

N°87



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI (UAC)

Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-SDI)

Master de Recherche en Efficacité Energétique et Energies Renouvelables (MR-
3ER)

Rapport de Stage

Thème

**Etude du bilan carbone du secteur du transport routier au
Sud du Bénin**

Présenté par :

YAROU BONI Abigael Ingrid

Ingénieure en Génie Mécanique et Energétique

Encadré et Supervisé par :

Dr, Ir Clément AHOUANNOU

Professeur Titulaire (CAMES)

Enseignant-Chercheur / EPAC / UAC

Dédicace

A tous ceux qui me sont chers.

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier tous ceux qui se sont investis d'une manière ou d'une autre, de près ou de loin à l'obtention de ces résultats. Ils méritent à cet effet une attention particulière dans cette rubrique. Je ne saurais véritablement commencer sans présenter toute ma gratitude et toute ma reconnaissance à l'Eternel Dieu, qui m'a gardé et conduit jusqu'à l'aboutissement de ce travail. Qu'il me soit également permis de remercier les autorités de mon Ecole de formation et particulièrement celles de l'Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur. Je voudrais citer :

- ♣ Professeur Antoine VIANOU, Directeur de l'Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur de l'UAC (ED-SDI/UAC) ;
- ♣ Professeur Clément AHOUANNOU, Coordonnateur du Master de Recherche en Efficacité Energétique et Energies Renouvelables (3ER) et Responsable honoraire du Centre Autonome de Contrôle de Conformité aux Normes de Performance Energétique (CCNPE-Bénin) où j'ai effectué mon stage. Il est mon encadrant et ce travail n'aurait pas connu d'aboutissement sans son suivi, ses directives et ses conseils ;
- ♣ Professeur Aristide HOUNGAN, Coordonnateur adjoint du Master de Recherche en Efficacité Energétique et Energies Renouvelables (3ER) pour son suivi au cours de ma formation.
- ♣ Ingénieur Berléo APOVO pour ses apports, ses multiples conseils et sa disponibilité.
- ♣ Tous les enseignants intervenant dans la formation du Master de Recherche en Efficacité Energétique et Energies Renouvelables pour toute l'attention qu'ils m'ont accordée durant ma formation ;
- ♣ Tous mes collègues, amis et proches.

Table des Matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Table des Matières	iii
Résumé.....	iv
Abstract.....	v
Liste des tableaux.....	vi
Liste des figures.....	vii
Nomenclature	ix
Sigles et abréviations	ix
Composés chimiques.....	x
Introduction Générale	1
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
Introduction.....	3
1.1. Enjeux liés à l'émission de GES par le secteur des transports	3
1.2. Emission de GES par les véhicules	11
1.3. Bilan Carbone	17
Conclusion	23
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES	24
Introduction.....	24
2.1. Matériel	24
2.2. Méthodologie	29
Conclusion	36
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION	37
Introduction.....	37
3.1. Résultats.....	37
3.2. Discussions	42
3.3. Perspectives et recommandation	46
Conclusion	48
Conclusion Générale.....	49
Références Bibliographiques.....	50
ANNEXES	a
Sommaire	e

Résumé

En raison des conséquences de l'émission des GES sur l'environnement terrestre, les organismes internationaux recommandent des inventaires nationaux sur les activités d'émission de GES et les proportions émises. Pour le faire, un des outils standard est le Bilan Carbone. Il prend en compte les émissions directes et indirectes de GES engendrés par une activité. L'objectif de ce travail était de réaliser le bilan carbone du sous-secteur du transport routier dans le sud du Bénin. A l'aide d'un analyseur de gaz CAPELEC, des mesures ont été effectuées à l'échappement des véhicules de transport routier. Aussi la documentation générale de la base carbone de l'ADEME a été consultée. Tout cela a révélé que les émissions de GES pour un véhicule de tourisme s'élèvent à 341,8 gCO_{2eq}/km réparti en 188,3 gCO_{2eq}/km pour les émissions directes et 153,5 gCO_{2eq}/km pour les émissions indirectes. Il a été remarqué que pour les émissions directes, les quantités de GES émises sont en corrélation positive avec le nombre de kilomètres parcourus par le véhicule et que quelle que soit la marque du véhicule, les émissions au Bénin sont supérieures à la valeur limite qui est de 130g.CO_{2eq}/km. En effet, cela s'explique par les problèmes de performance des moteurs thermiques (à combustion interne) qui équipent les véhicules accentué par beaucoup d'autres facteurs tels que la gestion de la maintenance, la qualité des carburants utilisés et le style de conduite des véhicules. Il a été remarqué que les émissions sont plus importantes quand la source d'approvisionnement en carburant est le secteur informel que quand elle est la station-service, car les compositions chimiques de ces deux types de carburant sont différentes et influencent les émissions de GES. Enfin, en accélération, les véhicules émettent plus de GES qu'au ralenti. Face à ces constats, des mesures ont été suggérées pour réduire l'émission des GES par les véhicules de transports routiers.

Mots clés : Transport routier, véhicules, émission, GES, bilan carbone.

Abstract

Due to the consequences of GHGs on the environment, international organizations recommend national GHG inventories. To do this, a standard tool is the carbon footprint. It takes into account the direct and indirect GHG emissions generated by an activity. The goal of this work was to realize the carbon footprint of sub-sector of road transport vehicles in southern Benin. We used a gas analyzer to perform measurements on the exhaust of road transport vehicles. We also use the general documentation of carbon base of ADEME. All of this has revealed that the GHG emissions by vehicle amount to $341,8\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{km}$ namely $188,3\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{km}$ for direct emissions and $153,5\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{km}$ for indirect emissions. It also noticed that the direct emissions, the GHG emissions are positively correlated with the age of the vehicle and that whatever is the mark of the vehicle, the emissions are higher than the limit value which is $130\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{km}$. Indeed, this is explained by the performance problems of vehicles accentuated by many other factors. It was also noticed that the emissions are more important when the source of fuel supply is the informal sector than when it is the station. The chemical compositions of these two types of fuel are different and influence GHG emissions. Finally, when accelerating, vehicles emit more GHGs than at idle speed. In light of these findings, measures have been suggested to reduce GHG emissions from road transport vehicles.

Key words : Road transport, vehicles, emission, GHG, Carbon footprint.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Emissions et absorptions totales de GES directs par secteur sur la série temporelle 1990–2015 (Gg CO ₂ eq) (Source : GUENDEHOU & al, 2019)	10
Tableau 2 : PRG des divers GES (source : ADEME, 2013)	22
Tableau 3 : Eléments pour la constitution de la base de données (Source : Gath, 2019)	33
Tableau 4 : Normes d'émissions des GES des véhicules légers de tourisme (Source : Darding, 2019).....	34
Tableau 5 : Caractéristiques de l'essence utilisée au Bénin (Source : ADJENIYA, 2013)	35
Tableau 6 : Emissions quantitatives des GES en g/km.....	37
Tableau 7 : Tableau indiquant le PCI des combustibles fossiles dans la base carbone.....	b
Tableau 8 : Tableau indiquant la masse volumique de certains carburants dans la base carbone	c
Tableau 9 : capture indiquant Facteur d'émission de l'essence dans la base carbone	c
Tableau 10 : Sources d'approvisionnement des divers carburants	d

Liste des figures

Figure 1 : Schéma décrivant le mécanisme de l'effet de serre (Source : Tadjiou Rabhioui, 2013)	4
Figure 2: Evolution de la température moyenne annuelle mondiale de 1850 à 2017 (Source : Institute for climates economics, 2019)	5
Figure 3: Evolution du niveau moyen des mers du globe terrestre par rapport à la période de référence 1900-1905 (Source : Institute for climates economics, 2019)	6
Figure 4 : Emissions de CO ₂ dues à la combustion d'énergie parmi les principaux émetteurs en 2015 (Source : Institute for climates economics, 2019).....	7
Figure 5 : Tendence des émissions de GES directs par catégorie dans le secteur de l'énergie de 1990 à 2015 (Source : GUENDEHOU & al, 2019)	11
Figure 6 : Schéma de principe du moteur thermique	12
Figure 7 : Structure d'un moteur à combustion interne à quatre temps à essence (Source : Khiar, 2007)	13
Figure 8 : Cycle à quatre temps pour un moteur à essence à quatre temps. (Source Khiar, 2007).....	13
Figure 9 : Cycle thermodynamique des gaz dans un moteur thermique (Source : da Silva G & Thibault J-P., 2011)	14
Figure 10 : Répartition des émissions annuelles mondiales de GES anthropiques en 2004 (Source : ADEME, 2013)	20
Figure 11 : Représentativité des véhicules dans le parc Béninois.....	25
Figure 12 : Analyseur Multigaz fixe connecté à un ordinateur (Source : Gath, 2019)	26
Figure 13 : CAP32/CNSR et éléments connexes (Source : Manuel d'utilisation du CAP32).....	27
Figure 14 : Face avant annotée de la cellule de mesure.....	27
Figure 15 : face arrière de la cellule de mesure (Source : Gath, 2019)	28
Figure 16 : Schéma représentant les éléments pris en compte par chaque scope (Source : TAJJIOU RABHIOUI, 2013).....	30
Figure 17 : Répartition qualitative des émissions de GES en gCO _{2eq} /km	38
Figure 18 : Emissions quantitative de GES suivant l'âge des véhicules	38

Figure 19 : Emissions de GES suivant le régime de fonctionnement des véhicules	39
Figure 20 : Emissions de GES suivant la source d'approvisionnement en carburant	40
Figure 21 : Emissions des GES suivant les marques	41
Figure 22 : Répartition des émissions par scopes	42

Nomenclature

g : gramme

kg : kilogramme (1kg=10³g)

t : tonne (1t= 10⁶g)

Gt : gigatonne (1Gt= 10⁹T)

m : mètre

km : kilomètre (1km=10³m)

l : litre

CO_{2eq} : CO₂ équivalent

µm : micromètre

x : nombre d'atomes de Carbone

y : nombre d'atomes d'Hydrogène

H : Hydrogène

O : Oxygène

q₁, q₂, q₃ : quantité de chaleur

W : Travail fourni

Sigles et abréviations

ABC : Association Bilan Carbone

ACV : Analyse du Cycle de Vie

ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

AEE : Association pour l'Efficacité Energétique

AIE : Agence Internationale de l'Energie

CCNUCC : Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques

CNSR : Centre National de Sécurité Routière

CTA : Contrôle Technique Automobile

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

IR : Infra-Rouge

PM : Matières Particulaires

PRG : Potentiel de Réchauffement Global

PTAC : Poids Total A Charge

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Économiques

ODD : Objectifs de Développement Durable

SIE : Système d'Information Energétiques

UV : Ultra-Violet

Composés chimiques

CH₄ : Méthane

CO : Monoxyde de Carbone

CO₂ : Dioxyde de Carbone

H₂O : Eau

NO_x : Oxyde d'Azote

NO : Monoxyde d'Azote

NO₂ : Dioxyde d'Azote

N₂O : Protoxyde d'Azote

Introduction Générale

La terre est quasiment la seule planète « habitable ». La vie sur cette planète est possible à cause d'un certain nombre de facteurs surtout liés à son environnement. C'est donc l'un des éléments les plus importants sur lesquels il faudrait avoir un suivi pour garantir que la terre puisse continuer à abriter les générations à venir sans trop d'inconfort. Les activités anthropiques engendrent cependant un certain nombre de problèmes dont fait partie la pollution atmosphérique due aux rejets de gaz à effet de serre. Celle-ci peut notamment causer des problèmes de santé tels que les maladies cardiovasculaires, des cancers, des maladies du sang, des problèmes dans le développement mental de l'enfant. Elle est aussi source de la destruction de la couche d'ozone, la fonte des glaces et l'élévation du niveau des mers, l'extinction d'espèces animales ou végétales, les catastrophes naturelles (inondations, ouragans, ...) et du réchauffement climatique. La grande majorité des émissions de Gaz à Effet de Serre est attribuable à la consommation d'énergie (81%) se manifestant principalement par la combustion de combustibles fossiles (Charbon, pétrole et gaz) (Gratton, 2014) ; cette combustion des matières premières se produit principalement lors du fonctionnement des secteurs industriels et du transport. Le secteur des transports contribue pour une part très importante dans l'émission de Gaz à Effet de Serre (GES) et n'est donc pas à négliger. Sa contribution aux émissions de dioxyde de carbone ne cesse de progresser dans le monde et est passé à 18GT en 2017 (Climate Chance, 2018). En effet, on assiste de plus en plus à l'explosion du trafic routier avec des véhicules de plus en plus sophistiqués et qui consomment beaucoup d'énergie autant bien pour la puissance que pour le confort dans le véhicule. Ainsi, le secteur des transports routiers continuera de poser des problèmes environnementaux significatifs (EEA, 2006).

Les conséquences des émissions de GES sur l'environnement sont lourdes et depuis quelques années déjà des moyens sont perpétuellement recherchés pour réduire leurs émissions dans l'atmosphère. En 1992, au sommet de la Terre de l'ONU à Rio, une convention a été prise pour stabiliser les niveaux de gaz à effet de serre afin d'éviter toute perturbation humaine du système climatique. L'un des objectifs que le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) s'est fixé est de réduire de 50 à 85%, d'ici 2050, les émissions mondiales de GES par rapport à celles de l'an 2000 (GIEC, 2007).

Ceci étant, il nous faudra déployer des efforts pour réduire les émissions de ces GES. Les impacts actuels et à venir peuvent être minimisés si des mesures d'adaptation sont mises en place. C'est un enjeu aussi bien environnemental, politique que social.

Cet enjeu concerne tous les pays du monde car la pollution atmosphérique n'est pas que territoriale et de plus chaque pays apporte sa contribution en termes de gaz à effet de Serre. Dans la perspective de contribuer à cette réduction de l'émission des GES et freiner le phénomène du réchauffement climatique sur notre planète, chaque pays doit agir conformément aux résolutions prises à l'internationale, quel que soit la quantité de ses émissions de GES. Il n'est pas question de rester inactif face à cette situation.

Pour cela, il faudrait déjà connaître notre échelle de pollution de l'environnement, analyser les causes afin d'envisager les moyens de la réduction. Conformément aux obligations internationales, les pays sont tenus d'indiquer les rejets de CO₂ des différentes sources d'émission (OCDE, 2017). Cela révèle la pertinence d'une étude de bilan carbone dans le secteur des transports routiers au Sud du Bénin par exemple.

Nous nous préoccupons ici de la pollution atmosphérique résultant du transport terrestre, particulièrement de l'émission des GES engendrée par les véhicules de tourisme (dont le moteur est à combustion interne). En d'autres termes, il s'agira pour nous d'apprécier le degré de pollution dans l'environnement au Bénin par l'émission des GES produits dans le secteur des transports routiers, par les véhicules de tourisme. Cette étude s'inscrit dans le cadre des Objectif de Développement Durable (ODD) 13 « prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions » et ODD15 « préserver et restaurer les écosystèmes terrestres et mettre fin à l'appauvrissement de la couche d'ozone et à l'augmentation de la température à la surface de la terre.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE

BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

La protection de l'environnement est l'un des sujets d'actualités les plus importants depuis le XIX^{ème} siècle. Il est évident que les nombreuses activités humaines polluent de plus en plus l'environnement ; et de façon perpétuelle, des moyens sont recherchés pour freiner la pollution environnementale surtout celle atmosphérique. Un premier pas dans cette perspective est l'évaluation du niveau de pollution atmosphérique, de chaque secteur d'activités. Ce chapitre s'intéresse dans un premier temps à l'émission des GES par le secteur des transports et en particulier par les véhicules de tourisme des transports routiers. Dans un second temps, il aborde la description de ce que c'est que le bilan carbone et comment il est utilisé pour évaluer les émissions de GES de ce sous-secteur.

1.1. Enjeux liés à l'émission de GES par le secteur des transports

1.1.1. Effet de serre et le changement climatique

La température globale à la surface de la Terre résulte d'un équilibre entre l'énergie provenant des radiations du Soleil et celle réfléchiée et émise par le système Terre-Atmosphère.

Le flux d'énergie solaire arrive sur la planète terre essentiellement sous forme de rayonnement de lumière visible et sous forme de rayons Ultra-Violet (UV). Une partie de cette énergie, environ 30 %, est directement renvoyée vers l'espace par l'atmosphère et la surface terrestre. Les 70 % restants sont absorbés par l'atmosphère en partie et par la surface terrestre principalement. La Terre chauffée par le soleil va réémettre une partie de l'énergie reçue sous la forme d'un rayonnement infrarouge (IR) et, en conséquence, se refroidir. Mais l'atmosphère est capable de piéger une partie de ce rayonnement en l'absorbant grâce aux gaz à effet de serre (GES) qui permettent la réflexion de ces rayons IR vers le sol pour le réchauffer. Ainsi, la chaleur est piégée comme dans une serre de jardin. C'est l'effet de serre.

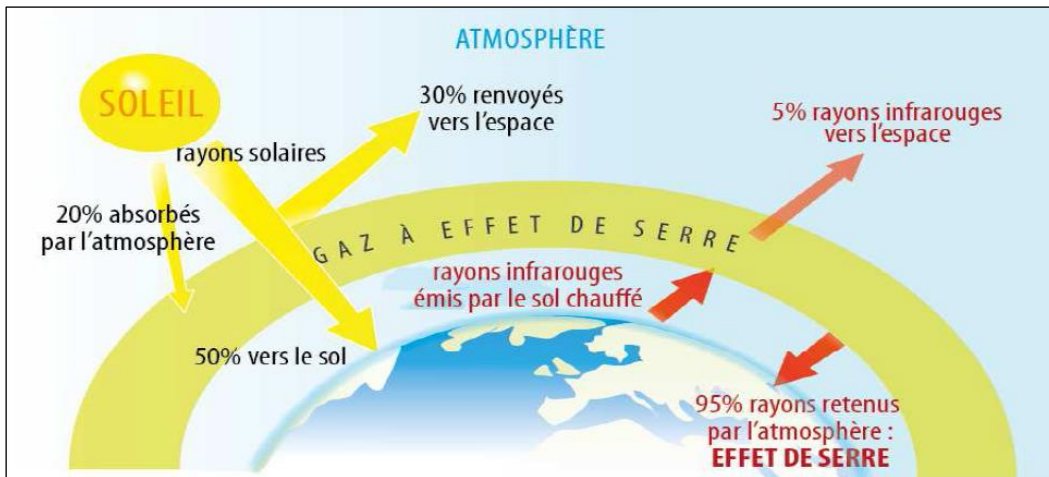
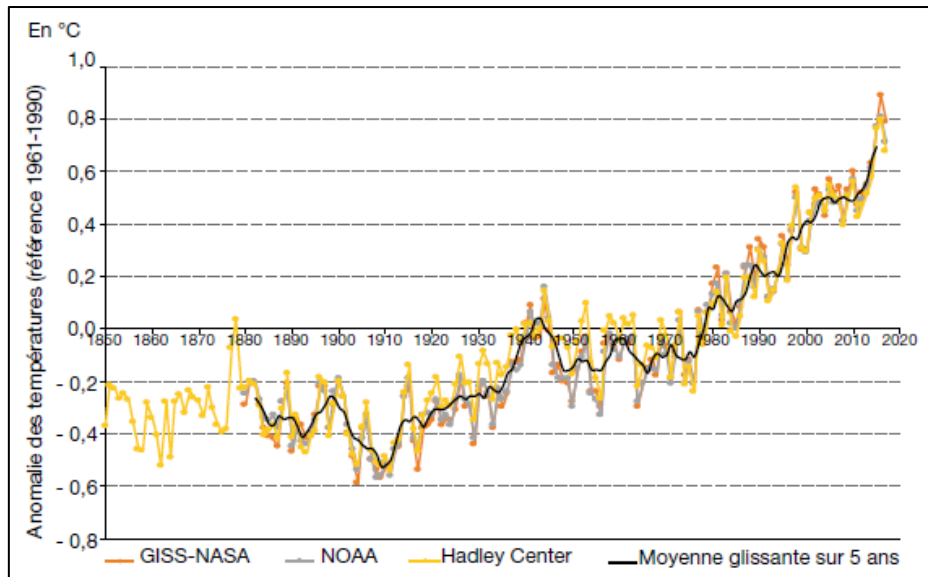


Figure 1 : Schéma décrivant le mécanisme de l'effet de serre (Source : Tajjiou Rabhioui, 2013)

Sans l'atmosphère et son rôle naturel d'effet de serre, la température moyenne de la Terre serait de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, au lieu des $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ actuels permettant le développement de la vie (Bruder et al, 2010). Une concentration élevée de GES dans l'atmosphère va augmenter l'effet de serre ce qui serait aussi néfaste au développement de la vie sur la terre. Ce deuxième cas est la situation vers laquelle nous tendons actuellement avec une variation de la température de près $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Climate chance, 2018)

Le cycle naturel des émissions de GES est complexe. La terre absorbe et rejette naturellement des GES, en particulier du CO_2 qui est en plus grande proportion. Il existe quatre grands réservoirs permettant de stocker le carbone : l'atmosphère (sous forme gazeuse), la biosphère (matière organique des êtres vivants), l'océan (CO_2 dissous) et le Sous-sol. Sur les 1038 gigatonnes (Gt) de CO_2 libérées chaque année par les activités humaines depuis la biosphère et le sous-sol, l'atmosphère en absorbe 605 Gt et les océans 433 Gt. L'atmosphère est le réservoir le plus affecté par les activités anthropiques, puisque la quantité de carbone y a augmenté de près de 30 % par rapport à l'ère préindustrielle (Savy et al, 2010).

La température moyenne de la terre varie continuellement en croissance et en décroissance. Mais depuis 2010 elle n'a fait que croître comme cela peut être remarqué sur la figure n°2. Les quatre dernières années (2014, 2015, 2016, 2017) constituent les quatre années les plus chaudes jamais enregistrées (Institute for climates economics, 2019).



*Figure 2: Evolution de la température moyenne annuelle mondiale de 1850 à 2017
(Source : Institute for climates economics, 2019)*

Une élévation moyenne de la température de 3 °C à 4 °C, par rapport à la période 1980-1999, pourrait avoir des conséquences extrêmement graves :

- une fonte des couvertures glaciaires pouvant entraîner une élévation de plusieurs mètres du niveau de la mer ; 30 % des zones humides côtières de la planète pourraient être perdues ; des millions de personnes pourraient être victimes d'inondations côtières chaque année ; le niveau moyen de la mer s'est élevé de $1,7 \pm 0,3$ mm/an sur la période 1901-2010. Le taux d'élévation du niveau marin s'est accéléré durant les dernières décennies pour atteindre $3,2 \pm 0,4$ mm/an sur la période 1993-2010 (Institute for climates economics, 2019) comme le montre la figure n°3.



Figure 3: Evolution du niveau moyen des mers du globe terrestre par rapport à la période de référence 1900-1905 (Source : Institute for climates economics, 2019)

- une diminution des ressources en eau aux latitudes moyennes et dans les zones semi-arides ; une réduction corrélative de la productivité agricole (les rendements pourraient baisser de 50 % dans certains pays africains dès 2020) ; et une exposition de centaines de millions de personnes à un stress hydrique accru ;
- une augmentation générale des phénomènes climatiques extrêmes : cyclones, tempêtes, crues, canicules ;
- un risque de disparition de plus de 30 % des espèces vivantes, une disparition progressive des récifs coralliens et, d'une manière générale, un bouleversement des écosystèmes terrestres et marins incapables de s'adapter à une évolution aussi rapide du climat ;
- enfin, une probabilité de voir la biosphère terrestre devenir une source nette de carbone, ce qui pourrait constituer un effet accélérateur du changement climatique. (Savy et al, 2010)

Il urge de mettre en œuvre des actions de réduction des émissions des GES afin de lutter contre l'échauffement de la planète, le changement climatique, la montée des océans et mers, la réduction de la surface de la terre (sol, végétation, etc).

1.1.2. Effet de serre et les transports à l'échelle internationale

Les experts mondiaux ont reconnu que l'effet de serre est en étroite corrélation avec les activités anthropiques. En effet, le principal gaz à effet de serre (le CO₂) provient majoritairement de la combustion des énergies fossiles qui sont entre autres le pétrole, le gaz et le charbon. Les différents secteurs utilisant ces énergies fossiles sont : le secteur de l'industrie, le secteur de l'énergie, le secteur résidentiel et tertiaire et enfin le secteur des transports. Ce dernier secteur se retrouve être aujourd'hui la deuxième source d'émission de GES dans le monde (Institute for climates economics, 2019). La figure n°4 l'illustre bien.

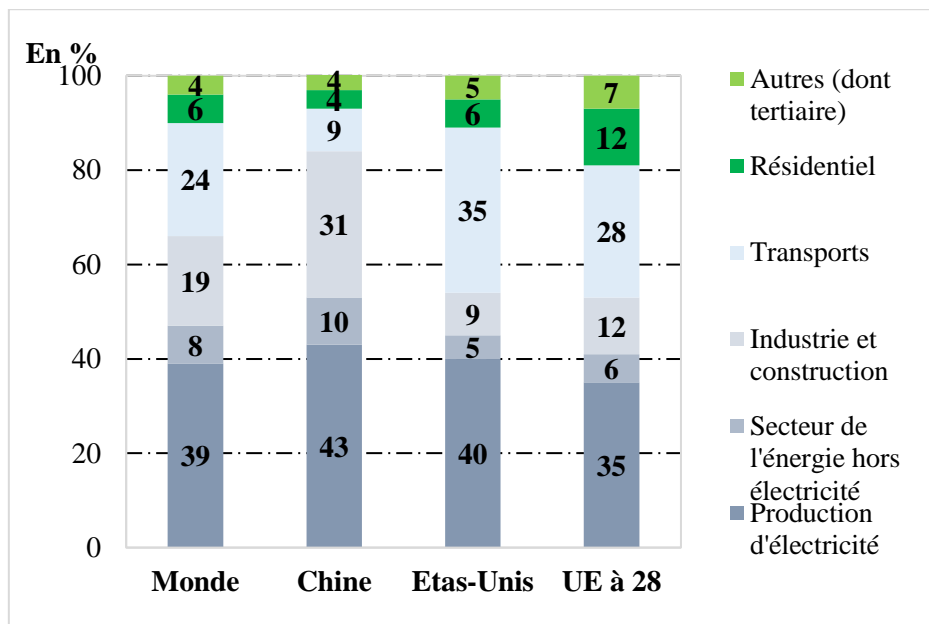


Figure 4 : Emissions de CO₂ dues à la combustion d'énergie parmi les principaux émetteurs en 2015 (Source : Institute for climates economics, 2019)

La figure 4 montre que après le secteur de la production de l'électricité qui demeure le premier émetteur de GES avec globalement 39 % des émissions, vient le secteur des transports avec environ 24 %. Dans les pays de l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE), les transports sont responsables d'environ 27 % des émissions totales de CO₂. Les émissions qu'ils engendrent font augmenter considérablement la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre.

La majorité des émissions de carbone dans le secteur des transports provient du transport routier, qui représente environ les trois quarts des émissions de carbone des transports, soit environ 6 GT d'émissions directes de carbone en 2017. Depuis 2000, les émissions du transport routier ont augmenté de 2 % par an, faisant de ce sous-

secteur l'un des secteurs d'émission affichant la plus forte croissance au cours des cinquante dernières années (Climate chance, 2018).

À l'échelle mondiale, 90 % du transport de personnes et 70 % du transport de marchandises par voie terrestre sont assurés par la route.

Une part croissante des émissions de CO₂ est associée au transport routier en ville et à ses abords. En 2013, l'Agence internationale de l'énergie a estimé que le transport routier en ville constituait environ la moitié du total des émissions du transport routier.

D'ici 2050, le rythme de la croissance actuelle des émissions de carbone des transports routiers entraînera une augmentation de leurs émissions de l'ordre de 10 à 17 Gigatonnes. Toutefois, les récentes études sur la décarbonations du secteur des transports illustrent bien l'ampleur des transformations à mener dans ce secteur vers un système de transport décarboné, devant réduire ses émissions de 2 à 3 GT par an d'ici 2050. (Climate chance, 2018)

Il n'y a plus de doute qu'à l'échelle mondiale, le transport routier contribue pour beaucoup à l'effet de serre. Les statistiques le révèlent très bien. Comme on peut s'y attendre, les pays développés comme les USA, la Chine, l'Inde, etc., viennent en premier de par leur contribution à l'effet de serre par le sous-secteur des transports routiers. Mais les pays du tiers monde ne sont pas à négliger aussi dans ces évaluations.

Les pays qui ont ratifié la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) en 2001 se sont engagés à :

- Établir des inventaires nationaux des émissions de tous les GES.
- Élaborer, appliquer, diffuser et mettre à jour des programmes nationaux de mesures visant à atténuer les changements climatiques.
- Promouvoir et coopérer au développement, à la mise en œuvre et à la diffusion de technologies, pratiques et procédés qui permettent de maîtriser, réduire ou prévenir les émissions anthropiques de GES dans tous les secteurs intéressés. (OCDE, 2020)

1.1.3. Gaz à effet de serre et transports au Bénin

Au Bénin comme partout ailleurs les activités anthropiques entraînent des émissions de GES. Une étude a été réalisée en 2019 par une équipe formée par le ministère du

cadre de vie et du développement durable pour estimer l'émission de GES par les différentes sources ou puits de GES au Bénin. Cette étude a révélé que pour tous les secteurs utilisant de l'énergie, le secteur des transports est le plus émetteur de GES. Le tableau n°1 présente une partie des résultats de cette étude en donne une illustration.

Tableau 1 : Emissions et absorptions totales de GES directs par secteur sur la série temporelle 1990–2015 (Gg CO₂ eq) (Source : GUENDEHOU & al, 2019)

Catégories de sources et de puits de GES	Emissions Annuelles de GES (Gg CO ₂ eq)									
	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Energie (combustion de combustibles : Emissions de CO ₂ estimé par approche de référence	441,2	759,33	1535,87	2662,14	4486,97	4321,18	4171,23	4403,65	4592,67	5054,83
1- Energie	863,09	1249,21	2020,98	3376,6	5374,29	5204,58	5081,81	5374,39	5667,56	6166,64
1. A. - Activités de combustion de carburant (approche sectorielle)	854,41	1242,38	2020,98	3376,6	5374,29	5204,58	5081,81	5374,39	5667,56	6166,64
1. A.1 - Industries énergétiques	101,67	129,75	179,89	252,61	272,14	306,45	364,15	384,15	431,92	503,63
1. A.2 - Industries manufacturières et construction	87,22	115,26	170	148,54	167,55	208,17	176,27	273,79	366,87	347,78
1. A.3 - Transport	200,54	418,44	937,3	1549,6	3196,94	3311,76	3449,26	3880,31	4102,65	4622,58
1. A.4 - Autres secteurs	464,97	578,94	733,79	1425,85	1710,67	1378,21	1092,14	835,5	766,12	692,64
1. A.4.a - Secteur commercial et institutionnel	53,3	61,84	72,79	85,85	102,23	87,72	91,58	98,16	101,65	105,27
1. A.4.ab - Secteur résidentiel	411,77	517,1	660,99	1340	1608,44	1290,49	1000,56	737,34	664,47	587,37
1. B - Emissions fugitives imputables aux combustibles	8,68	6,83	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
1. B.2 - Pétrole et gaz naturel	8,68	6,83	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
2. Procédés industriels et utilisation des produits	72,47	79,24	NA, NE	220,61	241,26	233,21	273,82	288,7	382,45	382,45
2. A - Industrie Minérale	72,47	79,24	NA	220,61	241,26	233,21	235,44	212,47	213,98	213,98
2. A.1 - Production de ciment	72,47	79,24	NA	220,61	241,26	233,21	235,44	212,47	213,98	213,98
2. F - Utilisation de produits comme substituts de SAO	NO	NO	NE	NE	NE	NE	38,37	76,23	119,64	168,47
2. F.1 - Réfrigération et climatisation	NA	NA	NE	NE	NE	NE	38,37	76,23	119,64	168,47
2. H - Autres	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
2. H.2 - Industrie alimentaire et des boissons	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

NO : l'activité n'a pas lieu

NA : Néant

NE : Non estimé

De 1990 à 2015, les émissions annuelles de GES pour ce secteur des transports routiers n'ont cessé de grimper, allant de 200,54 Gg CO₂ eq en 1990 à 4622,58 Gg CO₂ eq en 2015. Comme cela peut être remarqué sur la figure n°5, parmi toutes les sources d'émissions de GES, le secteur des transports est celui pour lequel les émissions ont une forte croissance depuis 1995.

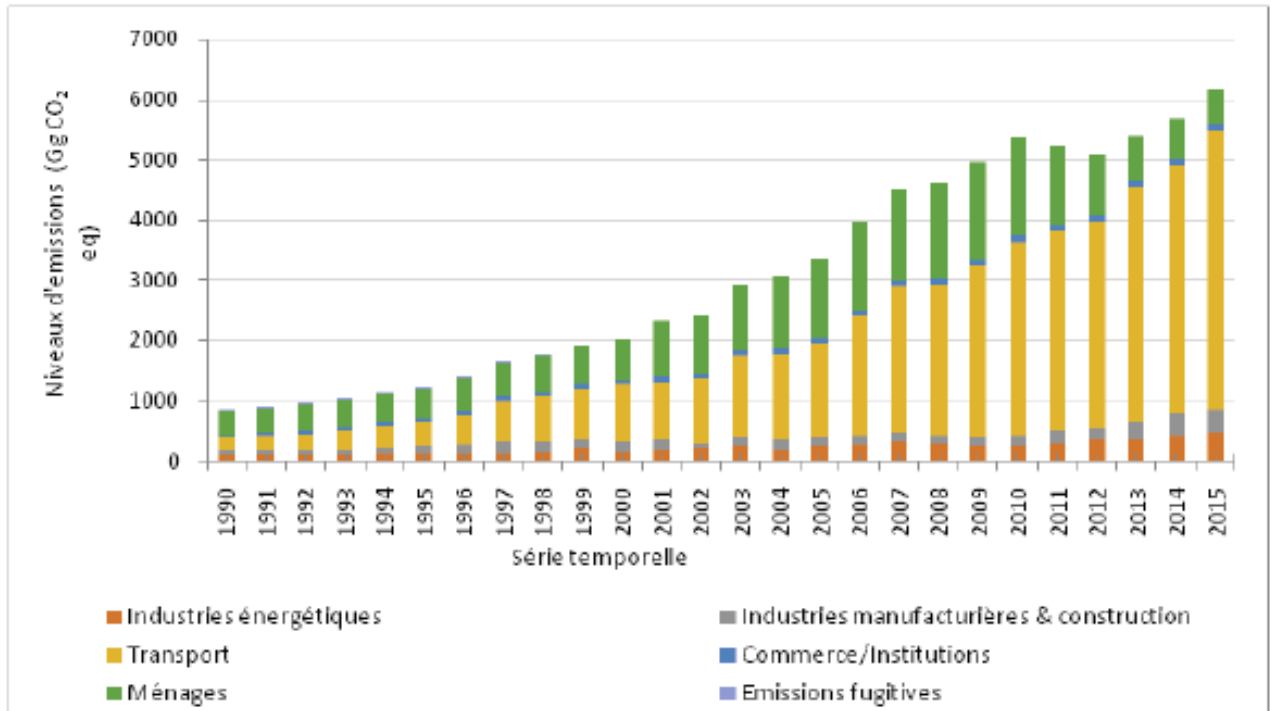


Figure 5 : Tendence des émissions de GES directs par catégorie dans le secteur de l'énergie de 1990 à 2015 (Source : GUENDEHOU & al, 2019)

Le transport routier absorbe la majeure partie de la consommation d'énergie du secteur des transports. Pour s'aligner sur les perspectives en ce qui concerne la réduction des émissions de GES à l'échelle mondiale, un axe très important pour le Bénin est de mettre en œuvre des mesures pour réduire les émissions de GES dues à son secteur des transports routiers. Un premier pas dans ce sens est une évaluation de ces émissions par la méthode Bilan Carbone.

1.2. Emission de GES par les véhicules

Les GES émis par les véhicules proviennent de la combustion qui a lieu dans leurs moteurs thermiques à combustion interne.

1.2.1. Fonctionnement d'un moteur à combustion interne

Un moteur thermique à combustion interne peut être défini comme un appareil ou une machine qui transforme l'énergie chimique (énergie contenue dans un combustible solide, liquide ou gazeux) en énergie mécanique généralement recueillie en bout d'un arbre sous forme rotative, la combustion du combustible s'effectuant à l'intérieur même du cylindre du moteur. Le fonctionnement du moteur à combustion interne se fait suivant le schéma principe résumé sur la figure n°6 :

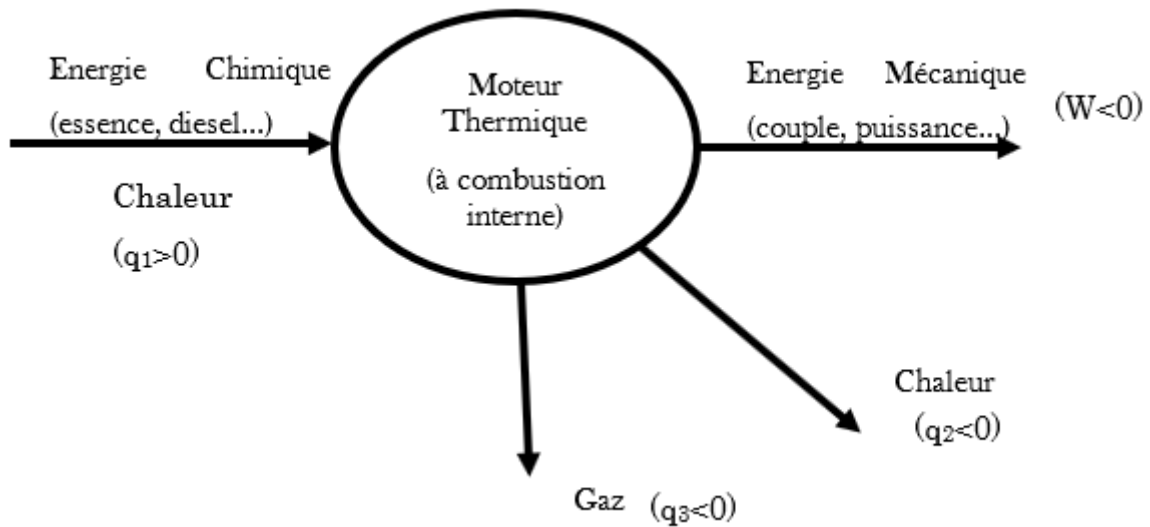


Figure 6 : Schéma de principe du moteur thermique

Le moteur à combustion interne convertit l'énergie chimique emmagasinée dans un carburant (Pouvoir Calorifique) en une énergie thermique (Chaleur, Enthalpie, Energie Calorifique), puis en une énergie mécanique (Travail Mécanique, Couple). Le carburant peut être de l'essence, du diesel, du GPL ou du fuel. Selon le type de carburant, on parle par exemple de moteur à essence ou de moteur diesel.

Dans les moteurs à combustion interne, la production de l'énergie thermique se fait dans un volume fermé au-dessus du piston et confiné par la culasse, les soupapes fermées. La détente des gaz produits par la combustion du carburant actionne des organes actifs (Piston-Bielle-Manivelle) qui récupèrent cette énergie pour la convertir en travail utile (Arbre moteur). La structure d'un moteur à combustion interne est présenté sur la figure n°7 :

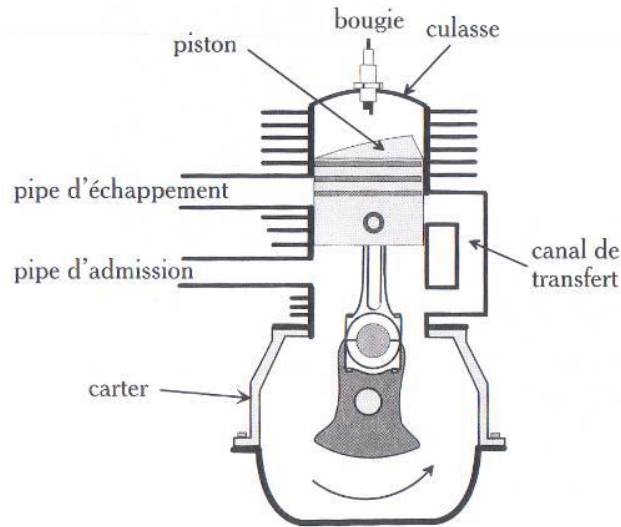


Figure 7 : Structure d'un moteur à combustion interne à quatre temps à essence (Source : Khiar, 2007)

La combustion qui se produit dans la chambre de combustion du moteur thermique se fait en plusieurs étapes : on parle de deux-temps ou quatre-temps. Mais les moteurs généralement utilisés aujourd'hui sont des moteurs fonctionnant à quatre temps : l'admission, la compression, l'explosion-détente et l'échappement.

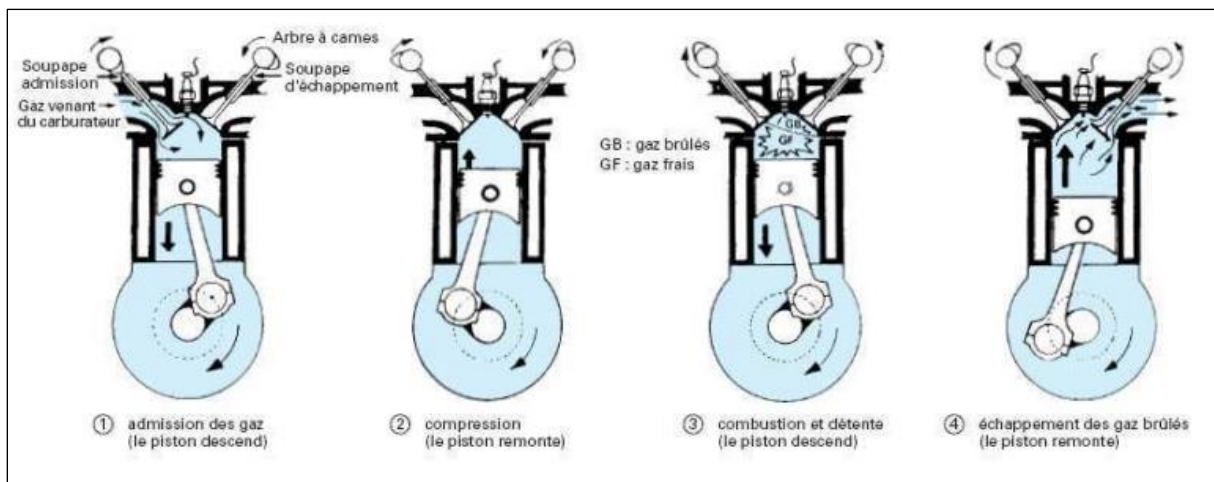


Figure 8 : Cycle à quatre temps pour un moteur à essence à quatre temps. (Source Khiar, 2007)

L'admission : Le piston descend et crée une baisse de pression favorisant l'aspiration des gaz. La soupape d'admission ouverte et d'échappement fermée.

La compression : Le piston comprime les gaz jusqu'à ce qu'ils n'occupent plus que la chambre de combustion. Soupape d'admission fermée et d'échappement fermée.

L'explosion-détente : L'étincelle d'une bougie (ou l'injection de gazole comprimé) enflamme le mélange. La chaleur dégagée dilate le gaz qui pousse violemment le piston vers le bas. Soupape d'admission fermée et d'échappement fermée.

L'échappement : En remontant, le piston chasse les gaz brûlés. Le moteur est à nouveau prêt à effectuer le premier temps. Soupape d'admission fermée et d'échappement ouverte.

Le phénomène n'est pas identique pour les deux types de moteurs thermiques (essence et diesel), mais il suit le même principe.

Le cycle thermodynamique de la combustion dans un moteur thermique est présenté sur la figure n° 9 :

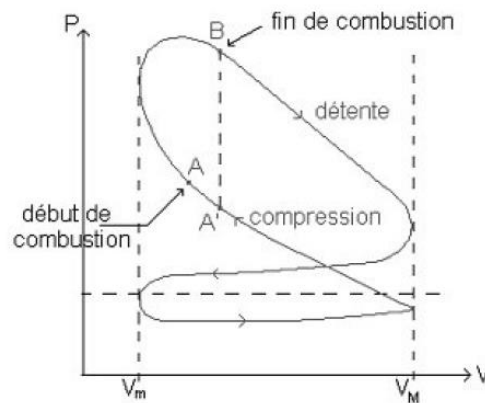
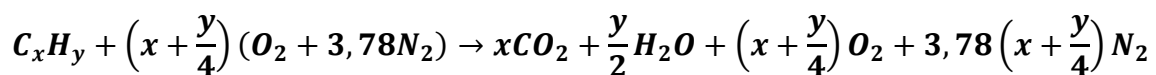


Figure 9 : Cycle thermodynamique des gaz dans un moteur thermique
(Source : da Silva G & Thibault J-P., 2011)

1.2.2. Combustion

Tous les carburants sont des hydrocarbures de formule générale C_xH_y . Ils constituent le combustible. La combustion nécessite en dehors du combustible, un comburant qui ici est généralement le dioxygène O_2 contenu dans l'air.

L'équation de la réaction est (da Silva & Thibault, 2011) :



Avec :

x : nombre d'atomes de Carbone

y : nombre d'atomes d'hydrogène

Dans le cas d'une combustion complète idéale, les produits formés sont majoritairement le dioxyde de carbone (CO_2) et l'eau (H_2O). Cela n'est malheureusement jamais atteint. En effet, de temps très courts laissés aux différents processus chimiques d'oxydation, de manque d'homogénéité des mélanges carburés et de variations rapides de température au niveau de la chambre de combustion du moteur conduit à la présence de produits de combustion incomplets à l'échappement. De manière générale, ces divers polluants émis dans les gaz d'échappement des véhicules sont : le monoxyde de carbone (CO), les composés organiques volatils non méthaniques (COVNM), les oxydes d'azote (NO_x qui regroupe le NO et le NO_2), le dioxyde de carbone (CO_2), les particules de suspension (PM), les gaz fluorés (CFC), les hydrocarbures aromatiques polycyclique (HAP), la vapeur d'eau (H_2O). Dans le cas de l'utilisation du gazole non desulfuré, on retrouve parmi les polluants émis par le véhicule des composés soufrés (SF_4). Aussi l'emploi de carburants plombés, peut engendrer la présence de composés halogénés (halogénures, bromures et chlorures de plomb qui produisent dans l'atmosphère) (HBr et HCl).

- ✓ Le Dioxyde de Carbone (CO_2) est un gaz incolore, inodore, présent dans l'atmosphère dans une proportion égale à 0,0375 % en volume, soit 375 ppmv (parties par million en volume). Le CO_2 représente plus de 99 % de la masse de tous les gaz d'échappement (CO_2 , CO, HC, NO_x , etc.) (OCDE, 2017). Les pots catalytiques et autres dispositifs d'échappement assurent l'oxydation en CO_2 et H_2O d'une grande partie du monoxyde de carbone (CO) et des hydrocarbures (HC). C'est pourquoi le CO_2 est considéré comme la principale forme de polluants des moteurs à combustion interne.
- ✓ Le monoxyde de Carbone (CO) est un polluant issu de combustions incomplètes : il provient de la combustion du carbone en présence d'une quantité d'oxygène (donc d'air) insuffisante. Il est principalement émis par les automobiles à faible vitesse lors de situations de bouchons ou de ralentissements. Le CO est un précurseur de la formation de l'ozone 2 dans les zones urbanisées. C'est un gaz incolore, inodore et sans saveur, donc difficilement décelable.
- ✓ Les oxydes d'azote (NO_x) comprennent principalement le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO_2) en milieu urbain. Le Monoxyde d'azote (NO) est l'oxyde d'azote prédominant qui se forme par oxydation lors de phénomène de

combustion dans un moteur. Il est émis directement à la sortie du pot d'échappement et sa formation dépend de la température. Plus cette dernière est élevée plus la quantité de NO générée est importante. Cette propriété explique que les émissions de NO des véhicules augmentent avec la vitesse ou dans les embouteillages (température du moteur plus élevée). Le monoxyde d'azote est ensuite oxydé en moins de deux minutes en dioxyde d'azote (NO₂) par les agents oxydants de l'air. C'est la rapidité de cette réaction qui fait considérer le NO₂ comme un polluant primaire. On retrouve le NO₂ principalement à proximité des axes de forte circulation et dans les centres villes. Il est particulièrement présent lors des conditions de forte stabilité atmosphérique (les smogs) : situations anticycloniques et inversions thermiques en hiver. Les oxydes d'azote interviennent dans le processus de formation d'ozone dans la basse couche et contribuent au phénomène des pluies acides.

- ✓ Le méthane CH₄ : Certains autobus, camions (véhicules utilitaires lourds et légers) et voitures particulières utilisent du gaz naturel comprimé comme carburant. Le gaz naturel issu de gisements fossiles comporte une très forte proportion de méthane (de 82 à 95 %) ; il résulte aussi de la fermentation végétale. Il peut être stocké sous forme gazeuse ou liquide. Son utilisation va probablement se répandre pour diverses raisons, la principale d'entre elles étant que les émissions de CO₂ des véhicules à moteur utilisant du gaz naturel comprimé (GNC) pourraient être de 10 à 25 % inférieures à celles des véhicules équipés d'un moteur à essence. Le GNC produit également moins de monoxyde de carbone (CO), d'hydrocarbures (HC) et d'oxydes de carbone (NO_x), ce qui est un facteur particulièrement appréciable dans les zones urbaines. Toutefois, même sur les véhicules munis d'un pot catalytique, la teneur de méthane (CH₄) des gaz d'échappement reste significative. Il est donc essentiel de s'intéresser aux émissions de méthane lors d'une étude des gaz à effet de serre.

- ✓ Les particules en suspension (PM) sont principalement issues de la combustion des produits pétroliers. Les automobiles (diesel en particulier) et l'industrie en sont donc la source majeure, avec une prédominance automobile surtout dans les zones urbanisées. On les retrouve principalement dans les centres villes, alliant fortes émissions et faibles dispersions de la pollution. Les particules en

suspension provoquent essentiellement des troubles respiratoires. Les PM d'une taille supérieure à 10 µm sont bloqués dans les voies aériennes supérieures de l'arbre respiratoire. Les particules de taille inférieure pénètrent plus profondément, dans les poumons, où leur impact sur la santé est plus important.

- ✓ Les Composés Organiques Volatils non méthaniques (COVNM) regroupent un ensemble de polluants d'origine humaine, autre que le méthane, capable, en présence d'oxydes d'azote et de lumière de produire des polluants photochimiques. Comme le CO, ils proviennent de la combustion incomplète des combustibles. Mais il peut s'agir aussi d'hydrocarbures émis par évaporation des bacs de stockage pétroliers ou lors du remplissage des réservoirs d'automobiles, de solvants émis lors de l'application des peintures, des encres etc., de composés organiques émis par l'agriculture et par le milieu naturel...

1.3. Bilan Carbone

1.3.1. Définition et Synthèse sur le Bilan carbone

Selon l'ADEME, le bilan carbone est la quantification des impacts environnementaux se focalisant sur la problématique des émissions de gaz à effets de serre (ADEME, 2014). Le Bilan Carbone est un standard d'excellence en matière de comptabilité GES : il a pour objectif de réaliser une photographie exhaustive de l'ensemble des émissions de GES d'un territoire, d'une organisation, d'un projet, d'un évènement ou d'une activité. Le bilan carbone tient également compte de toutes les émissions causées ailleurs dans le monde pour rendre le système étudié possible. Il est aussi un outil de management environnemental, remplissant un rôle de guide et de support des organisations dans le cadre de leurs démarches de transition climat-énergie.

Le bilan carbone est une des méthodes utilisées pour l'ACV (Analyse du Cycle de vie) qui est la mesure des ressources nécessaires pour fabriquer un produit ou donner accès à un service, suivie de la quantification des impacts potentiels de cette fabrication sur l'environnement.. L'Analyse du Cycle de vie est une science nouvelle en plein essor. Ses concepts sont apparus entre 1960 et 1970 quand les premières études sur la comparaison des productions ont été faites (Franchetti & al., 2012). Certaines comparaisons populaires de l'époque étaient le papier par rapport aux couches pour bébés en coton, le verre par rapport aux emballages de lait en plastique, et la comparaison de neuf types de contenants de boisson en verre, en plastique, en

aluminium ou en acier (Guinee & al. 2011). Vers 1990, l'ACV est devenu populaire à l'échelle mondiale et ses méthodes ont été standardisées par l'Organisation Internationale de la Standardisation (ISO). En 2000, les méthodes de l'ACV ont été davantage développées. En outre, les études sur l'ACV sont devenues de plus en plus abondantes. Cela peut être vu à partir d'une simple recherche par mot-clé dans le web des connaissances, qui est l'une des bases de données de recherche les plus complètes et les plus populaires pour les revues académiques, les actes de conférence et le contenu du site Web.

Depuis lors, l'ACV a souvent été utilisé pour quantifier les émissions de GES générées par tout genre d'activité, de structure, de territoire.

En 2010, un bilan carbone a été réalisé en France dans le secteur de l'alimentation. Dans le cadre de cette étude qui a été faite, les résultats d'Analyse du Cycle de Vie de produits alimentaires issus de la littérature internationale et d'études françaises ont été utilisés pour évaluer l'impact carbone de régimes alimentaires différenciés sur la base de leurs caractéristiques nutritionnelles. Pour cette première étude de cas, il a été choisi, pour ne pas complexifier l'analyse des résultats, de s'intéresser uniquement à l'impact carbone des différents régimes. Les résultats ont fait ressortir les régimes alimentaires les plus émetteurs de GES. (ADEME-INRA, 2010)

En 2012 en France, un bilan carbone a été réalisé pour évaluer les émissions de GES liées au fonctionnement interne des services de la Direction Interdépartementale des Routes Nord. Il a révélé que son poste le plus émetteur est celui des transports et que ce poste représente à lui seul près de 86 % du total des émissions contre 14 % pour les énergies. (Tajjiou Rabhioui, 2013).

En 2012, dans le cadre du programme Climat municipalités, un bilan carbone a été effectué au Canada pour évaluer les émissions de GES de la ville de Joliette. Les émissions de GES comptabilisées à cette occasion sont les principales émissions générées par les activités dont la Ville a la responsabilité (inventaire corporatif) ainsi que les principales émissions générées par les activités de sa population sur lesquelles la Ville exerce un pouvoir, (Gratton, 2014). L'étude a permis d'identifier les secteurs les plus émetteurs de GES dans la ville de Joliette (transport, production d'électricité) et de proposer les solutions pour leur réduction.

En 2019, un autre bilan carbone a été réalisé pour la ville de Québec au Canada pour évaluer l'évolution des émissions de GES de chaque secteur d'activité depuis 1990 à 2017. Cette étude s'est basée sur des données enregistrées pendant toutes ces années.

Elle a eu la particularité de s'intéresser aux tendances afin d'avoir une idée de la quantité de GES qui sera émise dans les années à venir pour cette ville et mieux anticiper. (Leblond & al., 2019)

Belymam Hajar a publié en 2018 les résultats de ses études relatives à un bilan carbone réalisé sur une unité d'hémodialyse au Maroc. L'objectif de l'étude était de réaliser un bilan des émissions de GES, et de voir ses spécificités, afin d'établir un plan d'action ciblé pour réduire l'impact écologique de l'hémodialyse au Maroc. Ce fût une première expérience de l'utilisation du Bilan Carbone. Les données analysées avaient été recueillies en 2015. (Belymam, 2018).

Au Bénin, les études qui ont été réalisées pour estimer l'émission de GES par les différentes sources ou puits de GES sont un exemple typique de Bilan Carbone. Les émissions de CO₂ par le secteur des transports ont été évaluées par consommation annuelle du gasoil et de l'essence fournie par les rapports du Système d'Information Energétiques (SIE) Bénin. Cette étude présente l'insuffisance de ne s'être intéressé qu'au CO₂ alors qu'il n'est pas le seul GES existant. De plus, le Gasoil et l'essence ne sont pas utilisés que par les véhicules. Ainsi, leur consommation annuelle ne donne pas une appréciation réelle des émissions de GES du secteur des transports (Guendehou & al, 2019).

1.3.2. Principaux GES et Potentiel de réchauffement global

En dehors du CO₂, d'autres gaz sont pris en compte dans l'évaluation du bilan carbone

1.3.2.1. Principaux GES

Les principaux GES pris en compte par le bilan carbone sont :

- La vapeur d'eau (H₂O)
- Le dioxyde de carbone (CO₂)
- Le méthane (CH₄)
- Le protoxyde d'azote (N₂O)
- L'ozone (O₃)
- les gaz fluorés (CFC, HCFC, PFC, HFC, SF₆, NF₃)

À chacun de ces gaz est associée une durée de séjour dans l'atmosphère. C'est une donnée approximative puisqu'elle dépend de nombreux paramètres (conditions météorologiques, réactions chimiques, etc.).

On appelle GES anthropiques, les GES dont l'émission est influencée par les activités humaines. La vapeur d'eau et l'ozone troposphérique ne sont pas des GES anthropiques. En effet, la vapeur d'eau (dont la durée de vie dans l'atmosphère est très courte) provient surtout de l'évaporation des eaux en surface. L'ozone troposphérique est le résultat de la décomposition d'autres gaz dans l'atmosphère. Ces deux GES (H_2O et O_3) sont exclus du champ de la comptabilité carbone.

Le CO_2 est le GES anthropique ayant l'impact le plus important sur le climat compte tenu de sa quantité très importante dans l'atmosphère. La participation des principaux GES anthropiques au réchauffement climatique est la suivante (figure n°10) :

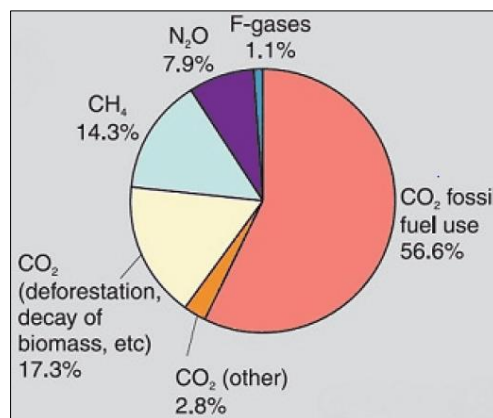


Figure 10 : Répartition des émissions annuelles mondiales de GES anthropiques en 2004 (Source : ADEME, 2013)

Nous constatons que les émissions de CO_2 sont réparties selon 3 origines :

- La combustion des énergies fossiles : pétroles, gaz et charbons (56,6 %)
- Les procédés générant du CO_2 minéral : décarbonatation dans les cimenteries notamment (2,8 %)
- La déforestation et le déstockage de carbone des sols dû à des changements d'affectation des sols (17,3 %)

Les émissions anthropiques de CH_4 et N_2O proviennent à environ 90 % de l'agriculture. Les autres sources d'émissions de ces deux gaz sont : le traitement des déchets, certains procédés industriels, les transports...

En 2014, les divers gaz fluorés représentent 2 % des émissions mondiales (contre 1,1 % en 2004).

1.3.2.2. Potentiel de Réchauffement Global (PRG)

Le Potentiel de Réchauffement Global (PRG) est l'indicateur classique utilisé pour comparer les uns avec les autres, les émissions des différents GES. Le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) compare les gaz à effet de serre entre eux, selon la valeur de leur « pouvoir de réchauffement global ».

Le potentiel de réchauffement global à 100 ans est le rapport entre l'énergie renvoyée vers le sol en 100 ans par 1 kg de gaz et celle que renverrait 1 kg de CO₂. Il dépend des concentrations et des durées de vie des gaz. Par exemple, 1 kg de CH₄ réchauffera autant l'atmosphère que 28 à 30 kg de CO₂ au cours du siècle qui suit leur émission. Si le CO₂ est le gaz qui a le plus petit potentiel de réchauffement global, il est celui qui a contribué le plus au réchauffement climatique depuis 1750, du fait des importantes quantités émises.

Les PRG reflètent les effets comparés à celui du CO₂ des autres GES. Il prend en compte :

- les concentrations des divers gaz à effet de serre déjà présents dans l'atmosphère,
- les cycles naturels des gaz considérés, qui conditionnent leur rythme d'épuration de l'atmosphère, et donc leur "durée de vie" dans l'air.

Ainsi, il peut arriver que le PRG d'un GES varie légèrement dans le temps.

Les temps de vie dans l'atmosphère des principaux GES sont :

- CO₂ : > 2 ans ;
- CH₄ : 12 ans ;
- N₂O : 110 ans ;
- SF₆ : 3 200 ans.
- hydrofluorocarbures : entre 1 et 260 ans ;
- per fluorocarbures : environ 10 000 ans ;

Le tableau n°2 donne les PRG de divers GES publiés dans les rapports de 2007 et 2013 de la GIEC :

Tableau 2 : PRG des divers GES (source : ADEME, 2013)

Classement	Désignation		Formule Chimique	PRG à	PRG à
	Nom 1	Nom 2		100 ans AR4	100 ans AR5
Principaux GES	Dioxyde de Carbone d'origine Fossile		CO2f	1	1
	Méthane d'origine fossile		CH4f	25	30
	Méthane d'origine biogénique		CH4b	25	28
	Protoxyde d'azote		N2O	298	265
	Dioxyde de carbone d'origine biogénique		CO2b	1***	1***
Principaux gaz fluorés purs (hors substances contrôlées par le protocole de Montréal)	Hexafluorure de soufre		SF6	22800	26087
	Tri fluorure d'azote		NF3	17200	17885
	HFC-23	R23	CHF3	14800	13856
	HFC-32	R32	CH2F2	675	817
	HFC-125	R125	CHF2CH3	3500	3691
	HFC-134a	R134a	CH2FCF3	1430	1549
	HFC-143a	R143a	CH3CF3	4470	5508
	HFC-152a	R152a	CH3CHF2	437	176
	HFC-227ea	R227ea	CF3CHCF3	5310	3860
	HFC-43-10mee	R4310mee	CF3CHFCHFCF2CF3	1640	1952
	PFC-14	R143a	CF4	7390	7349
PFC-116	R116	C2F6	12200	12340	

	PFC-218	R218	C3F8	8830	9878
	PFC-318	R318	c-C4F8	10300	10592
	PFC-5-1-14	R5114	C6F14	9300	8780

AR4 : 4ème rapport du GIEC (2007)

AR5 : 5ème rapport du GIEC (2013)

(***) : CO₂ Biogénique

Conclusion

Ce premier chapitre révèle à différentes échelles, la situation qu'entraînent les activités anthropiques plus précisément celles liées au transport, sur l'émission des GES. Les conséquences sont très lourdes et continueront sur ce chemin critique si des mesures d'atténuation ne sont pas prises. Notre contribution dans ce travail est d'apporter des données qui permettront de prendre des décisions qui seront mises en œuvre pour limiter l'émission des GES produits par le secteur des transports dans le Sud du Bénin.

CHAPITRE II : MATERIEL ET

METHODES

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter la méthodologie utilisée pour aborder l'étude du bilan carbone du secteur des transports routiers au Sud du Bénin. Il prend également en compte la présentation du matériel et des outils d'exploitation et d'analyse du Bilan Carbone nécessaires.

2.1. Matériel

2.1.1. Présentation du matériel

2.1.1.1. Parc Automobile

Le premier matériel d'étude est le parc automobile du Bénin. Mais pour réduire le champ de l'étude et mieux circonscrire notre travail, nous avons prélevé un échantillon de 252 véhicules du sud Bénin. Sur cet échantillon de véhicules, ont été faits des tests pour évaluer leurs émissions directes en termes de GES. L'échantillon a été constitué de manière à ce qu'il soit assez représentatif de la population totale de véhicules. En effet, il est composé de toutes les marques de véhicules de tourisme utilisés sur le périmètre d'étude. Chaque marque est représentée dans l'échantillon avec approximativement sa proportion dans l'ensemble du parc automobile au Sud du Bénin.

La quasi-totalité des véhicules de transport routier utilisé au Bénin sont des véhicules d'occasion importés et vendus sur les « parcs automobiles ». Il en existe plusieurs marques dont la plus importante est la marque Toyota. L'année de mise en service de ces véhicules varient de 1994 à 2019 avec une forte proportion de véhicules datant des périodes 1998-1999 et 2002-2008. Le parc automobile roulant béninois est vieux avec un âge moyen de 15 ans.

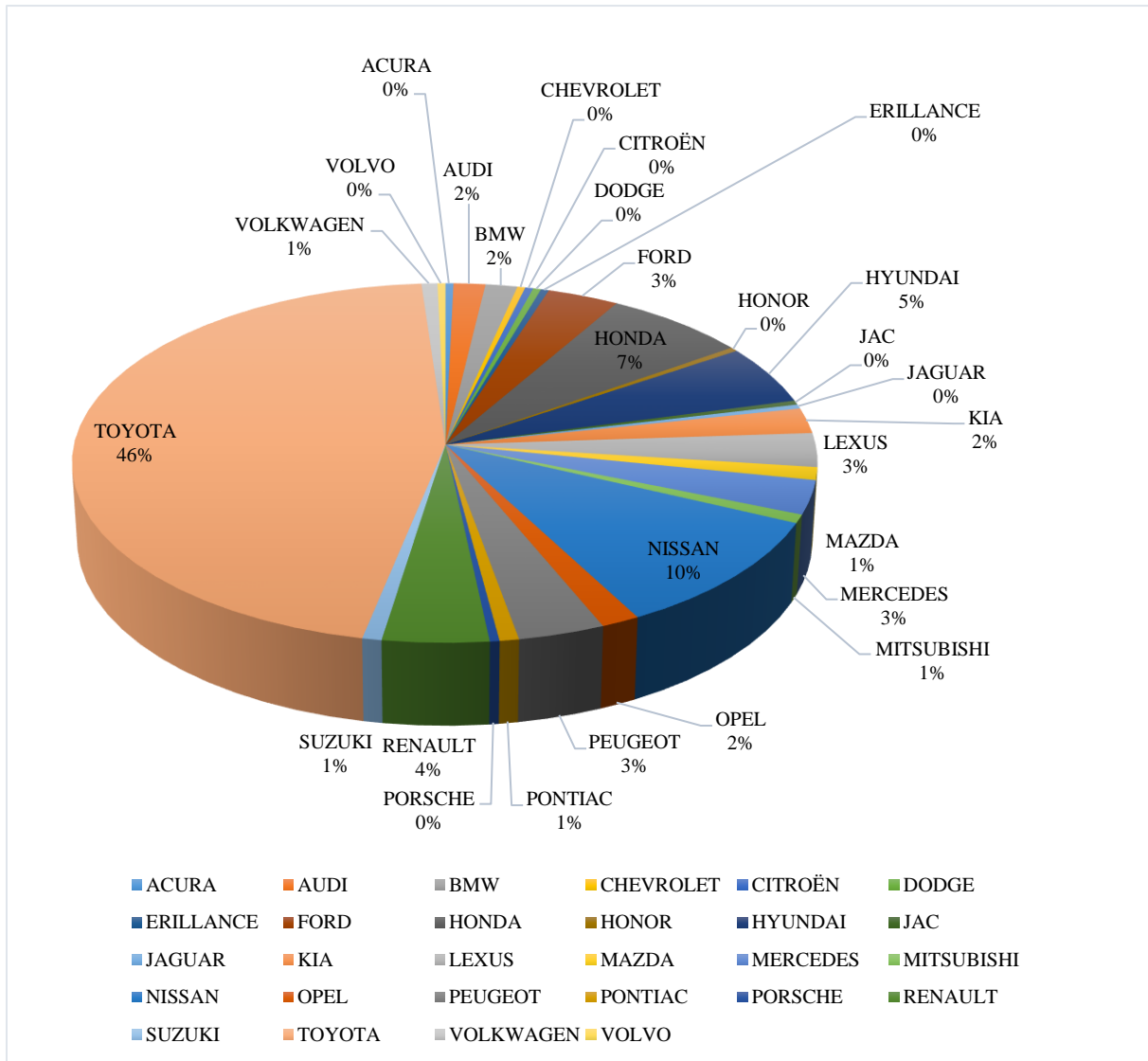


Figure 11 : Représentativité des véhicules dans le parc Béninois

Les mesures sont effectuées au Centre National de Sécurité Routière (CNSR) qui est un centre étatique ayant pour mission « l'étude, la recherche et la mise en œuvre de tous les moyens destinés à accroître la sécurité des usagers de la route, notamment par des mesures de prévention et de lutte contre les accidents de la route ». À cet effet, des tests sont effectués périodiquement sur les véhicules de transport routier dans le but d'évaluer leurs performances mécaniques, thermiques et de confort global. Ces tests sont appelés CTA (Contrôle Technique Automobile). Le CTA est une opération périodique dont l'objectif escompté est de contribuer à la lutte contre le fléau des accidents de la circulation par l'amélioration de l'état mécanique du parc automobile national et sa mise en conformité avec les conditions et les standards de sécurité routière et de protection de l'environnement. Pendant le CTA, les émissions de gaz à

l'échappement des véhicules sont enregistrées. Nous nous servons des résultats du CTA pour l'établissement de notre bilan carbone.

2.1.1.2. Matériel de test de contrôle des gaz d'échappement

Le matériel utilisé pour l'analyse des émissions directes des véhicules est un analyseur multigaz de marque CAPELEC. C'est un système incorporé d'un logiciel et qui est connecté à un ordinateur tel que présenté sur la figure n°12.



Figure 12 : Analyseur Multigaz fixe connecté à un ordinateur (Source : Gath, 2019)

Il est composé d'une sonde qu'on introduit dans le pot d'échappement du véhicule. De ce fait, la fumée passe par le canal échappement sonde pour entrer dans la cellule de mesure par le biais d'un filtre à air.

La cellule de mesure comprend plusieurs capteurs permettant de mesurer les quantités de CO, CO₂, NO_x, et HC contenus dans le gaz d'échappement. Grâce à ces capteurs, la fumée est analysée et les résultats sont envoyés à un ordinateur. Ces résultats sont lus à l'écran sur l'interface du logiciel.

2.1.2. Description de l'analyseur de gaz CAP3201-4GAZ

Branchement extérieur

En branchement extérieur à l'analyseur, on retrouve un tube d'évacuation et une sonde de prélèvement délimité par le poignet de fixation et raccordé à un tube noir.

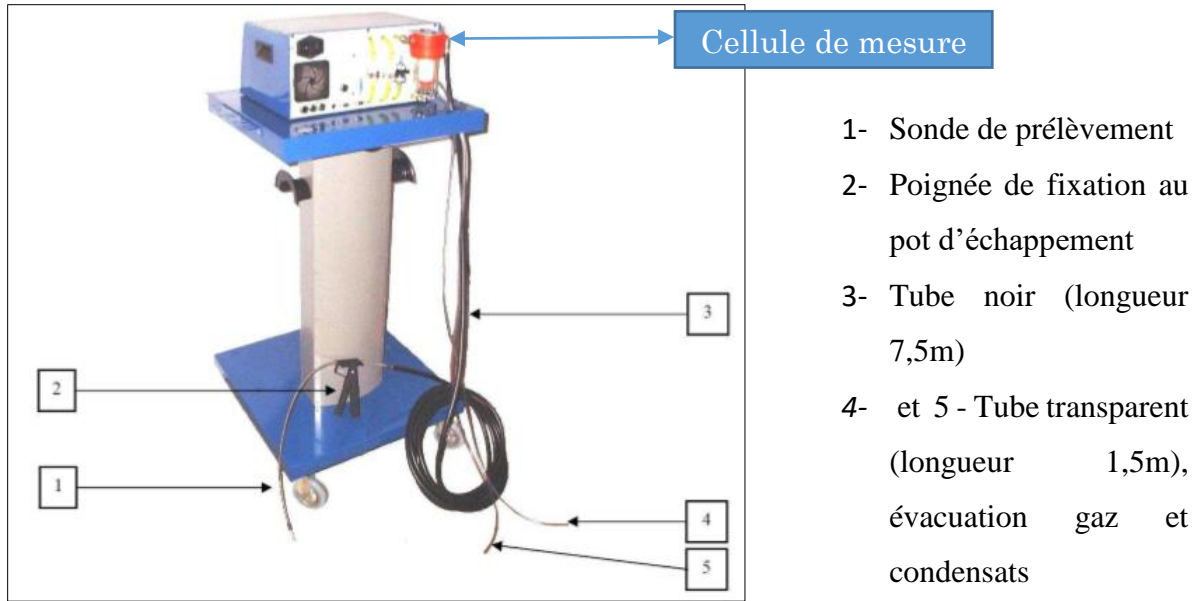


Figure 13 : CAP32/CNSR et éléments connexes (Source : Manuel d'utilisation du CAP32)

L'analyseur peut être équipé d'une imprimante externe, d'un clavier externe, d'une carte de communication OBD, d'une carte pour la mesure du régime moteur à partir de la tension de la batterie.

La cellule de mesure

On y retrouve sur la face avant : l'imprimante thermique, l'écran LCD graphique et un clavier à 5 touches comme ci-dessous présentée.

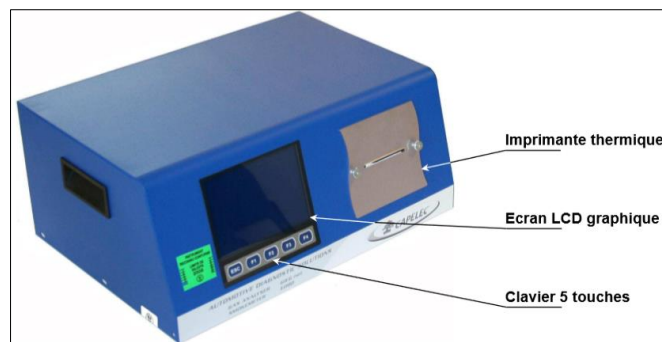


Figure 14 : Face avant annotée de la cellule de mesure

La figure 15 présente la face arrière de la cellule de mesure :

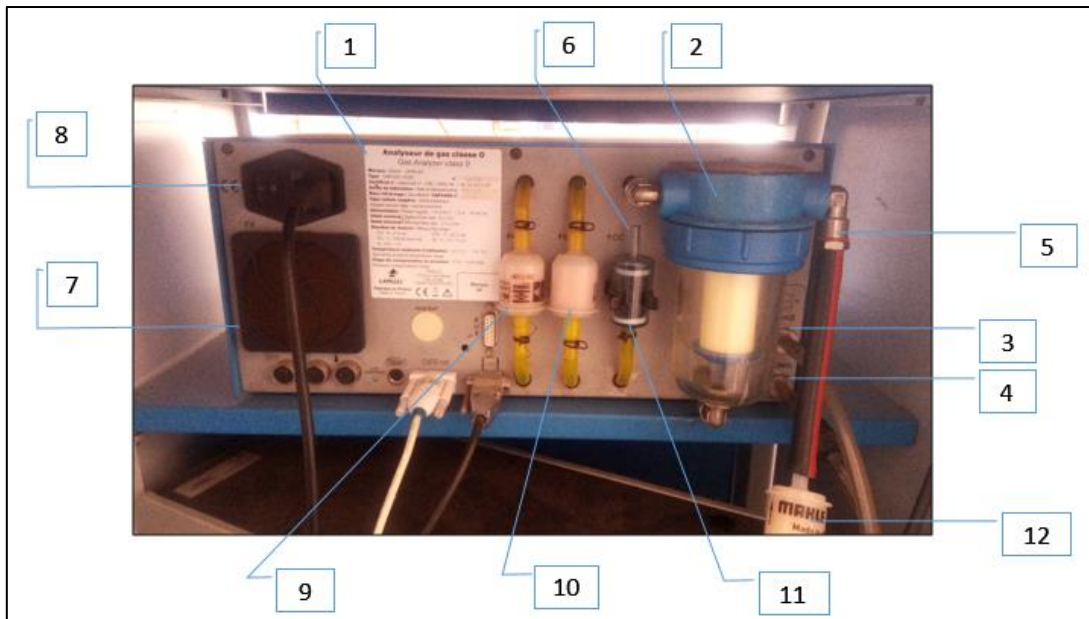


Figure 15 : face arrière de la cellule de mesure (Source : Gath, 2019)

- 1- Plaque signalétique
- 2- Filtre décanteur (**FD**)
- 3- Sortie gaz mesuré (**GAS**)
- 4- Sortie des condensats (**COND**)
- 5- Entrée des gaz à mesurer (**GAS**)
- 6- Entrée air ambiant pour zéro
- 7- Filtre ventilateur (**FV**)
- 8- Secteur, interrupteur 230V
- 9- Filtre protection pompe gaz (**FG**)
- 10- Filtre protection pompe condensats (**FC**)
- 11- Filtre à charbons actifs (**FCC**)
- 12- Filtre à air (monobloc)

L'analyseur CAPELEC de type CAP3201-4GAZ permet de mesurer dans les gaz d'échappement les titres volumiques en monoxyde de carbone (CO), en dioxyde de carbone (CO₂), en hydrocarbure imbrulés (HC) et en oxygène (O₂) rejetés par les véhicules équipés de moteur thermique à quatre temps. Il affiche également le titre volumique en monoxyde de carbone corrigé (CO_{corr}), la température de l'huile en °C, la vitesse de rotation en tr/min et le paramètre lambda, représentant le coefficient de combustion du moteur du véhicule contrôlé.

Les analyseurs multigaz utilisés pendant l'étude fournissent non seulement les taux de démission en CO, NOx, HC mais aussi des données sur le CO₂, l'O₂, la température, le paramètre lambda. De plus, il donne ces résultats à des régimes différents. Ceci justifie amplement la suffisance du matériel utilisé pour la collecte des données relatives aux émissions directes de GES par les véhicules au Bénin.

En dehors de ce matériel de test de contrôle des GES, nous avons beaucoup utilisé la documentation générale de la base carbone de l'ADEME pour évaluer les émissions indirectes de l'activité transport routier. C'est un document qui fournit les informations sur les facteurs d'émissions de GES pour une multitude d'éléments.

2.2. Méthodologie

Le bilan carbone se déroule en plusieurs phases. Selon l'Association Bilan Carbone (ABC), cinq grandes phases sont à distinguer quand on veut réaliser un bilan carbone :

- La nomination d'un pilote et la définition des objectifs
- La définition des périmètres à comptabiliser
- La collecte et l'exploitation des données
- Les plans d'actions de réduction des émissions de GES
- La synthèse de la démarche

La quantification des émissions de GES se trouve être au cœur du Bilan carbone. Les bases de calcul de ces émissions sont définies par l'ADEME.

La comptabilité des émissions des GES se fait par catégories d'émissions ou encore niveaux d'émissions. On parle de scope. Il en existe principalement trois dont la figure suivante fait la synthèse.

2.2.1. Nomination d'un pilote, Définition des objectifs et du périmètre d'étude

Le pilote

La réalisation d'un Bilan Carbone demande en premier lieu un engagement de la direction pour la définition et la documentation des objectifs de l'organisation ainsi, que la nomination d'un porteur de la démarche : le pilote.

Le pilote de ce projet bilan carbone pour le secteur du transport routier dans le sud du Bénin est l'auteur de ce document sous la supervision de l'enseignant-chercheur qui encadre les travaux d'analyse effectués.

Définition des périmètres à comptabiliser et identification des scopes

Le périmètre à comptabiliser prend en compte les véhicules de transport routier fonctionnant à l'essence dans le sud du Bénin.

La scope 1 comprend les émissions générées par la combustion des carburants dans les moteurs des véhicules et des émissions fugitives de gaz frigorigènes fluorés associés à la climatisation du véhicule. Pour évaluer les émissions dues à la combustion des carburants, nous allons utiliser les résultats donnés par l'analyseur CAPELEC qui sont prélevés pour les véhicules ayant fait leur CTA dans la période allant de Juin à Aout 2019.

La scope 2 comprend les émissions liées à la production de l'énergie électrique provenant du réseau qui recharge les batteries des véhicules.

La scope 3 prend en compte les émissions liées à l'amont des carburants, à la fabrication du véhicule, à son importation.

2.2.2. La collecte et l'exploitation des données

Il faut à cette étape recenser l'ensemble des données suivant chaque catégorie du périmètre.

2.2.2.1. Scope 1

Pour la scope 1, la collecte des données s'est faite en mesurant l'émission des GES au niveau des gaz d'échappement des différents véhicules soumis au test CTA. C'est la méthode de l'étude sur banc à rouleau.

La procédure conduisant à l'obtention des données sur le facteur d'émission des GES des véhicules se déroule en quatre étapes.

Etape 1 : Essai de l'appareil

Cela consiste à effectuer de petites opérations manuelles sur l'appareil pour l'étalonner afin de garantir la justesse des résultats en sortie du système. Cela consiste à :

- injecter à l'aide d'un compresseur à air d'une forte pression d'air dans le tube de raccordement et le filtre à air pour éliminer l'eau contenu en son sein
- lancer le chauffage de l'appareil au moment de la première mesure
-

Etape 2 : Présentation du véhicule et introduction des informations dans le système informatique de l'analyseur

- Le véhicule est présenté au poste de contrôle de pollution, le moteur tournant en plein régime (vitesse de 2000trs/min à 3500trs/min)
- Le conducteur présente le livret de bord ou la carte grise sur laquelle sont relevés les informations de remplissage de l'interface d'affichage du logiciel d'analyse :
 - o Année de première mise en service ou mise en circulation ;
 - o Identifiant du propriétaire dudit véhicule ;
 - o Marque du véhicule ;
 - o Nombre de kilomètres parcourus, etc..

Etape 3 : Test de contrôle et analyse de gaz

- o Une fois l'interface de remplissage terminé et validé, une mise à zéro est automatiquement faite afin de débarrasser les cellules des débris de gaz des tests précédemment effectués ;
- o On procède ensuite à l'introduction de la sonde de prélèvement dans le pot d'échappement du véhicule, sur instruction de l'analyseur de gaz puis la validation du début des mesures ;
- o Tout en suivant les instructions affichées par le logiciel de commande, il est demandé aux conducteurs de maintenir son régime accéléré (entre 2500trs/min et 3000trs/min) puis au ralenti (entre 1500trs/min et 2000trs/min). Ces variations de régime permettent de mesurer les émissions au ralenti et en accélération.

L'analyse des gaz est effectuée pour les véhicules mis en service après 1998 c'est-à-dire supposés disposer de pot catalytique. Par opposition, tous les véhicules avant 1998 n'effectuent que la mesure au ralenti simple sur instruction du logiciel de commande.

Le tableau suivant récapitule les informations prises en compte dans la constitution de la base de données pour le bilan carbone.

Tableau 3 : Eléments pour la constitution de la base de données (Source : Gath, 2019)

Paramètres considérés	Mode de lecture	Informations extraites
<ul style="list-style-type: none"> - Date - Marque de véhicule - Année de première mise en Circulation 	<ul style="list-style-type: none"> - Livret de bord ; - Questionnaire - Observation du véhicule 	<ul style="list-style-type: none"> - Elaboration d'une base de données - âge moyen du parc automobile béninois - Performance du véhicule
<ul style="list-style-type: none"> - Kilométrage actuel ; - Date de la dernière vidange ; - Kilométrage retenu lors de la dernière vidange ; - Kilométrage parcouru pour un renouvellement de vidange ; 	<ul style="list-style-type: none"> - Tableau de bord ; - Carnet de vidange ; - Questionnaire ; 	<ul style="list-style-type: none"> - Fréquence d'utilisation du véhicule (km/an) ; - Fréquence de vidange ; - Ratio utilisation/vidange
<ul style="list-style-type: none"> - Lieu de ravitaillement du carburant consommé 	<ul style="list-style-type: none"> - Questionnaire ; 	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluation des taux d'émissions par rapport aux sources d'approvisionnement en carburant
<ul style="list-style-type: none"> - GES émis 	<ul style="list-style-type: none"> - Analyseur de gaz ; 	<ul style="list-style-type: none"> - Taux d'émissions ;

Étape 4 : Interprétation des résultats

- Enregistrement des données puis impression du rapport de test de contrôle une fois l'analyse achevée et les résultats affichés ;

Le calcul suivant est alors réalisé pour chaque GES :

$$\text{Émissions de GES} = \text{masse du GES} \times \text{PRG (GES)}$$

- Interprétation des résultats par rapport à la législation normative en vigueur sur le rapport imprimé, suivie de mention écrite délivrée

- Les plans d'actions de réduction
- La synthèse de la démarche

Les normes en matière d'émissions au Bénin sont mentionnées dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Normes d'émissions des GES des véhicules légers de tourisme
(Source : Darding, 2019)

GES	NO _x	HC	CO
Teneurs (g/km)	0,06	0,1	1
Teneur (gCO _{2eq} /km)	15,9	2,5	1

2.2.2.2. Scope 2

Dans les conditions d'utilisation normale d'un véhicule, Les batteries une fois chargée lors de la fabrication du véhicule ne nécessitent plus un rechargement par apport direct d'électricité. En effet, pendant que le véhicule roule, la batterie est chargée automatiquement par alternateur mis en mouvement grâce à la rotation du vilebrequin. Ainsi, le rechargement de la batterie par l'électricité directe provenant du réseau est un évènement qui ne se produit qu'en cas de panne. Nous ne prenons pas en compte ce cas dans le bilan des émissions de la Scope 2. En effet, nous supposons que nous sommes dans des conditions normales du fonctionnement de la batterie et qu'il n'y a pas de pannes au niveau de cet élément électrique.

2.2.2.3. Scope 3

La Scope 3 correspond aux émissions de GES engendré en amont de la mise en service du véhicule (fabrication du véhicule et son importation) et les émissions engendrées par l'amont du carburant. Les émissions amont des combustibles liquides concernent l'extraction du pétrole brut, le transport de ce dernier des lieux d'extraction, soit par bateau soit par pipe-line, et le raffinage, opération qui est la plus émissive de la chaîne.

- **Production et importation de carburant**

L'échantillon que nous avons eu pour l'étude est uniquement composé de véhicule fonctionnant à l'essence. L'essence utilisée au Bénin doit avoir selon les spécifications, les caractéristiques suivantes :

Tableau 5 : Caractéristiques de l'essence utilisée au Bénin (Source : ADJENIYA, 2013)

indice d'octane	≥ 91
teneur en plomb	$\leq 0,005 \text{ g/l}$
teneur en soufre	$\leq 0,35\% \text{ en poids (3500ppm)}$

Ces caractéristiques correspondent à l'essence E10 utilisé en France dont le facteur d'émissions pour sa production en kilogrammes de CO_{2eq} par litre est de 0,49 (ADEME, 2013).

Le Bénin dépend à 100% de l'extérieur pour sa consommation en produits pétroliers. Le carburant utilisé dans les moteurs des véhicules à essence au Bénin provient de deux sources : le secteur formel et le secteur informel. En 2015, des études ont révélé que 12,69 % de l'essence provenait du secteur formel contre 87,31 % pour le secteur de l'informel (SIE, 2015).

L'importation de carburant par le secteur formel se fait généralement par des sociétés pétrolières agréées telles que Oryx Energies, Puma Energy, Jehovah Nissi Petroleum, etc..., et cela au travers de pétroliers. Les pétroliers desservant le Bénin sont des HANDY PRODUCT dont la taille varie entre 26500 et 68499 tonnes. Ils peuvent transporter jusqu'à 37000 tonnes de carburant.

L'essence informelle provient du Nigéria et est acheminé au Bénin par des transports terrestres.

La documentation de la base carbone fournit des pages 35 à 42 les différentes données permettant d'évaluer les émissions de GES qu'entraînent les différentes étapes conduisant à l'obtention de l'essence. Ces étapes sont entre autres l'extraction et le process, le transport, le raffinage et la distribution de l'essence.

- Fabrication des véhicules et leur importation

Les véhicules ne sont pas fabriqués sur le territoire béninois. Ils sont fabriqués à l'extérieur et de manière générale sont acheminés au Bénin par un type de navire appelé rouliers pouvant supporter jusqu'à 3900 T de chargement.

La fabrication d'un véhicule de PTAC de 3,5 tonnes produit environ 12,1 t CO_{2eq}. La durée de vie moyenne de ce genre de véhicule est estimée à 300.000 km. Ainsi l'émission de GES engendrée par kilomètre par la fabrication de ce genre de véhicule est de 40,3 g CO_{2eq}.

2.2.2.4. Le calcul estimatif de l'émission des GES

Les données sont converties en unité de masse de CO₂ équivalent grâce au PRG. Le CO₂ équivalent (CO_{2eq}) est une unité permettant de comparer le forçage radiatif d'un GES au dioxyde de carbone, calculé à l'aide de la masse d'un GES donné, multipliée par son PRG, fourni par le GIEC (adapté de la norme NF ISO 14064-1:2006) (ABC, 2017). Une fois tous les calculs effectués, nous allons sortir les résultats par scope et faire des études statistiques pour comparer suivant certaines caractéristiques de véhicules, l'importance des émissions de GES. Cela se fera pour les émissions de la Scope 1.

2.2.3. Elaboration de plans d'action et synthèse du bilan carbone

Suite aux résultats du Bilan Carbone, il faut mettre en évidence les postes d'émission sur lesquels on peut agir pour réduire les émissions des GES. Une série de recommandations et un ou des plans d'actions seront rédigés suite à la restitution des résultats d'émission.

Si l'organisation renouvelle sa démarche, l'analyse inclut une comparaison avec l'exercice précédent. Cela peut inclure la détermination des risques et opportunités vis-à-vis des enjeux suivants, selon les besoins et volontés de l'organisation :

- dépendance énergétique ;
- anticipation d'une taxe carbone ;

Des indicateurs permettent le suivi des actions de réduction des émissions. Il s'agit de :

- L'évaluation en amont du plan d'actions ;
- Le suivi annuel des données d'activité pour faciliter le passage à l'action ;

Le résultat d'un Bilan Carbone est la quantification des émissions de GES de l'activité, réparties par scope dans les périmètres considérés, ainsi qu'au moins un plan d'actions proposé en cohérence, et les indicateurs de suivi associés. Le plan d'actions issu du Bilan Carbone comprend au minimum une action d'amélioration de la démarche.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le matériel d'étude utilisé ainsi que les différentes étapes de la méthodologie appliquée pour l'établissement de notre bilan carbone. Les résultats obtenus sont présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons nos résultats obtenus à l'issue de l'étude sur les différentes scopes, grâce à l'application de la méthodologie et exploitation du matériel décrit dans le chapitre précédent. Les résultats sont donnés en premier lieu de manière générale, puis selon certaines spécificités. Les résultats obtenus pour la scope 1 sont confrontés avec les normes en vigueur et des solutions sont proposées pour réduire les émissions de GES dans le secteur des transports routiers au Bénin et à l'échelle mondiale.

3.1. Résultats

3.1.1. Evaluation quantitatives des Emissions directes

Les émissions moyennes des GES dues à la combustion dans le moteur sont de 148,76 g/km avec les répartitions suivantes :

Tableau 6 : Emissions quantitatives des GES en g/km

GES	CO ₂	CO	NO _x	HC
Quantités (g/km)	136,6	11,9	0,13	0,13
Proportion	91,72 %	8%	0,08 %	0,08 %

Le CO₂ est le principal GES émis par la combustion du carburant dans le moteur des véhicules.

En multipliant les quantités de chaque GES par son PRG, on obtient que les émissions de la scope 1 exprimées en g.CO_{2eq}/km s'élèvent en moyenne à 188,3 g.CO_{2eq}/km de GES. La répartition selon chaque GES est la suivante :

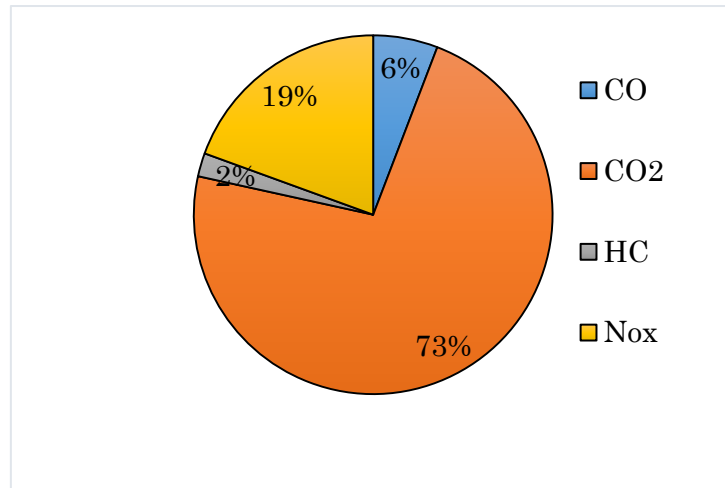


Figure 17 : Répartition qualitative des émissions de GES en gCO_{2eq}/km

Les proportions des GES NOx et HC qui étaient négligeables en g/km sont devenus grands lorsqu'on a fait la conversion en g.CO_{2eq}/km. En effet les valeurs élevées de leur PRG respectifs contribuent à l'importance de leurs apports dans l'ensemble des émissions de GES

Par la suite, nous nous intéressons aux facteurs pouvant influencer les émissions de GES

➤ **l'âge des véhicules**

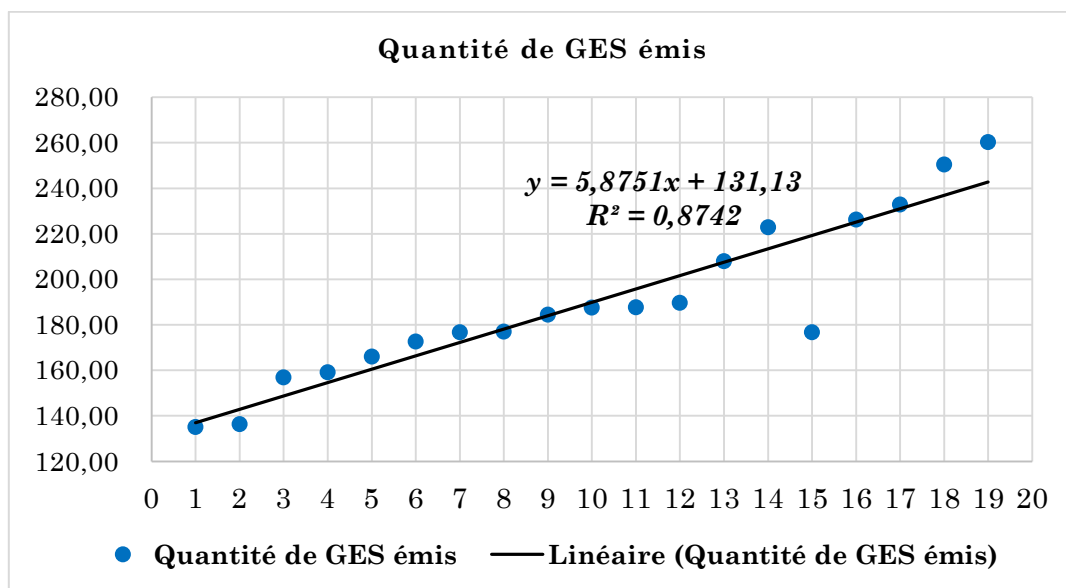


Figure 18 : Emissions quantitative de GES suivant l'âge des véhicules

Selon l'ADEME, en 2017 les émissions de GES d'un véhicule de tourisme doit être inférieure ou égale à 130 gCO_{2eq}/km. Nous avons remarqué que tous ces véhicules, quel que soit l'âge ne respectent pas cette prescription.

Des plus récents aux plus anciens, la quantité des émissions augmentent. Cela nous amène à dire que plus le véhicule est vieux, plus ses émissions de GES sont grandes. Ces émissions sont influencées par le NO_x surtout car c'est pour ce gaz qu'on observe de grandes variations suivant l'âge du véhicule. La variation n'est pas trop remarquable pour le CO₂ mais elle est flagrante pour les autres GES (NO_x, CO, HC). L'âge est un facteur d'influence de l'émission des GES.

➤ **Selon le régime**

Les différents résultats obtenus quand on a fait tourner le moteur de 1500 trs/min à 3000 trs/min sont représentés sur la figure n°18.

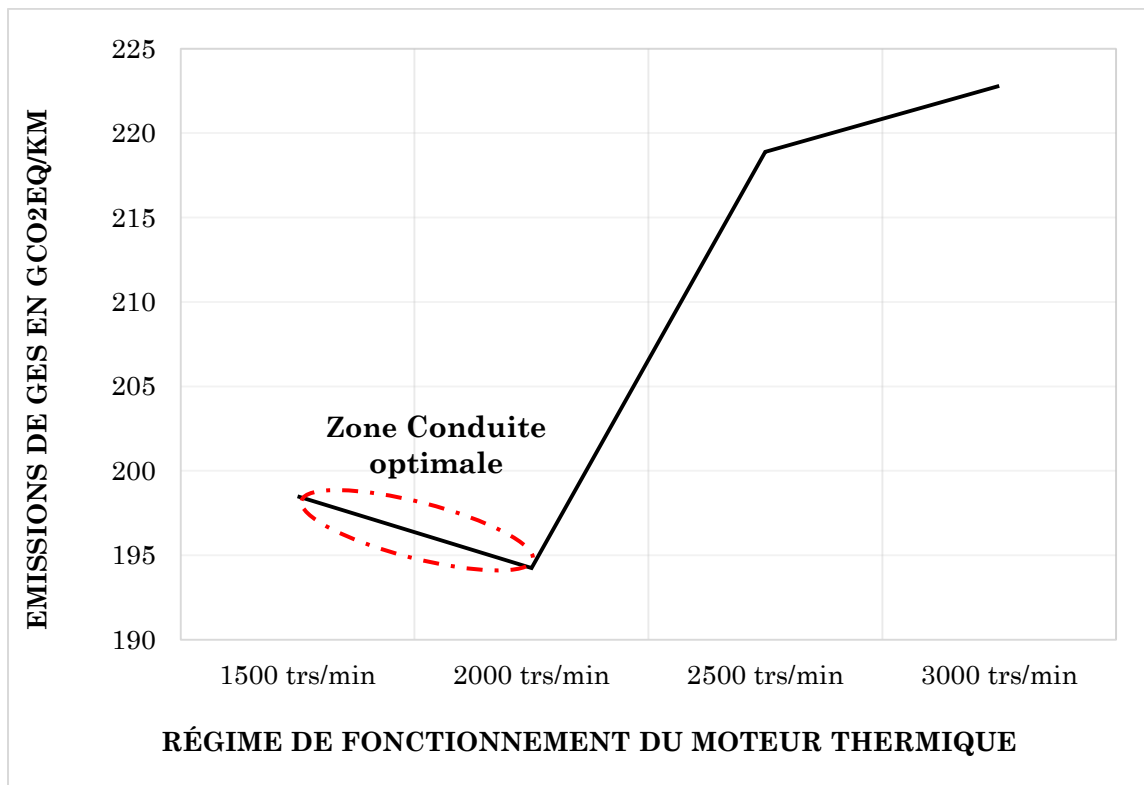


Figure 19 : Emissions de GES suivant le régime de fonctionnement des véhicules

On remarque que les émissions de GES sont plus importantes quand le conducteur accélère.

➤ **Selon la source d’approvisionnement en carburant**

Les deux principales sources d’approvisionnement en essence au Bénin sont les stations services et les ventes au bord des routes connues sous le nom d’informelles. Pour ces deux sources, les émissions sont respectivement de 185,50 et de 192,71 gCO_{2eq}/km réparties comme suit pour chaque GES.

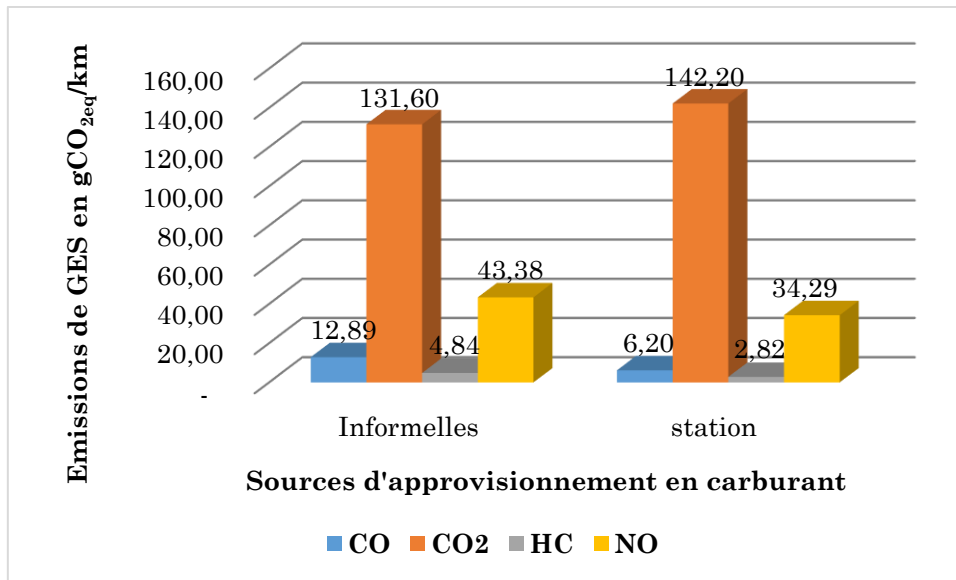


Figure 20 : Emissions de GES suivant la source d’approvisionnement en carburant

L’essence provenant du secteur de l’informel produit plus de NO_x et de HC que celui provenant de la station. Le type d’essence utilisé est un paramètre influençant les émissions de GES. Elles sont plus importantes lorsque la source est informelle.

➤ **Selon les marques**

Tous les véhicules ont des émissions supérieures à la norme. Il est remarqué que les véhicules qui ont un impact plus prononcé sont les véhicules les plus vieux et en même temps les plus représentés dans le parc automobile du Bénin à savoir les marques TOYOTA, HONDA, NISSAN, HYUNDAI et RENAULT, la marque HYUNDAI étant la plus émettrice de GES comme la figure 20 le montre.

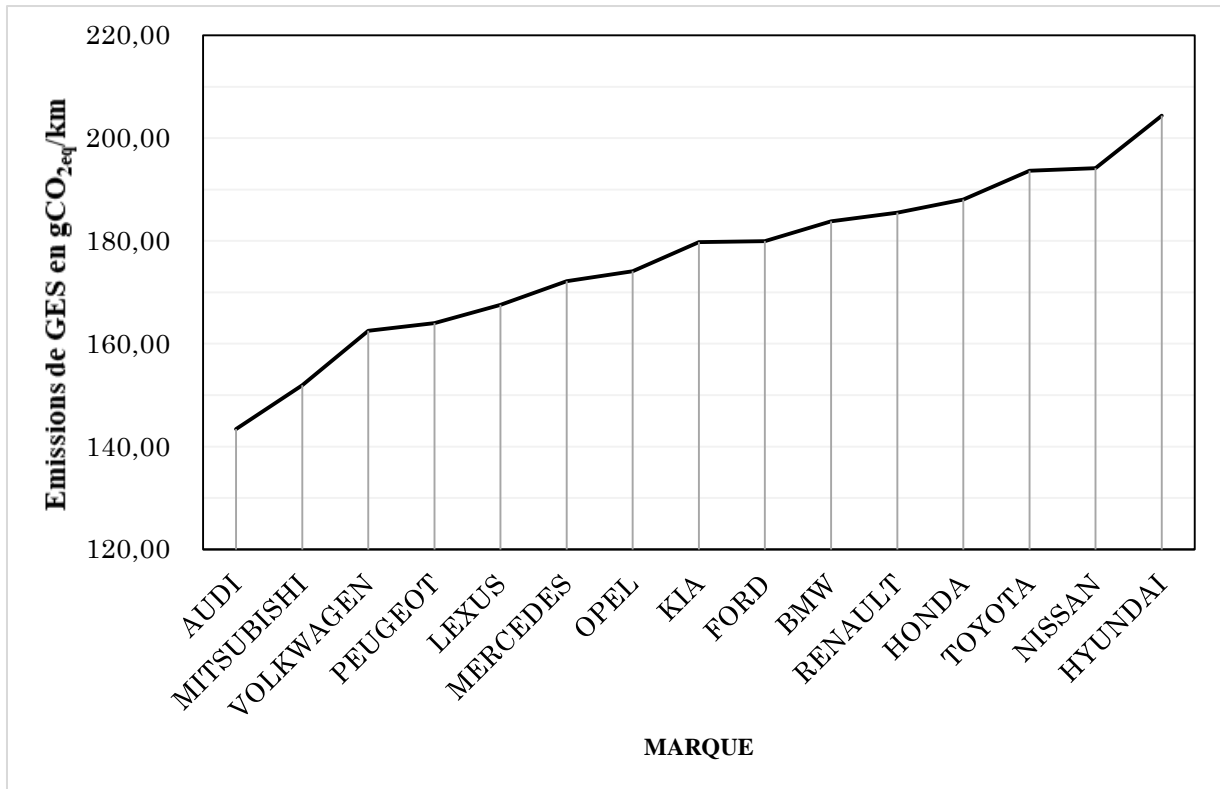


Figure 21 : Emissions des GES suivant les marques

3.1.2. Emissions indirectes (Scope 2 et 3)

Comme cela avait été dit, la scope 2 n'est pratiquement pas représentée dans le contexte des activités des transports. Ainsi, les émissions de GES pour la scope 2 sont égales à 0 gCO₂eq/km.

Pour la scope 3, les émissions sont les suivantes :

- 113,2 gCO₂eq pour tout le procédé permettant l'accès le carburant qui sera utilisé dans le moteur thermique sur en moyenne 1 kilomètre
- 40,3 gCO₂eq par kilomètre pour le procédé de fabrication de la voiture

Ainsi ces émissions de la scope 3 s'élèvent à environ 153,5 gCO₂eq.

3.1.3. Emissions totales

Les émissions totales engendrées par l'activité transport routier dans le sud du Bénin s'élèvent à 341,8 gCO₂ / km. La répartition suivant les scopes est la suivante :

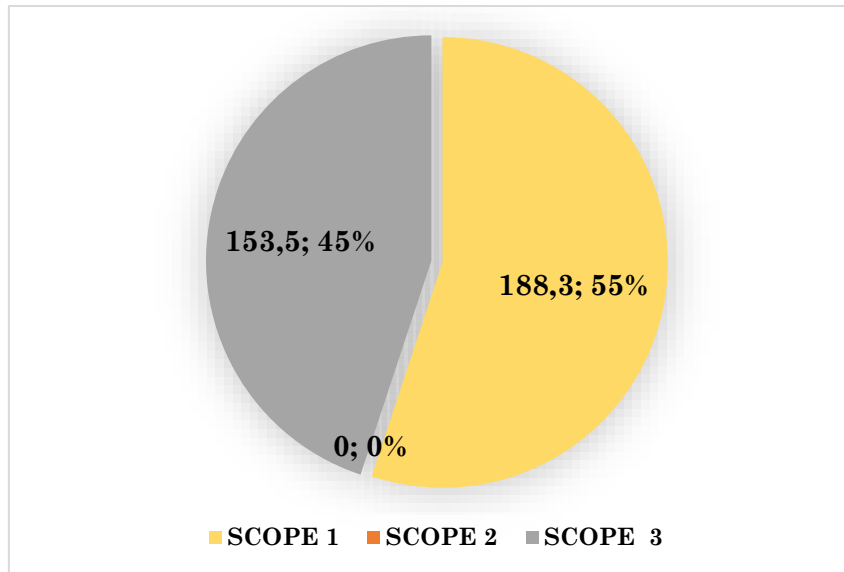


Figure 22 : Répartition des émissions par scopes

On remarque que les émissions directes sont les plus importantes. Elles représentent 55% de l'ensemble des émissions totales alors que les émissions indirectes en représentent 45%. Bien qu'étant inférieures aux émissions directes, les émissions indirectes ne sont pas négligeables car elles sont dans un rapport 0,8. Si elles pouvaient être réduites dans la mesure du possible, les émissions engendrées par le secteur du transport routier diminueraient considérablement.

3.2. Discussions

3.2.1. Interprétation des résultats

Les résultats ont révélé que les émissions directes engendrées par les véhicules de transport routiers s'élèvent à 188,3 g CO_{2eq}/km. Selon les études de l'ADEME, les émissions de GES des véhicules doivent être dans des conditions normales égales à environ 130 gCO_{2eq} par kilomètre (Réseau action climat, 2017). La quasi-totalité des véhicules, ont toutes des émissions supérieures aux normes. L'écart entre cette valeur et celle que nous avons obtenus est très grand, soit un surplus de 58,3 g CO_{2eq}/km. Plusieurs raisons peuvent expliquer ce grand écart. Il s'agit entre autres de la performance énergétique et de la non-conformité des teneurs d'émission de certains GES.

- **Performance énergétique**

On remarque que les émissions de CO₂ s'élèvent à 134 g CO_{2eq} environ. Les émissions du CO₂ à lui seul sont déjà supérieures aux émissions qu'on devrait avoir pour l'ensemble des gaz. Puisque la sortie de CO₂ est proportionnelle à la quantité d'hydrocarbure qui a subi la réaction de combustion, il en ressort que la quantité de carburant est donc élevée lors du dosage (air + carburant). Ainsi, les moteurs thermiques ne se révèlent pas être efficient. Ce manque de performance des moteurs thermiques a des causes subsidiaires. On énumère entre le vieillissement des moteurs, autre l'âge des véhicules et le suivi des normes d'entretien, leur provenance, les caractéristiques du carburant etc...

Nous déduisons alors que plus un véhicule est vieux plus ces émissions sont élevées. Ce constat est justifié car les véhicules sont pour la grande majorité des véhicules d'occasion venus de l'Europe. Des véhicules ayant déjà été utilisés et peut-être même déclassé du parc européen ou autres. Il est normal qu'ils ne soient plus assez efficaces énergétiquement.

Il est normal qu'au fil du temps, les performances énergétiques d'un moteur thermique se réduisent. Il est aussi possible que le manque d'une maintenance rigoureuse sur le véhicule soit à la base de ce défaut de performance énergétique car l'usure prononcée des organes mécaniques au niveau du moteur thermique est le reflet d'une mauvaise pratique de l'entretien.

Le type de moteur est aussi un facteur qui influe sur la quantité des émissions des GES car certaines marques de véhicule émettent plus que d'autres.

- **Teneur élevé des polluants NO_x et HC**

Les GES NO_x et HC ont un apport non négligeable dans l'émission des véhicules. Bien que leurs teneurs paraissent faibles, ils ne sont pas à négliger. En effet, le NO_x a un PRG de 265. Il a donc un impact deux cent soixante-cinq fois plus important que le CO₂. Ce facteur augmente considérablement son apport dans les émissions de GES. De même la teneur moyenne de ce GES suivant les normes environnementales est de 0,06 g/km or nous avons obtenu pour nos véhicules une teneur de 0,13 g/km qui est plus que le double de la valeur limite. Il en est de même du HC qui pour nos véhicules est de 0,13g/km, valeur légèrement supérieure à la limite qui est de 0,1g/km. Cependant, son impact n'est pas aussi important que celui du NO_x. Cela peut être imputable à la qualité du carburant surtout qu'on a remarqué que les émissions sont variantes suivant la source.

Les émissions indirectes du transport routier ne sont pas toujours visibles directement, mais elles ne sont pas à négliger étant donné qu'elles sont presque aussi importantes que les émissions directes.

3.2.3. Plans d'actions de réduction des émissions de GES du secteur du transport routier

Des mesures d'atténuation peuvent être appliquées en vue de diminuer les émissions de GES. Il faut mettre en œuvre des mesures visant à sensibiliser les populations et les décideurs dans l'administration béninoise sur certains facteurs qui permettront de réduire ces émissions. En voici quelques-unes.

- L'âge du véhicule

Plus le véhicule est vieux, plus il est polluant, et cela est dû à la dégradation de son système de contrôle d'émissions. L'avancée de la technologie ces dernières décennies a permis l'essor de véhicules beaucoup plus économiques et polluants moins. Il faut donc éviter l'importation des véhicules d'un âge avancé. En effet, les véhicules utilisés ici sont des véhicules déclassés du parc européen en raison de leurs émissions. Il est normal que ces émissions soient largement au-dessus des normes qui évoluent d'ailleurs à l'amélioration au fil des années compte tenu des technologies qui tendent à rendre les moteurs de plus en plus efficaces. Il serait préférable de prendre des véhicules neufs et de la dernière génération.

- Le carburant utilisé

Les carburants doivent répondre à un certain nombre de spécifications lors de leur formulation mais des différences peuvent subvenir suivant les distributeurs. Ces variations influent sur la formation des polluants. La composition chimique du carburant affecte donc directement la composition des émissions à l'échappement.

La quantité des émissions des véhicules utilisant l'essence de la station est de 185,5 gCO_{2eq}/km alors que pour ceux utilisant l'essence du secteur de l'informel est de 192,7 gCO_{2eq}/km. Ainsi, en utilisant exclusivement l'essence provenant de la station, on pourrait réduire les émissions de GES de d'environ 4%.

Les carburants d'hydrocarbures plus denses, renferment plus de carbone et produiront donc plus de CO₂ pour un volume de carburant donné. L'utilisation de l'essence enrichie à travers l'augmentation de l'indice d'octane, l'usage de l'eau mélangée à l'alcool tout en tenant compte des conditions de température et des alternatives aux

combustibles du transport tels que le gaz naturel comprimé (GNC), le gaz pétrole liquéfié (GPL), le méthanol et l'éthanol et le biodiesel produit à partir du Jatropha peuvent aussi contribuer à la réduction des émissions de GES.

On pourrait essayer de trouver les moyens pour un meilleur raffinage du pétrole provenant du Nigéria de sorte qu'il puisse présenter les meilleures caractéristiques possibles, et contribuer à la réduction de l'émission des GES.

- **L'entretien du véhicule**

Des actions à faible coût comme l'entretien approprié et le service complet sur les véhicules aideront tout aussi bien à réduire les émissions de GES. Un entretien régulier et efficace est bénéfique pour tous les véhicules. Dans une étude de l'entretien des véhicules, il est constaté que plus de 60% des véhicules avaient une moyenne de 5% d'amélioration de l'économie de carburant après l'entretien (Trépanier, 2017). L'entretien du véhicule peut améliorer l'efficacité du carburant en diminuant la résistance de frottement particulière et donc en augmentant l'efficacité thermodynamique.

- **La conduite (régime de ralenti/accélééré)**

Le mode de conduite a une incidence directe sur les émissions de GES. A 2000 trs/min les véhicules émettent en moyenne 194,5 gCO_{2eq}/km et à 3000 trs/min, ils émettent 218,89 gCO_{2eq}/km soit une augmentation de 13%. Avoir une conduite pondérée pourrait permettre de réduire les émissions de GES. Les accélérations rapides, les freinages fréquents, les faibles vitesses de longue durée peuvent augmenter la consommation de carburant jusqu'à 25%. Lorsqu'on compare la consommation de carburant pendant une conduite agressive et une conduite calme et pondéré, on remarque jusqu'à 40% de différence dans la consommation de carburant. (Trépanier, 2017)

Par ailleurs, la transmission est le moyen de couplage entre le moteur et les roues du véhicule. Elle occasionne des pertes d'énergie et influence donc la consommation du carburant et par conséquent des GES. Les deux grands types de transmission sont les transmissions à embrayage et les transmissions automatiques. Avec les systèmes de transmissions automatiques, le changement de vitesse manuelle est éliminé et le moteur travaille dans la gamme optimale de tours par minutes. On a une économie de carburant. De même, d'après Stephen Boucher, le bon gonflage des pneus peut permettre de réduire la consommation de carburant de 10%.

Aussi, le fonctionnement de la climatisation fait consommer beaucoup de carburant au moteur. La climatisation automobile entraîne une surconsommation de carburant et donc une augmentation de l'émission de GES. Des études réalisées par (Barbusse, 1998) montrent une augmentation de l'ordre de 3,1 l aux 100km autant bien pour les moteurs à essence que pour les moteurs diesel. En Inde, 19,4% de la consommation de carburant est occasionnée par l'utilisation de la climatisation et aux Etats-Unis, environ 57,6 mg de CO₂ sont émis par la climatisation automobile. Il faut réduire au maximum l'utilisation de la climatisation.

Par rapport aux émissions indirectes, la question de leur réduction n'est pas encore à notre échelle puisque nous n'avons aucune industrie de production de véhicule et de raffinerie du pétrole.

Mais on pourrait commencer à avoir une attitude écologique en réduisant au nécessaire l'achat des véhicules et donc leur production. Il faudra réduire l'utilisation des véhicules en utilisant le vélo, la trottinette ou en marchant quand il s'agit de petites distances.

3.3. Perspectives et recommandation

3.3.1. Autres actions de réduction des émissions de GES

En dehors des facteurs que notre étude nous a permis de faire ressortir comme influent sur les émissions des GES, il en existe d'autres pour lesquelles des actions peuvent être mise en place :

- le poids du véhicule

Le poids joue un rôle très important en ce qui concerne les émissions de GES. En 2007, une étude réalisée par le Massachusetts Institute of Technology (MIT) a estimé que d'ici 2035, une réduction de 35% de la consommation de carburant serait observée, accréditée de la diminution de 20% des poids des véhicules à leur fabrication (Trépanier, 2017). En attendant, l'utilisation de véhicules légers spécialement en ville peut contribuer à la réduction de l'émission des GES. La population devrait être sensibilisée sur l'achat de véhicules moins lourds.

- La cylindrée du moteur

La cylindrée est le volume total de tous les cylindres. Elle est exprimée en litres. Plus la cylindrée est importante, plus le véhicule est puissant et plus il émet de GES. Par

ailleurs, il faut aussi essayer de réduire les démarrages à froid du moteur et l'utilisation du véhicule quand la vitesse du vent à l'extérieur est élevée.

- L'aérodynamisme

Le carburant peut être économisé si certains dispositifs (déflecteurs) sont installés sur les véhicules et si des ajustements sont faits sur les camions et les remorques (rétroviseurs, pare-chocs et pare-soleils aérodynamiques, etc...) pour optimiser leur aérodynamisme. Des véhicules beaucoup plus aérodynamiques devraient être à l'avenir importés.

- Type et état de la chaussée

Plus une chaussée est rigide, moins le véhicule doit forcer et on a moins d'émissions de GES. Les chaussées les plus rigides sont celles en béton classique et à dalle épaisse. Moins une route est lisse, plus les émissions de GES augmentent. En améliorant l'état de nos routes, nous pouvons contribuer à la réduction des émissions de GES.

Il faut aussi penser à l'installation obligatoire d'équipements dépolluants tels les convertisseurs catalytiques dans les tuyaux d'échappement des véhicules, la mise en place d'une législation concernant les émissions des tuyaux d'échappement, l'amélioration de l'état des routes, les désenclavements des réseaux routiers doivent être pris en compte.

- La voiture électrique

En Europe et partout dans les pays développés, la voiture électrique gagne du terrain. En effet, elle fonctionne avec de l'électricité qui alimente un moteur électrique pour la faire rouler. Cependant les émissions liées à sa conception sont assez importantes. Les analyses de cycle de vie récentes montrent que la part relative des émissions de CO₂ liées à l'utilisation des véhicules a tendance à décroître dans le total des émissions de CO₂, tandis que la part relative de la production des véhicules a tendance à augmenter, notamment avec les véhicules électriques (Réseau Action Climat, 2017)

3.3.2. Limites du présent Bilan Carbone et perspectives d'améliorations

Le bilan carbone présente toujours des limites. En effet, il n'est pas toujours évident de prendre en compte toutes les informations dans l'établissement de la base de données du bilan carbone. Et cela surtout à cause de la définition du périmètre et des éléments à prendre en compte dans chaque scope.

Pour la Scope 1, compte tenu d'un défaut du suivi du kilométrage de la majorité des conducteurs, il a manqué des informations fiables sur le nombre de kilomètres parcouru annuellement par un véhicule. Cette information aurait permis de quantifier annuellement les émissions annuelles de GES par les véhicules. De même, la période des tests n'a pas été assez longue pour le faire sur un échantillon plus important. Les résultats obtenus ne sont donc pas à la valeur près, mais représentent une approximation de ce qui aurait pu être obtenu avec l'ensemble des véhicules.

Aussi, il n'y a pas eu des expériences à notre niveau pour les informations relatives aux scopes 2 et 3. Pour ces dernières, il n'y a pas eu un tri, car les informations ont été prises de manière générale et sur les valeurs standards de la Base Carbone.

Des informations utiles mais non indispensable au bilan carbone tel que les émissions dues au rébus des véhicules du secteur des transports routiers n'ont pas pu être prise en compte. Cependant, nous admettons que les résultats obtenus sont suffisamment représentatif des émissions engendrées par l'activité transport routier dans le périmètre défini.

Le bilan carbone est évolutif. Pour améliorer les résultats d'une prochaine campagne dans ce sens, il faudrait étendre la campagne sur une durée d'au moins un an, permettant de recueillir un échantillon plus important et plus d'informations à analyser. Il faut aussi réaliser cette étude chaque année pour voir comment évolue les émissions de GES suite aux plans d'actions proposés pour leur réduction. Nous proposons aussi d'étudier, en dehors de ceux étudiés dans ce rapport, d'autres paramètres pouvant influencer les quantités d'émission des GES afin d'avoir des chiffres clés en ce qui concerne le Bénin. Il faudra aussi lors de chaque campagne mettre en place une stratégie permettant d'évaluer le kilométrage annuel moyen de chaque véhicule.

Conclusion

Le bilan carbone a révélé que l'émission de GES de tous les véhicules au Bénin est largement au-dessus des valeurs limites. Il est important d'appliquer les mesures qui contribueront à réduire surtout les émissions de la scope 1. De même le bilan carbone doit s'élargir à un périmètre plus grand pour une appréciation plus évoluée des émissions de GES au Bénin.

Conclusion Générale

L'explosion du trafic routier au Bénin comme partout ailleurs n'est pas sans inconvénients sur l'environnement. Pour un kilomètre parcouru, 188,3 g CO_{2eq} en moyenne sont émis de manière directe dans l'atmosphère par un véhicule fonctionnant avec un moteur thermique à essence. Cette valeur est largement au-dessus de 130 g.CO_{2eq} /km qui représente la valeur conventionnelle attendue pour de tels moteurs. Les raisons qui expliquent cet écart sont les problèmes liés à la performance énergétique des moteurs, la composition des carburants, etc....De même, les sources indirectes d'émissions de GES par les véhicules ne sont pas négligeables. Les procédés de fabrication du véhicule ainsi que du carburant nécessaire pour son fonctionnement ont nécessité des émissions importantes de GES dans l'atmosphère statuant les Scopes 2 et 3 à une valeur d'environ 157,3 gCO_{2eq}.

Evaluer l'impact carbone de l'activité transport routier au Bénin, nous situe par rapport aux efforts à mener dans la perspective de réduire l'émission des gaz à effet de serre et lutter contre le réchauffement climatique. Tel que les résultats le révèlent, ces efforts ne sont pas des moindres. L'on ne pourrait éliminer ces émissions, mais il est possible de les réduire à travers des actions autant bien collectives qu'individuelles. Par ailleurs, les données d'analyse n'ont été disponibles que pour les véhicules à quatre roues. Les engins à deux roues représentent un effectif bien plus important pour lequel l'impact carbone devrait être évalué aussi, de même que les autres types de véhicules de transport routier.

Références Bibliographiques

- ☞ ADEME, 2014, Documentation des facteurs d'émissions de la Base Carbone,
- ☞ ADEME, 2016, Information CO2 des prestations de transports, Application de l'article L1431-3 du code des transports, Guide méthodologique, 36 p
- ☞ ADEME, 2017, Information GES des prestations de transport, Application de l'article L. 1431-3 du code des transports, Guide méthodologique, Version actualisée suite à l'article 67 de la loi n° 2015-992
- ☞ ADEME, 2012, élaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à l'horizon 2012 et 2020
- ☞ ADEME-INRA, 2010, ETUDE DE CAS ADEME-INRA Impact carbone de régimes alimentaires différenciés selon leur qualité nutritionnelle : une étude basée sur des données françaises, 59p
- ☞ Adjeniya A., Les produits pétroliers en République du Bénin, 13p, Direction Générale de l'Industrie Minière et Pétrolière, Ministère de l'Energie de l'Eau et des Mines, 13 p.
- ☞ Alary R., Donati J., Viellard H., 1994, La pollution automobile à Paris influence du trafic et des conditions météorologiques, The Science of the total environment 169, p 53-61
- ☞ André M., Hassel D., Hickman A.J. et Joumard R., 1993, Cycles de conduite réalistes pour la mesure des missions de polluants et consommation des véhicules légers sur bancs à rouleaux, The Science of the total environment 134, p 171-187
- ☞ André M., Olivier D., Pruvost C., 1994 Impact de l'amélioration de la régulation du trafic sur la consommation d'énergie et les émissions de polluants des véhicules légers, the Science of the total environment 169, p 273-282
- ☞ Association Bilan Carbone (ABC), 2017, Guide méthodologique du bilan carbone V8, Objectifs et principes de comptabilisation, Aout 2017, France, pp 40
- ☞ Barbier C., Couturier C., Pourouchottamin P., Cayla J-M, Sylvestre M., Pharabod I., 2019, « L'empreinte énergétique et carbone de l'alimentation en

France », Club Ingénierie Prospective Energie et Environnement, Paris, IDDRI, 24p.

- ☞ Barbusse S., Clodic D., J.P. Roumegoux, 1998, Climatization mobile, Energie et environnement, Recherche Transport Sécurité, 16p
- ☞ Batho D., Cham C., Lechevin B. et Savy M., 2016, Transport et changement climatique Pour une mobilité décarbonée, Document présenté à l'occasion du débat organisé par TDIE le 17 janvier 2017
- ☞ Belymam H. & Al, 2018, Bilan carbone d'une unité d'hémodialyse au Maroc, Communications orales / Néphrologie & Thérapeutique 14, p 247-277, doi.org/10.1016/j.nephro.2018.07.021
- ☞ Berthoud F., Bzeznik B., Gibelin N., Laurens M., Bonamy C., et al., 2020, Estimation de l'empreinte carbone d'une heure.coeur de calcul. [Rapport de recherche] UGA - Université Grenoble Alpes; CNRS; INP Grenoble; INRIA. 2020. hal-02549565v4
- ☞ Bonnafous A., Raux C., Fricker E., 2016, L'effet de serre et les transports. Les potentialités des permis d'émissions négociables. [Rapport de recherche] Conseil National des Transports (CNT). pp.117. halshs-01406036
- ☞ Caplain I., 2005, Mesure des émissions polluantes automobiles – Application à la modélisation eulérienne 3D de la formation des oxydants photochimiques dans la troposphère, Université de Sciences et Technologies de Lille, Thèse de doctorat en « Structure et dynamique des systèmes réactifs », 216p
- ☞ Cernuschi S. & al., 1994, Modal analysis of vehicle emission factors, The Science of the total environment 169, p 175-183
- ☞ Climate Chance, 2018, Transport : l'action sectorielle, Observatoire Mondial De L'action Climatique Non-Étatique, Novembre 2018, pp 121
- ☞ Colella W.G., Jacobson M.Z., Golden D.M., 2005, Switching to a U.S. hydrogen fuel cell vehicle fleet: The resultant change in emissions, energy use, and greenhouse gases, Journal of Power Sources 150 (2005) 150–181
- ☞ Dablanc L., Rakotonarivo D., 2010, The impacts of logistics sprawl: How does the location of parcel transport terminals affect the energy efficiency of goods' movements in Paris and what can we do about it?, Procedia Social and Behavioral Sciences 2, p 6087–6096

- ☐ da Silva G & Thibault J-P., 2008, Cycles thermodynamiques des machines thermiques : Etude de la combustion, Grenoble Institut Polytechnique. Hal Id : cel 00556977, <https://cel.archives-ouvertes.fr/cel-00556977>, pp78-88.
- ☐ Declerck L., 2016, Émissions de Gaz à Effet de Serre des deux-roues, voitures particulières et bus – horizon 2030, Atmo Poitou-Charentes, France, pp 63
- ☐ Dobruszkes F. & Marissal P., 2002, Réflexions sur l'usage des modèles dans les études de transport et les sciences sociales, Recherche transports sécurité N°74, Bruxelles, 24p
- ☐ Francheti & Al., 2012, Definitions of Carbon footprint, analysis and related concepts, 22p,
- ☐ Gath C., 2019, Analyse des gaz d'échappement des moteurs à combustion interne à quatre (04) temps : Cas des véhicules contrôlés au CNSR/BENIN, Mémoire de Licence Professionnelle en Aménagement et protection de l'Environnement, Université d'Abomey-Calavi, Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi.
- ☐ Gratton C. & Côté G., 2014, inventaire 2012 des émissions de gaz à effet de serre, Centre régional de l'environnement de Lanaudière, Canada, 32p
- ☐ Guendehou S. & al., 2019, rapport national d'inventaire de gaz à effet de serre du Benin, premier rapport biennal actualisé du Benin à la Convention Cadre Des Nations Unies Sur Les Changements Climatiques, Novembre 2019, 200p
- ☐ Guinee, J. B., H. Reinout, G. Huppes, A. Zamagni, P. Masoni, R. Buonamici, T. Ekvall, and T. Rydberg. 2011. Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. *Environmental Science and Technology* 45(1):90–96.
- ☐ Hugrel C. et Joumard R., 2006, Directives et facteurs agrégés d'émission des véhicules routiers en France de 1970 à 2025. hal-00916989
- ☐ Institute for climates economics : Chiffres clés du climat France, Europe et Monde, ÉDITION 2019
- ☐ Joumard R., 2003, Les émissions de polluants oscillent entre progrès techniques et explosion du trafic. *La Revue Durable*, pp.30-33. hal-01253778
- ☐ Joumard R., Vidon R., Pruvost C., Tassel P., De Soete G., 1994, Evolution des émissions de polluants des voitures particules lors du départ à froid, *The Science of the total environment* 169, p 185-193

- ☞ Khiar D., 2007, Modélisation et commande d'un moteur thermique à allumage commandé. Automatique / Robotique. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, Français. 170p. Hal [fftel00156791f](https://hal.archives-ouvertes.fr/fftel00156791f),
- ☞ Kim H., McMillan C., Keoleian G., and S. Skerlos, 2010, Greenhouse Gas Emissions Payback for Lightweighted Vehicles Using Aluminum and High-Strength Steel, Yale University Journal of industrial ecology, volume 14, number 6, DOI: [10.1111/j.1530-9290.2010.00283.x](https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2010.00283.x)
- ☞ Leblond V. & al, 2019, inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2017 et leur évolution depuis 1990, Québec, ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction générale de la réglementation carbone et des données d'émission, 44 p
- ☞ Mineralinfo, 2019, Le portail français des ressources minérales non énergétiques, 2019.
- ☞ Morillon V., 2005, Le trafic illicite des produits pétroliers entre le Bénin et le Nigéria : vice ou vertu pour l'économie béninoise ?
- ☞ Oudot, J. (1979). Le bilan du carbone dans une expérience de biodegradation bactérienne d'un pétrole brut. Environmental Pollution (1970), 20(3), 177–187. doi:[10.1016/0013-9327\(79\)90003-x](https://doi.org/10.1016/0013-9327(79)90003-x)
- ☞ Perry R., L. Gee, 1994, Vehicle emissions in relation to fuel composition, The Science of the total environment 169, p 149-156
- ☞ Pornet P., Beaubestre C., Courtois Y., & al., 1994, Impact des conditions de conduite sur l'efficacité des pots catalytiques de véhicules à essence et diesel, The Science of the total environment 169, p 7-15
- ☞ Réseau Action Climat, 2017, Réduire les émissions indirectes du secteur automobile, Septembre 2017, Paris, France
- ☞ Roumegoux J.P., 1995, Calcul des émissions unitaires de polluants des véhicules utilitaires, The Science of the total environment, p 205-211
- ☞ Savy M., Le fret mondial et le changement climatique : perspectives et marges de progrès
- ☞ Stratégies de réduction des gaz à effet de serre émanant du transport routier : Méthodes d'analyse, OCDE 2020
- ☞ Tajjiou Rabhioui N., 2013, Bilan des émissions de gaz à effets de serres selon la méthode « Bilan Carbone ® », Direction Interdépartementale des Routes Nord, Septembre 2013, France, 26p

- ☐ Teissier O., Meunier L., 2008, Scénarios de forte réduction des émissions de gaz à effet de serre dans les transports et les bâtiments à l'horizon 2050, SESP, 2007, CDAT
- ☐ Trépanier M. et Coelho C., 2017, Facteurs et méthodes de calcul d'émissions de gaz à effet de serre, Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'Entreprise, la Logistique et le Transport (CIRRELT) et Département d'opérations et systèmes de décision, 2325 de la Terrasse, Université de Laval, Québec, Canada G1V 0A6
- ☐ Vogt-Schilb A., 2013, Enjeux économiques et énergétiques autour des véhicules électrifiés. Master. ENPC, 2013. cel-00797596

ANNEXES

Tableau 7 : Tableau indiquant le PCI des combustibles fossiles dans la base carbone

Combustibles liquides	Recommandation France		Recommandation Europe	
	GJ/T	Source	GJ/T	Source
Pétrole Brut	42	OMINEA	42,3	Décision 2007/589/CE
Fioul domestique	42	ETS + OMINEA	43	Directive 2009/28 CE
Fioul lourd	40	ETS + OMINEA	40	OMINEA
Combustible haute viscosité (CHV)	39,2	ETS + OMINEA		
Essence	44	OMINEA	43	Directive 2009/28 CE
Gasoil	42	OMINEA	43	Directive 2009/28 CE
Butane	45,6	CFBP 114	47,3	Décision 2007/589/CE
Propane	46	CFBP	47,3	Décision 2007/589/CE
GPL	46	ETS + OMINEA		
Carbureacteur jet B et essence aviation (AvGas)	44	OMINEA	44,3	Decision 2009/339/CE
Essence aviation	44	OMINEA	44,3	Decision 2009/339/CE
Kérosène (jet A et A1)	44	OMINEA	44,1	Decision 2009/339/CE
Naphta	45	ETS + OMINEA	44,5	Décision 2007/589/CE
Huiles de schistes	36	ETS + OMINEA	38,1	Décision 2007/589/CE
Bitumes	40,2	OMINEA	40,2	Décision 2007/589/CE
Lubrifiants	40,2	ETS + OMINEA		
White-spirit	41,9	ETS + OMINEA		
Autres produits pétroliers	40,2	ETS + OMINEA		

Tableau 8 : Tableau indiquant la masse volumique de certains carburants dans la base carbone

Combustibles solides	kg/m ³	Source
Pétrole Brut	900	Hypothèse Ademe
Fioul domestique	845	circulaire n°9501 du 28 déc 2004 150
Fioul lourd	900	Hypothèse Ademe
Essence	755	circulaire n°9501 du 28 déc 2004
Gasoil	845	circulaire n°9501 du 28 déc 2004
Butane	538	Directive 1999/100/CE du 15 décembre 1999 121
Propane	538	Directive 1999/100/CE du 15 décembre 1999
GPL	538	Directive 1999/100/CE du 15 décembre 1999
Carbureacteur jet B et essence aviation (AvGas)	800	circulaire n°9501 du 28 déc 2004
Essence aviation	800	circulaire n°9501 du 28 déc 2004
Kérosène (jet A et A1)	800	circulaire n°9501 du 28 déc 2004

Tableau 9 : capture indiquant Facteur d'émission de l'essence dans la base carbone

Combustible	t de gaz par GJ PCI								TOTAL (kgCO _{2e} / GJ PCI)
	Extraction et process		Transport		Raffinage		Distribution		
	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	
Pétrole brut	4,42	0,037	0,90						6,2
Fioul domestique (FOD)	4,42	0,037	0,90		8,32	0,012	1,00		15,9
Fioul lourd (FOL)	4,42	0,037	0,90		5,13		1,03		12,4
Essence pure	4,34	0,036	0,90		6,78	0,010	1,00		14,2
Diesel / gazole pur	4,42	0,037	0,90		8,32	0,012	1,00		15,9
Butane	2,96	0,014	0,95	0,082	2,62	0,004	1,14		10,2
Propane	2,93	0,013	0,94	0,082	2,59	0,004	1,13		10,1
Kérosène (jet A ou A1)	4,42	0,037	0,90		8,32	0,012			14,9
Carburéacteur large coupe (jet B)	4,42	0,037	0,90		8,32	0,012			14,9
Essence aviation (AvGas)	4,42	0,037	0,90		8,32	0,012			14,9
bitume	2,96		2,52		1,56		1,03		8,1
Naphta	4,22	0,036	0,90		4,21	0,006	1,00		11,4
Huile de schiste	126,31						1,00		127,3

Tableau 10 : Sources d'approvisionnement des divers carburants

	Pétrole brut	Fuel oil	Gasoil	Pétrole lampant	Essence	Gaz butane	Jet A1	PetCoke
	ktep	ktep	ktep	ktep	ktep	ktep	ktep	ktep
Importations formelles	0,00	253,08	446,40	5,01	182,15	99,72	460,21	20,70
Importations non formelles	0,00	0,00	614,51	19,38	1 252,73	0,00	0,00	0,00
Total	0,00	253,08	1 060,91	24,40	1 434,88	99,72	460,21	20,70

(Sources : SIE 2015)

Sommaire

Dédicace.....	i
Remerciements.....	ii
Sommaire.....	Erreur ! Signet non défini.
Résumé	iv
Abstract	v
Liste des tableaux	vi
Liste des figures	vii
Nomenclature	ix
Sigles et abréviations	ix
Introduction Générale.....	1
CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
Introduction	3
1.1. Enjeux liés à l'émission de GES par le secteur des transports.....	3
1.1.1. Effet de serre et le changement climatique.....	3
1.1.2. Effet de serre et les transports à l'échelle internationale.....	7
1.1.3. Gaz à effet de serre et transports au Bénin	8
1.2. Emission de GES par les véhicules.....	11
1.2.1. Fonctionnement d'un moteur à combustion interne	12
Combustion	14
1.3. Bilan Carbone	17
1.3.1. Définition et Synthèse sur le Bilan carbone.....	17
1.3.2. Principaux GES et Potentiel de réchauffement global	19
1.3.2.1. Principaux GES.....	19
1.3.2.2. Potentiel de Réchauffement Global (PRG).....	21
Conclusion.....	23
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES.....	24
Introduction	24
2.1. Matériel.....	24
2.1.1. Présentation du matériel.....	24
2.1.1.1. Parc Automobile	24

2.1.1.2. Matériel de test de contrôle des gaz d'échappement.....	26
2.1.2. Description de l'analyseur de gaz CAP3201-4GAZ	26
2.2. Méthodologie	29
2.2.1. Nomination d'un pilote, Définition des objectifs et du périmètre d'étude	31
2.2.2. La collecte et l'exploitation des données	31
2.2.2.1. Scope 1	31
2.2.2.2. Scope 2	34
2.2.2.3. Scope 3	34
2.2.2.4. Le calcul estimatif de l'émission des GES	36
2.2.3. Elaboration de plans d'action et synthèse du bilan carbone.....	36
Conclusion	36
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION.....	37
Introduction	37
3.1. Résultats	37
3.1.1. Evaluation quantitatives des Emissions directes	37
3.1.2. Emissions indirectes (Scope 2 et 3).....	41
3.1.3. Emissions totales	41
3.2. Discussions	42
3.2.1. Interprétation des résultats	42
3.2.3. Plans d'actions de réduction des émissions de GES du secteur du transport routier.....	44
3.3. Perspectives et recommandation.....	46
3.3.1. Autres actions de réduction des émissions de GES.....	46
3.3.2. Limites du présent Bilan Carbone et perspectives d'améliorations.....	47
Conclusion	48
Conclusion Générale	49
Références Bibliographiques	50
ANNEXES	a
Table des matières	Erreur ! Signet non défini.