99/013 du 22 décembre 1999 portant code pétrolier ;
- Loi n° 96/12 du 5 août 1996 portant loi-cadre relative à la gestion de l'environnement ;

I-1- Secteur de l'énergie électrique

I-1-1- Cadre institutionnel

Hormis les structures citées plus haut, il existe des institutions (sociétés publiques, parapubliques et privées) propres au secteur de l'électricité. Nous pouvons citer :

- l'Agence de Régulation du Secteur de l'Electricité (ARSEL) qui assure la régulation de ce secteur ;
- l'Agence d'Electrification Rurale (AER) qui est chargée de promouvoir l'électrification rurale sur l'ensemble du territoire national ;
- l'Electricity Development Corporation (EDC) qui assure la gestion pour le compte de l'Etat ;
- ENEO.

I-1-2- Cadre législatif

Le cadre législatif ici comprend plusieurs lois parmi lesquelles :

- Loi N°2011/022 du 14 décembre 2011 régissant le secteur de l'électricité au Cameroun qui vient remplacer la loi n° 98/022 du 24 décembre 1998 ;
- Loi N° 2006/012 du 29 décembre 2006 fixant le régime général des contrats de partenariat ;
- Loi N° 2002/004 du 19 avril 2002 portant charte des investissements en République du Cameroun ;
- Loi n° 99/016 du 22 décembre 1999 portant statut général des établissements publics et des entreprises du secteur public et parapublic.

I-2 Secteur des hydrocarbures

I-2-1- Cadre institutionnel

Plusieurs sociétés interviennent dans le secteur des hydrocarbures, nous pouvons citer :

- la Société Nationale des Hydrocarbures (SNH) : est chargée de la promotion, de la valorisation et du suivi des activités pétrolières sur l'ensemble du territoire national ;
- la Société Nationale de Raffinage (SONARA) : raffine le pétrole brut et assure l'approvisionnement de 80% du marché local, 20% du marché étant libéralisé ;
- la Société Camerounaise des Dépôts Pétroliers (SCDP) : assure le stockage des produits pétroliers ;
- la Caisse de Stabilisation des Prix des Hydrocarbures (CSPH) : est chargée de la régulation et de la péréquation des prix ;
- la société HYDRAC (Hydrocarbure Analyse-Contrôle) : assure le contrôle de la qualité et la quantité des produits pétroliers distribués sur le marché local ;

I-2-2- Cadre réglementaire

Le secteur de hydrocarbures est régit par des lois ; nous pouvons citer entre autres :

- Décret 2008/0149/PM du 01 février 2008 fixant les conditions de désignation des Agents assermentés pour le contrôle des produits pétroliers ;
- Décret N° 2000/935/PM du 13 novembre 2000 fixant les conditions d'exercice des activités du secteur pétrolier naval ;
- Décret N° 2000/ 485 du 30 juin 2000 fixant les modalités d'application de la loi n°99/013 du 22 décembre 1999 portant code pétrolier ;
- Décret N° 99/81/PM du 09 novembre 1999 fixant les modalités d'implantation et d'exploitation des établissements classés dangereux, insalubres ou incommodes ;
- Décret N° 95/135 /PM du 03 mars 1993 modifiant certaines dispositions du décret n°77/528 du 23 décembre 1977 portant règlementation du stockage et de la distribution des produits pétroliers.

I-3- secteur des énergies renouvelables

I-3-1- Cadre institutionnel

Le plan institutionnel des énergies renouvelables est régi par plusieurs institutions parmi lesquelles :

- le Ministère en charge de l'énergie qui est responsable d'une part, de l'élaboration des stratégies gouvernementales en matière d'alimentation en énergie et d'autre part, de la promotion des énergies renouvelables en liaison avec le Ministère de la recherche Scientifique ;

- le Ministère en charge des forêts qui est responsable de la mise au point du contrôle de l'exécution des programmes de régénération, de reboisement, d'inventaire et d'aménagement des forêts ;
- le Laboratoire de Recherche Energétique du Ministère chargé de la Recherche Scientifique ;
- le Ministère en charge de l'environnement qui est responsable de la définition des mesures de gestion rationnelle des ressources naturelles en liaison avec les ministères et organismes spécialisés concernés.

III-RELEVÉ ET CALCUL DE LA CONSOMMATION D'ELECTRICITE DANS UN BATIMENT

NOM DU BATIMENT :

Identification du bureau :

Lieu/emplacement dans le bâtiment :

	CHARGE	N° de charge	Puissance (W)	coef de simul	Heurs d'utilisation par semaine		
					Heures par jour	Jours d'utilisation / Semaine	Heures par Semaine
	ECLAIRAGE						
	Am poule à incandescence 40		40	1			
	Am poule à incandescence 60		60	1			
	Am poule à incandescence 75		75	1			
	Am poule à incandescence 100		100	1			
	Am poule à incandescence			1			
	Am poule à incandescence			1			

Am poule à incandescence			1			
Am poule fluor escente 13W		13	1			
Am poule fluorescente 17W		17	1			
Am poule fluorescente 20W		20	1			
Am poule fluorescente 32W		32	1			
Am poule fluorescente 40W		40	1			
Am poule fluorescente W			1			
Am poule fluorescente V			1			
I-APPAREIL UTILISANT LE COURANT ELECTRIQUE						
Ventilateur (table)						
Ventilateur (plafond)						
Fer à repasser			0.9			
Bouilloire (50 litres)			0.9			
Moteur ou pompe			0.3			
Lave –linge			0.4			
Lave –vaisselle						
Réfrigérateur			0.6			
Congélateur			0.6			
Sèche –cheveux			1			
Sèche –linge			1			
Mixeur			1			
Batteur électrique			1			
Four a micro-ondes			1			
Presse-agrumes			1			
Grille –pain			1			
Aspirateur			1			
Machine à café						
Friteuse						
Couverture chauffan						

	Déshumidificateur					
	Climatiseur (pièce)			0.7		
	Climatiseur			0.7		
	Consommation lié au téléphone			1		
II-APPAREILS UTILISANT LE COURANT ELECTRIQUE FAIBLE						
	Ordinateur + moniteur			0.9		
	Radio (stéréo)			1		
	Télévision			1		
	Magnétoscope			1		
	Ordinateur portable			0.9		
	Chaîne Hi-Fi			1		
	Nintendo			1		
	Lecteur CD ou DVD			0.9		
	Centrifugeuse			1		
TOTAL Wh / semaine :						
Nombre de semaines par mois = 30/7=						
TOTAL Wh/Mois=						
Conversion en kWh/Mois=						

IV- Valeurs de l'Enthalpie, du facteur de qualité et de l'exergie chimique de quelques sources d'énergie

Sources d'énergie	Enthalpie (kJ/kg)	Exergie chimique (kJ/kg)	Facteur de qualité
essence	47849	47394	0,99
Gaz naturel	55448	51702	0,92
Charbon	25552	26319	1,03
Bois	12252	12865	1,05
Lignite	12252	12742	1,04

Fuel	47405	47101	0,99
LPG	45460	45005	0,99

V- FICHE D'ENQUETE SUR LES BESOINS ENERGETIQUES DANS LES MENAGES

NOM DE
L'ENQUETEUR

VILLAGE/QUARTIER.....
MENAGES N°.....

- 1) Nombre de personnes.....
- 2) Connecté aux réseaux ENEO ? **Oui** **Non**

Si **Oui** PARTIE 1 si **Non** PARTIE 2

PARTIE 1

- 1) Types de lampes utilisées
 à incandescence fluorescence les deux
- 2) Nombre de lampes utilisés pour éclairage interne (Ainsi que les gammes de puissance)

- 3) Nombre de lampes utilisées pour éclairage externe (Ainsi que les gammes de puissance)

- 4) Nombre de lampes utilisées pour éclairage de protection (usage de nuit)

- 5) Types d'appareils utilisés
 Radio FM Téléviseur lecteur DVD PC /laptop
 Chargeur portable Ventilateur Chaine HIFI Frigo
 Autres

Préciser Autres.....

6) Heure de réveil.....
.....

❖ Appareils en marche en cette heure
.....
.....

❖ Nombres de lampes fonctionnant à cette heure (Ainsi que les gammes de puissance)
.....
.....

7) Heure de sortie.....
.....

❖ Appareils en marche en cette heure
.....
.....

❖ Nombres de lampes fonctionnant à cette heure (Ainsi que les gammes de puissance)
.....
.....

8) Nombre de personnes ne quittant pas la maison de toute la journée.....

❖ Appareils en marche en cette heure
.....
.....

❖ Nombres de lampes fonctionnant à cette heure (Ainsi que les gammes de puissance)
.....
.....

9) Heure de retour.....
.....

❖ Appareils en marche en cette heure
.....
.....

❖ Nombres de lampes fonctionnant à cette heure (Ainsi que les gammes de puissance)
.....
.....

10) Heure du couché.....
.....

❖ Appareils en marche en cette heure

-
.....
❖ Nombres de lampes fonctionnant à cette heure (Ainsi que les gammes de puissance)

.....
.....
11) Etes-vous satisfait de la qualité d'énergie ?

Oui **Non**

Si **Non** pourquoi ?

.....
.....
.....
.....

PARTIE 2

1) Autres sources d'énergies

Groupe électrogène Renouvelable
Autres

Préciser autres.....

2) Nombre de compartiments intérieur.....

3) Nombre de lampes à utiliser pour les éclairages de protection.....

4) Nombre de compartiments extérieur.....

5) Quels types d'appareils aimeriez-vous utiliser si à jamais vous êtes connectés ?

Radio FM Téléviseur Lecteur DVD PC /laptop
 Chargeur portable Ventilateur Chaine HIFI Frigo
 Autres

Préciser autres.....

6) Heure de réveil.....

7) Heure de sortie.....

8) Nombre de personnes qui reste à la maison.....

9) Heure de retour.....

10) Heure de couché.....

Merci pour votre aimable attention !

