



FAISABILITÉ ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE D'UN BUS AU BIOGAZ À LIÈGE

Jury :
Promoteur :
Sabine LIMBOURG
Lecteurs :
Yasemin ARDA
Joseph SMITZ

Mémoire présenté par
Martine MOSTERT
En vue de l'obtention du diplôme de
Master en Ingénieur de Gestion
à finalité spécialisée en
Supply Chain Management
Année académique 2011/2012

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui, par leur aide et par leur soutien, m'ont permis de réaliser ce travail dans les meilleures conditions qui soient.

Je remercie tout d'abord ma promotrice, Madame Limbourg, pour son intérêt et pour son aide précieuse tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Je remercie ensuite Madame Léonard du Laboratoire du Génie Chimique de l'Université de Liège, ainsi que Monsieur Toussaint de la société Green Propulsion pour le temps qu'ils m'ont consacré, afin de mieux comprendre la problématique dans chacun de leurs domaines respectifs.

Je tiens également à remercier la société IVECO ainsi que les TEC Liège-Verviers pour les diverses informations qu'ils m'ont fournies dans le cadre de ce travail.

Enfin, je remercie ma famille et mes amis pour leur relecture et leur soutien pendant toute la réalisation de mon travail de fin d'étude.

Executive summary

Every day, lots of students of the University of Liege have to drive to the Sart-Tilman in order to attend their courses. These movements generate many displacements that are responsible for the emission of harmful particles, impacting negatively climate or human health. Since students' transportation is the second cause of the University CO₂ emissions, it is interesting to find solutions that could reduce the emissions in this field.

The objective of this paper is therefore the analysis of the economic and environmental feasibility of biogas buses in public transport in Liege. The idea of biogas bus implementation is based on the potential revalorization of the organic trash by the company INTRADEL, which manages and treats waste in the region. The project is also in line with the willingness of the city of Liege to demonstrate its environmental involvement. Biogas buses present some advantages and disadvantages that must be developed in the specific context of Liege. The main benefits and drawbacks of the biogas technology are discussed and compared with the current diesel bus fleet of the city.

The main conclusion of this study is that, while internalizing the external costs due to pollution, the utilization of biogas buses becomes attractive compared with classical diesel buses. Nevertheless it requires investments and might lead to resistance to change. However it remains a good solution for the reduction of the CO₂ emissions, responsible for the additional warming effect generated by human beings. It is also a good marketing argument for the city, especially in the framework of the application for the International Exposition in 2017.

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	1
1.1. CONTEXTE GÉNÉRAL.....	1
1.2. STRUCTURE	5
2. BESOIN DE NOUVELLES SOLUTIONS	7
2.1. LOW EMISSION ZONES	7
2.2. VOIES FERROVIAIRES	9
2.3. VOIES NAVIGABLES.....	9
2.4. TRANSPORT ROUTIER : VÉHICULES ÉLECTRIQUES ET HYBRIDES	10
2.5. TRANSPORT ROUTIER : BIOCARBURANTS.....	12
2.6. MODES DE TRANSPORT DOUX	13
3. TRANSPORTS EN COMMUN : LES AUTOBUS	15
3.1. CONTEXTE À LIÈGE	15
3.2. TRANSPORTS EN COMMUN ET ENVIRONNEMENT	16
3.3. ETUDES COMPARATIVES GÉNÉRALES	16
3.4. ETUDES COMPARATIVES BIOGAZ – AUTRES CARBURANTS	18
3.5. ETUDES D'UTILITÉ DU BIOGAZ DANS LA FILIÈRE CARBURANT	20
4. DIMINUTION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE LA VILLE DE LIÈGE	23
4.1. RELOCALISATION DES GRANDS AMPHITHÉÂTRES.....	23
4.2. SUBSTITUTION PAR DES BUS AU BIOGAZ.....	26
4.3. MÉTHODOLOGIE.....	35
4.4. COMPARAISON ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE ENTRE UN BUS AU BIOGAZ ET AU DIESEL.	37
5. CONCLUSIONS.....	63
5.1. FAISABILITÉ ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE	63
5.2. PISTES À DÉVELOPPER.....	66
5.3. CONCLUSIONS FINALES	67

1. INTRODUCTION

1.1. CONTEXTE GÉNÉRAL

Le transport a toujours fait partie des besoins d'échange des individus. Déjà au cours du quatrième millénaire avant Jésus-Christ, on observait les prémices du transport de biens et de personnes. Avec le développement du commerce, les chemins ont été naturellement créés et aplatis afin de faciliter la circulation des véhicules sur roues tirés par des animaux. Le transport routier était né.

Dans les quarante dernières années, le secteur du transport a pris de plus en plus d'importance dans la vie économique de la société. Aussi bien dans les déplacements personnels que dans la vie professionnelle, il est devenu essentiel pour les personnes et les biens d'être capable de bouger rapidement d'un endroit à un autre. Les raisons de ces déplacements sont liées au confort (augmentation du pouvoir d'achat permettant aux individus de se déplacer en voiture d'un endroit à un autre, sans faire trop d'efforts) et à la possibilité d'un meilleur développement personnel (obtention d'un emploi avec un meilleur revenu dans un endroit plus éloigné, vente de produits à de nouveaux consommateurs, économies possibles dans le cadre de l'utilisation d'une main d'œuvre étrangère moins chère).

Cette augmentation croissante des trajets des biens et des personnes est perceptible dans tous les secteurs du transport. Pour le chargement de marchandises, la croissance du transport par rail, voies d'eau, route et air est indéniable. Les statistiques de l'Organisation de Développement et Coopération Economiques (OCDE) établissent que la quantité des containers transportés par rail en Belgique représentait 1.300 tonnes en 1970, contre 17.700 tonnes en 2008. Cette augmentation est également clairement visible dans le domaine des containers transportés par la mer. Selon l'OCDE, ces derniers correspondaient à environ 4.000 tonnes de marchandises transportées en 1970, alors que ce nombre s'élevait à 101.600 tonnes en 2008. Le transport routier ne fait pas exception et a également augmenté terriblement dans les dernières décennies. En 1970, toujours selon les statistiques de l'OCDE, le nombre de millions de tonnes transportées sur un kilomètre en Belgique était d'approximativement 13.100, contre 126.600 en 2008. Ceci représente une augmentation de presque 900% sur quarante ans.

Le transport des passagers a également grandi de façon importante. Selon l'OCDE (2008), le transport interne belge de passagers (passagers du rail, de voitures privées, et de bus et de cars) était de 67.000 personnes sur un kilomètre en 1970, alors que ce chiffre a augmenté à 142.000 personnes en 2008.

L'augmentation des transports a apporté des bénéfices sociaux et économiques à la société, mais présente également un revers important : son impact négatif sur l'environnement. Dans les dernières décennies, de nombreux débats entre scientifiques ont eu lieu afin d'essayer de déterminer les causes du réchauffement climatique actuel. En 2007, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) a reconnu dans un de ces rapports que les raisons principales expliquant le changement soudain dans les températures ne pouvaient être que les émissions de gaz à effet de serre (GES) produites par les activités anthropogéniques. A ce moment, il a été reconnu internationalement que les émissions croissantes de dioxyde de carbone (CO₂) et d'autres GES provoquaient un effet de serre additionnel, qui induisait un réchauffement anormal (comparé à l'alternance des phases de glaciation et de réchauffement observées par le passé).

Les émissions de CO₂ induites par la croissance impressionnante du monde du transport ont clairement joué, et jouent toujours, un rôle important dans la détérioration de l'environnement. Selon le Forum de Transport International, les émissions de CO₂ résultant du secteur du transport représentaient 22,5% des émissions globales provenant de la combustion de fuel fossile en 2008. Cette valeur est différente pour les pays de l'OCDE (30%) et pour les nations non membres de l'OCDE (16%). En outre, dans l'Espace Economique Européen (EE32), le transport représentait, en 2009, 24% des émissions totales de gaz à effet de serre. Ces émissions étaient réparties de la façon suivante : 17% pour le transport routier, 3% pour l'aviation internationale, 3% pour le transport maritime international et 1% pour les autres transports (Annexes 1 et 2). Ces statistiques montrent clairement la nécessité de considérer le secteur du transport (surtout routier) lors de la recherche de solutions dans le cadre de la problématique du développement durable. Afin d'assurer la longévité de l'espèce humaine, il est urgent de prendre des mesures visant à protéger l'environnement, par le biais de changements dans les modes et habitudes de transport.

Le changement climatique n'est malheureusement pas le seul domaine dans lequel le transport impacte négativement l'environnement. En effet, tous les aspects de pollution doivent être pris en compte, et particulièrement ceux ayant une influence sur la santé humaine. La combustion de carburant, par exemple, émet un grand nombre de particules qui peuvent devenir dangereuses pour l'être humain, en cas de trop longue ou trop forte exposition. La problématique de la pollution sonore est également un autre facteur à prendre en considération lorsque l'on évoque les désagréments du transport.

Les problèmes de réchauffement climatique sont des problèmes globaux, qui n'ont de sens que si chacun s'investit et tente de réduire ses émissions. En effet, des gaz à effet de serre générés en Chine provoquent autant d'impacts dans le pays lui-même que dans le reste du monde. L'effet de serre additionnel provoqué par l'homme est un problème global et il est dès lors nécessaire que chacun le traite à son niveau.

Dans un cadre international, des traités ont déjà été rédigés, signés et ratifiés dans le but de limiter les différentes émissions. L'exemple le plus connu est le Protocole de Kyoto, entré en vigueur en 2005, au travers duquel les pays industrialisés signataires se sont engagés, pour la période 2008-2012, à réduire d'un certain pourcentage (réduction globale de 8% pour l'ensemble de la Communauté Européenne) les émissions de six gaz à effet de serre (dont le dioxyde de carbone et le méthane) par rapport à l'année de référence 1990. Ce traité marque une avancée dans la prise de conscience de l'importance du problème du réchauffement climatique, mais souffre d'une faille importante : la non participation des pays en voie de développement et de certains grands acteurs industrialisés tels que les USA et la Chine. Aucun objectif de réduction n'est fixé pour ces derniers.

Au niveau Européen, de nombreuses directives ont également été rédigées. Ces normes définissent les valeurs-limites ou guides à ne pas dépasser en termes de concentration dans l'air de certains composants atmosphériques (normes d'immission). Les doses maximales tolérées afin de limiter les risques sont définies pour des périodes de référence données. Des exemples de ces normes sont entre autres les directives européennes suivantes (Smitz, 2010) :

- 80/779/CEE et 89/427/CEE : normes d'immission relatives au dioxyde de soufre
- 85/203/CEE : norme d'immission relative au dioxyde d'azote
- 92/72/CEE : norme d'immission relative à l'ozone troposphérique.

D'autres outils sont aussi mis en place, par exemple au niveau économique. Les gouvernements, par le biais d'incitants économiques ou de déductions fiscales, tentent d'orienter les consommateurs vers des filières générant moins de CO₂. En Belgique, les exemples les plus importants en termes de transport de personnes ont été les différentes primes accordées par le gouvernement fédéral (jusque fin 2011) et les gouvernements régionaux, dans le cadre de l'achat d'un véhicule plus propre. Etaient considérés comme propres jusque fin 2011, les véhicules dont les émissions ne dépassaient pas les 115 g de CO₂ par km. Au niveau fédéral, deux catégories de véhicules étaient définies :

- 1) Les véhicules émettant moins de 105 g de CO₂ par km. Ces derniers bénéficiaient d'une réduction immédiate de 15% sur le prix d'achat du véhicule.
- 2) Les véhicules émettant entre 105 et 115 g de CO₂ par km. Ces derniers bénéficiaient d'une réduction immédiate de 3% sur le prix d'achat du véhicule.

Depuis 2012, la Région Wallonne offre un Eco-bonus pour tout véhicule acheté (neuf ou d'occasion) émettant moins de 81 g de CO₂ par km. Ce bonus sous forme de prime varie entre 500 et 3500 euros, sur base de la performance environnementale du véhicule (Mon Assurance Auto, 2012).

C'est dans ce contexte multidimensionnel que se place notre étude. L'utilisation des transports en commun dans la ville de Liège engendre des émissions de CO₂. Les trajets de déplacements jusqu'aux amphithéâtres du Sart-Tilman représentent d'ailleurs la seconde source la plus importante d'émissions de carbone de l'Université. Afin de démontrer son engagement dans la lutte contre le réchauffement climatique, il serait intéressant pour la société opératrice des bus de la ville de Liège d'investir dans un projet visant à réduire les émissions. Cette implication permettrait aux TEC de limiter leur impact sur le réchauffement climatique. Ce projet doit évidemment garantir un même niveau de service et une rentabilité économique. C'est pourquoi il est important d'en étudier la possible valeur ajoutée.

1.2. STRUCTURE

L'objectif principal de ce travail est l'étude de la faisabilité économique et environnementale d'un bus au biogaz à Liège.

La première partie de ce document est consacrée à la revue d'un ensemble de nouvelles solutions, développées dans le cadre du transport de personnes, et ayant pour but la réduction des impacts négatifs du transport sur l'environnement et la santé humaine. Ensuite, une revue de différentes études réalisées dans le cadre de la comparaison de plusieurs moyens de propulsions des autobus, ou de différentes utilisations possibles du biogaz seront proposées au lecteur. Le but de cette partie est de mettre notre analyse en relation avec les connaissances déjà générées dans le domaine jusqu'à aujourd'hui.

Les sections suivantes sont dédiées à l'étude de deux solutions concrètes pour réduire les émissions de polluants dues au transport de personnes dans la ville de Liège : la relocalisation des grands amphithéâtres de l'Université de Liège au centre-ville et le remplacement des autobus actuels de la ville, par des autobus fonctionnant au biogaz.

Les résultats obtenus seront enfin analysés et discutés, afin de tirer les conclusions principales des développements réalisés. Des pistes complémentaires à explorer seront également évoquées dans cette dernière partie.

2. BESOIN DE NOUVELLES SOLUTIONS

Toutes les considérations évoquées ci-dessus ont fait réfléchir la société. Actuellement, une nouvelle tendance apparaît au niveau de la recherche et de l'utilisation de solutions innovantes, qui permettent la protection ou l'emploi moins intensif des ressources de la planète. Ces nouvelles propositions pour le domaine du transport peuvent prendre différentes formes et ont toutes leurs avantages et inconvénients. Dans les sections suivantes, nous introduirons brièvement quelques uns de ces nouveaux procédés et technologies.

2.1. LOW EMISSION ZONES

L'utilisation des transports a connu, ces dernières années, une augmentation fulgurante. De par les échanges de plus en plus nombreux et la mondialisation, les émissions liées aux déplacements de biens et de personnes ont, elles aussi, subi une forte croissance. Cette évolution a provoqué des conséquences négatives tant au niveau de l'environnement que de la santé humaine. Cette prise de conscience a été le facteur déclenchant pour la remise en question des systèmes instaurés jusqu'à maintenant.

Afin de limiter les émissions, certaines autorités ont décidé de développer des Low Emission Zones (ou en français : zones à faibles émissions). Ces dernières ont été instaurées dans le but de réduire la pollution majeure présente dans les agglomérations et ce, dans l'optique de préserver la santé publique.

Les Low Emission Zones (LEZ) sont des aires géographiques déterminées au sein desquelles le taux d'émission des véhicules est contrôlé et limité. L'accès à ces zones est interdit aux moyens de transport les plus polluants. Il existe une grande variété de LEZ, caractérisées par différents horaires d'application, différents types de véhicules concernés et différents standards d'émission à respecter. Dans certains cas, les véhicules ne respectant pas les limitations sont autorisés à pénétrer dans le secteur protégé, à condition de s'acquitter du paiement d'un montant forfaitaire.

Implémentées à l'origine dans les pays nordiques, les LEZ sont actuellement présentes dans beaucoup de villes européennes.

Un des exemples les plus connus ces dernières années reste cependant celui de Londres. En 2008, la capitale a décidé de dissuader les véhicules les plus polluants d'entrer dans la partie protégée de l'agglomération. Les véhicules touchés par cette restriction sont les

camions de plus de 3,5 tonnes ainsi que les bus et les cars de plus de 5 tonnes, propulsés par une technologie diesel. La législation en vigueur en 2008 imposait à ces derniers de respecter les normes de pollution EURO III, s'ils souhaitaient entrer librement dans la zone. Cependant, à partir de janvier 2012, les conditions deviennent plus strictes et, pour avoir un accès gratuit, les moyens de transport concernés doivent être conformes à la norme EURO IV.

Les normes de pollution EURO (Annexe 3) sont des normes européennes destinées à limiter les émissions des véhicules afin de protéger la santé humaine. Ces normes s'appliquent à tous les véhicules neufs européens et déterminent les valeurs maximales d'émissions autorisées pour différents types de polluants. Les premières normes EURO sont apparues en 1990. Depuis cette date, elles ne cessent d'évoluer vers des conditions plus strictes d'émissions. Elles reprennent des valeurs limites à ne pas dépasser, en fonction du type de carburant utilisé. Les émissions pour lesquelles des valeurs maximales sont fixées sont le monoxyde de carbone, les particules, l'oxyde d'azote et les hydrocarbures.

Tous les véhicules étrangers concernés par la restriction et désireux d'entrer dans la zone doivent préalablement être enregistrés auprès de l'organisme « Transport For London ». Cette opération est nécessaire, puisque le contrôle du respect ou non des interdictions et des paiements est effectué par le biais de caméras, installées dans la zone, qui lisent les plaques d'immatriculation et les comparent avec la base de données de véhicules enregistrés.

La volonté des autorités londoniennes était de rendre les véhicules plus verts. Les pouvoirs estimaient que, si les conducteurs dotés de véhicules plus polluants ne pouvaient accéder à la ville que par le biais d'un péage, ils finiraient par changer leurs habitudes en remplaçant leur véhicule par un modèle plus neuf avec moins d'émissions. Au niveau de la zone à faible émission, le taux de pollution devrait ainsi être réduit.

Browne, Allen et Anderson (2005) se sont intéressés aux effets potentiels de la zone à faible émission sur le transport des marchandises. Se basant sur l'étude de faisabilité réalisée par Watkiss et al. (2003), leur article révèle que sur 55 sociétés interrogées, certaines entreprises concernées par la LEZ n'investiraient pas dans de nouveaux véhicules moins polluants, mais réorganiseraient leur flotte afin de faire circuler dans Londres les camions respectant les normes. Les véhicules moins respectueux de l'environnement seraient donc ainsi réattribués à l'extérieur de Londres, ce qui ne ferait que déplacer le problème ailleurs et n'apporterait donc pas une solution tout à fait efficace et durable.

2.2. VOIES FERROVIAIRES

Dans le domaine ferroviaire également, de nouvelles solutions ont été développées. Deux applications principales peuvent être mentionnées en Belgique : le train à énergie solaire et le projet « Plug and Ride ».

Le premier train à énergie solaire a circulé dans la région d'Anvers le 6 juin 2011. 16.000 panneaux solaires ont été installés sur les 3,4 kilomètres du toit d'un tunnel situé le long de la ligne Anvers-Amsterdam. Ces panneaux permettent d'alimenter électriquement les trains, exclusivement à partir d'énergie solaire. En outre, une partie de l'électricité produite est également utilisée dans l'infrastructure ferroviaire. L'énergie solaire générée permet notamment de couvrir des besoins en chauffage et en éclairage dans les gares. L'utilisation de l'énergie solaire comme source d'alimentation des trains est une première en Europe. L'infrastructure installée sur le tunnel près d'Anvers produit chaque année une quantité d'électricité correspondant aux besoins énergétiques annuels de 950 familles ou à la quantité d'électricité nécessaire pour faire fonctionner tous les trains belges durant une journée (La Libre, 2011 ; Le Figaro, 2011).

Le projet Plug and Ride est, quant à lui, un projet pilote qui a été initié par la SNCB Holding, Siemens et le Service Public Fédéral Economie et Energie. L'objectif de cette expérience était d'analyser l'intérêt de la combinaison de différents modes de transport avec le train. C'est dans ce but que huit utilisateurs ont testé l'attractivité du transport intermodal, en utilisant à la fois le train, la voiture électrique et la voiture partagée. Le rapport final, établi par le Centre Interuniversitaire d'Etude de la Mobilité et le Bond Beter Leefmilieu Vlaanderen (Eco-Réponses, 2011), a tiré de ce projet la conclusion que « la mobilité en réseau offrait une véritable alternative aux besoins de déplacement existants », mais que « quelques problèmes occasionnels se sont toutefois posés, comme des voitures insuffisamment rechargées, des retards de train ou une batterie vide durant le parcours ».

2.3. VOIES NAVIGABLES

Des nouvelles solutions de transport sont également recherchées au niveau des voies navigables.

C'est par exemple le cas du système de bateau-bus. Ce type de transport a déjà été mis en place, notamment à Paris (Batobus), afin de faciliter les déplacements entre certains

quartiers de la ville. Le bateau fait des arrêts réguliers à des endroits prédéfinis et permet ainsi le déplacement des voyageurs sur les voies fluviales de la Seine.

En Belgique et à Liège plus particulièrement, c'est du projet Navibus dont il est question dans ce domaine. Le projet Navibus consiste à développer un bateau-bus qui se déplacerait le long de la Meuse et qui pourrait servir de complément aux autres modes de transport en commun déjà existants. Le principe est le suivant : le Navibus se déplace d'un point de départ (Herstal) à un point d'arrivée (Flémalle), en réalisant des arrêts réguliers afin d'embarquer et de débarquer ses passagers.

En 2011, une étude de faisabilité du bateau Navibus a été réalisée par la société DN&T, une spin-off de l'Université de Liège (ULg). Cette étude portait notamment sur l'analyse et le calcul du potentiel public, sur la conception des bateaux ainsi que sur la rentabilité du projet. Après une année de travail, l'étude a conclu à la faisabilité économique et technique du projet (RTC, 2011). L'objectif est de proposer un système de transports en commun complémentaire, aux mêmes tarifs que ceux pratiqués par les autobus des TEC. Afin d'assurer cette complémentarité, il serait nécessaire, selon les responsables de l'étude, d'impliquer la société de transport public dans le développement du Navibus. Ce concept pourrait être subventionné par un partenariat public-privé.

L'intérêt particulier de ce projet réside surtout dans l'idée évoquée par la société DN&T d'envisager le déplacement de ce bateau en utilisant un moteur électrique ou hybride.

L'étude de base du projet a été exposée fin mai 2011 et l'implémentation du Navibus est toujours en attente d'approbation par les pouvoirs politiques locaux.

2.4. TRANSPORT ROUTIER : VÉHICULES ÉLECTRIQUES ET HYBRIDES

La route reste le mode de déplacement le plus courant en Europe. En 2008, le transport routier (incluant l'utilisation de la voiture, de deux-roues, de cars et de bus) représentait 83,1% des déplacements de personnes en Europe (Commission Européenne, 2009). Le pourcentage restant des déplacements était assuré par l'utilisation du train, du bateau ou de l'avion.

Au vu du grand nombre de kilomètres parcourus sur les routes, il est donc logique que d'autres solutions de transport, plus respectueuses de l'environnement, aient également été développées à ce niveau. Parmi ces dernières, on retrouve les véhicules électriques et

hybrides. Ces nouvelles technologies sont aussi bien appliquées à des véhicules particuliers qu'à des véhicules d'utilité publique (autobus). L'intérêt principal de l'utilisation d'un véhicule purement électrique réside dans la quantité nulle de CO₂ envoyée dans l'atmosphère lors de son utilisation. Cette affirmation doit cependant être prise avec précaution puisqu'elle ne considère qu'une partie du cycle de vie du véhicule et omet trois étapes importantes, potentiellement génératrices d'émissions, la fabrication de l'électricité nécessaire au fonctionnement du véhicule, la fabrication des batteries ainsi que le recyclage de ces dernières.

Dans le cas de véhicules particuliers, une étude de Ma et al. (2012) souligne les variations importantes de performance en termes d'émissions de gaz à effet de serre d'un véhicule électrique alimenté par batterie, par rapport à un véhicule classique à combustion interne. Une analyse de plusieurs scénarios est conduite et donne, sur l'ensemble du cycle de vie et pour différentes valeurs des paramètres (vitesse, efficacité énergétique du réseau électrique, taux de chargement du véhicule), un résultat parfois meilleur pour le véhicule électrique, et parfois meilleur pour le véhicule à combustion interne.

Lorsque le véhicule étudié fonctionne à une vitesse élevée et que le conducteur transporte également d'autres passagers, l'efficacité du véhicule électrique alimenté par batterie diminue par rapport à celle du véhicule à combustion interne. Si l'intensité marginale du réseau électrique est utilisée, à la place de l'intensité moyenne, pour déterminer les émissions de gaz à effet de serre liées au chargement des batteries, le véhicule à combustion interne devient même plus efficace que le véhicule électrique. Les auteurs de l'étude définissent l'intensité marginale comme l'énergie supplémentaire qui doit être amenée sur le réseau afin de satisfaire la demande additionnelle générée par les batteries. L'efficacité du véhicule électrique est supérieure à celle du véhicule à combustion interne quand le chauffeur roule à une vitesse urbaine, sans passager et sans utilisation des accessoires (climatisation par exemple).

L'étude établit aussi que, pour la partie des émissions relatives à la fabrication et à la mise à disposition du véhicule, la voiture électrique est moins efficace que la voiture à combustion interne. Ce résultat est principalement dû à la fabrication de la batterie. Cette partie des émissions peut représenter une grande part des émissions globales associées à un véhicule électrique.

Les véhicules hybrides combinent plusieurs sources d'énergie distincte. Le cas le plus répandu est l'utilisation d'un moteur diesel en combinaison avec une batterie électrique. De nombreuses marques de véhicules particuliers ont développé ce type de technologie, mais le domaine reste moins approfondi pour les transports en commun tels que les autobus. Un prototype de bus hybride, unique en Europe, a été développé par la Société Régionale Wallonne du Transport (SRWT) en collaboration avec la société Green Propulsion, une spin-off de l'Université de Liège. Le bus circule actuellement dans la ville de Liège et est testé en fonctionnement réel (chargé avec des sacs de sable afin d'imiter le poids des passagers) depuis septembre 2011. Cette technologie « conserve les mêmes performances qu'un bus classique, mais permet de faire des économies en termes de consommation de carburant » (La Libre, 2011). Le gain est estimé à 146 tonnes de carburant par bus et par an.

2.5. TRANSPORT ROUTIER : BIOCARBURANTS

D'autres idées nouvelles ont également été étudiées au niveau routier, et plus particulièrement dans la recherche et le développement de nouveaux types de carburants : les biocarburants. Selon le Larousse 2009 (p. 134), un biocarburant est un carburant obtenu à partir de végétaux (oléagineux, céréales, cannes à sucre, etc.). Parmi les biocarburants, on retrouve trois grandes familles principales : biodiesel, bioéthanol et biogaz.

Le site internet de la plateforme suisse des biocarburants (2012) permet de mieux comprendre les processus de fabrication de chacun des trois grands types de biocarburant. Le fonctionnement de ces processus est expliqué de manière synthétisée ci-dessous.

Le biodiesel constitue la première famille de carburants biologiques. Il provient du traitement industriel de graines oléagineuses (comme le colza par exemple). Les graines sont pressées et subissent ensuite une réaction de trans-estérification avec un alcool en présence d'un catalyseur (permettant d'accélérer la vitesse de la réaction). Cette réaction chimique consiste en l'échange du groupe organique d'un ester avec le groupe organique d'un alcool, dans le but de former un nouvel alcool et un nouvel ester (le biodiesel). Cette réaction peut également être effectuée à partir d'huiles usagées.

Le bioéthanol est, quant à lui, obtenu à partir de biomasse (betteraves, cannes à sucre, céréales, maïs,...). Certains sucres, dits fermentescibles, peuvent être transformés en éthanol lors de la fermentation (dégradation des sucres par des microorganismes, tels que de la levure ou des micro-bactéries, qui permettent la transformation des sucres en alcool). Ces sucres,

comme par exemple le glucose et le saccharose, se retrouvent naturellement dans de nombreux éléments du monde végétal. Cependant, dans leur état initial, le glucose et le saccharose prennent la forme d'une chaîne de polymères. Pour obtenir du bioéthanol, il faut d'abord diviser ces longues chaînes en un grand nombre de sucres simples. Après fermentation de ces sucres, les produits obtenus sont distillés (opération consistant à séparer deux liquides ayant des températures d'ébullition différentes) afin d'obtenir le bioéthanol. Celui-ci doit encore être légèrement modifié par déshydratation avant de pouvoir être utilisé. La production industrielle consiste donc simplement en une accélération d'un processus naturel.

Le dernier type principal de biocarburants est le biogaz. La production de ce carburant repose sur le processus de méthanisation. Celui-ci a lieu de façon naturelle, notamment dans le fond des océans, et consiste en la dégradation de la matière organique par des bactéries, en l'absence d'oxygène. Les réactifs sont des matières organiques telles que des sucres ou des protéines qui, une fois transformés par les bactéries, se retrouvent sous la forme de méthane et de dioxyde de carbone. Le terme biogaz peut être utilisé lorsque la production de méthane est réalisée à partir de déchets, et que ceux-ci sont donc réutilisés dans le but de créer de l'énergie.

2.6. MODES DE TRANSPORT DOUX

Enfin, une des dernières tendances permettant de limiter les impacts du transport sur l'environnement et la qualité de vie humaine est l'utilisation plus poussée des modes de transport dits « doux ». Parmi ces derniers, on retrouve notamment la marche et le vélo.

La mise à disposition de vélos de locations pour une journée ou une semaine se développe de plus en plus dans les grandes villes. A Bruxelles, par exemple, le système « Villo ! » permet à tout un chacun de louer un vélo dans une des 180 stations automatisées du réseau, et de le rapporter au dépôt de son choix. Ce système, à la fois pratique et respectueux de l'environnement, offre à ses utilisateurs une alternative intéressante aux autres modes de transports, lors du parcours des derniers kilomètres d'un trajet de plus longue distance. Ce mode de transport doit alors être vu comme un des éléments clé d'un transport multimodal, permettant, par exemple, d'effectuer la dernière partie du trajet jusqu'à son lieu de travail. Ce type de service est également un outil attrayant pour des touristes désireux de découvrir la région d'une manière plus durable.

Ce système présente cependant des limites. En effet, il ne permet le déplacement que sur de courts ou moyens trajets. Il pose également la question du repositionnement des vélos dans les différentes stations du réseau, puisque la quantité enlevée sur chaque site est généralement différente de la quantité de vélos ramenés sur ce même site. Les rapatriements de vélos se font certainement à l'aide de véhicules motorisés qui eux-mêmes génèrent différentes émissions de CO₂ ou d'autres types de polluants.

3. TRANSPORTS EN COMMUN : LES AUTOBUS

3.1. CONTEXTE À LIÈGE

Les différentes solutions développées ci-dessus démontrent l'importance actuelle qui est accordée à la recherche de nouvelles méthodes pour un développement plus durable des activités de transport.

La ville de Liège est également concernée par les émissions de CO₂ liées au transport. En tant que ville universitaire, et de par la disposition de ses locaux d'enseignement, la Cité Ardente est le théâtre de nombreux déplacements. Une grande partie de ces derniers est constituée par les trajets réalisés, chaque jour, par les flux d'étudiants qui logent au centre-ville, mais viennent suivre leurs cours sur les hauteurs de la ville, au Sart-Tilman. Ces déplacements quotidiens, les plus souvent réalisés en bus, génèrent des émissions de CO₂ qui, avec les émissions liées au chauffage, représentent une grande partie de l'impact environnemental de l'Université de Liège.

Afin d'essayer de réduire l'impact écologique lié au déplacement des ces étudiants provenant du centre-ville, plusieurs solutions peuvent être envisagées.

La première option consiste à réduire la demande de transport pour le Sart-Tilman. Cette solution pourrait être le résultat d'une relocalisation des grands amphithéâtres au centre-ville. Puisque la plus grande partie des étudiants se déplace en transports en commun à Liège, une telle option conduirait à la diminution du nombre d'étudiants utilisant le bus comme moyen de transport pour se déplacer afin de suivre les cours. Ces élèves pourraient utiliser des moyens de transport dits « doux » (marche, vélo) et contribueraient ainsi à la diminution des émissions de CO₂ liées au transport des étudiants.

La seconde piste d'amélioration consiste en la modification du type de carburant utilisé par les TEC, la société de transport public active en Wallonie et donc également à Liège. Pour cette seconde possibilité, il serait envisagé de modifier l'actuelle flotte de bus fonctionnant au diesel par de nouveaux bus utilisant le biogaz comme carburant. Cette opportunité est à considérer avec attention au vu de la possible valorisation énergétique des déchets organiques liégeois par l'Intercommunale de Traitement de Déchets en région Liégeoise (INTRADEL).

Dans la suite de ce travail, nous comparerons les différentes alternatives, d'un point de vue économique et environnemental et nous débattrons ensuite de la viabilité et de l'opportunité de chacune des décisions. L'objectif principal à garder en tête reste la réduction des émissions de CO₂ lors du déplacement des étudiants, nécessaire au bon suivi des cours donnés au sein de l'Université.

3.2. TRANSPORTS EN COMMUN ET ENVIRONNEMENT

Dans la recherche de solutions destinées à protéger l'environnement et la santé humaine, les transports en commun sont aussi sollicités. Tout comme leurs confrères du rail ou des voies navigables, les sociétés opératrices des autobus cherchent, en tant que fournisseurs de service public, à promouvoir leur image auprès de leur clientèle en mettant en avant leur investissement dans le développement durable. C'est pourquoi, au cours des dernières années, de plus en plus de projets tests ont été observés, particulièrement liés à l'utilisation de nouveaux types de carburants. De nombreuses études ont été réalisées afin d'évaluer la performance de chacune des solutions sur différentes catégories d'impacts. Les études les plus pertinentes par rapport à ce travail, ainsi que leur apport principal en ce qui concerne la méthodologie d'analyse ont été synthétisés dans les sections suivantes.

3.3. ETUDES COMPARATIVES GÉNÉRALES

Des études comparatives entre différents modes de propulsion des bus ont été réalisées par de nombreux auteurs.

Déjà en 2002, Rabl s'intéressait à l'analyse comparative du point de vue environnemental des bus fonctionnant au gaz naturel et au diesel. L'objectif de cette étude était la valorisation et l'internalisation des coûts externes générés lors de l'utilisation d'un autobus. Un coût externe est défini comme le coût d'un désagrément généré par une activité et non pris en charge financièrement par le responsable des nuisances. En matière de transports, les principaux coûts externes sont la pollution, le bruit et la congestion. La Communauté Européenne (2008) tente d'internaliser ces coûts externes, c'est-à-dire de les répercuter sur le prix payé par l'utilisateur, afin de l'inciter à modifier ses comportements, en utilisant des moyens de transport plus responsables.

Les résultats obtenus estiment la différence entre les coûts externes liés au bus au diesel et ceux liés au bus au gaz naturel entre 0,22 et 1,04 euros par km, au profit du gaz

naturel. Une analyse de sensibilité est réalisée dans l'étude et démontre que, peu importe les hypothèses de coût de réchauffement global ou l'adoption d'une norme EURO3, plus poussée que les normes de l'époque, les coûts externes liés à l'utilisation d'un bus roulant au gaz naturel restent moins élevés que ceux liés à l'utilisation d'un bus fonctionnant au diesel.

Cette évaluation a été réalisée sur base du Projet ExternE (1995, 1998, 2000) de la Communauté Européenne. Ce projet a impliqué depuis 1991, plus de 500 équipes de chercheurs dans une vingtaine de pays. Le but de ce réseau de recherche est le développement et l'amélioration continue d'une méthodologie de valorisation des coûts liés à la pollution, au bruit ou à tout autre type de nuisance. L'idée est tout d'abord d'évaluer et de mesurer les dommages causés à la société et qui ne sont pas pris en charge financièrement par leurs auteurs. Ensuite, il s'agit de monétiser ces dommages et de développer des méthodes efficaces et cohérentes d'attribution de ces coûts externes à leurs auteurs. La méthodologie ExternE est composée de cinq étapes principales (Commission Européenne, 2005) :

- 1) Définition de l'activité à analyser et de son historique. Définition des principales catégories d'impact et d'externalité.
- 2) Estimation des impacts en unités physiques. Les impacts assignés à une activité correspondent généralement à la différence entre les impacts constatés dans un scénario avec et sans cette activité.
- 3) Monétisation des impacts et estimation des coûts externes.
- 4) Evaluation des incertitudes, analyse de sensibilité.
- 5) Analyse des résultats et conclusions.

Afin de quantifier les différents impacts environnementaux, une approche de « chemin d'impact » (Impact Pathway Approach) a été développée. Elle consiste en la détermination de la source et la quantification des émissions, le calcul de l'augmentation des émissions dues à la dispersion de polluants, l'étude de l'impact par le biais d'une fonction dose-réponse et enfin la monétisation de l'impact.

L'article d'Ally et Prior (2007) traite également des impacts à différents niveaux de l'utilisation d'un bus fonctionnant au diesel, au gaz naturel ou à la pile à combustible. A la demande du gouvernement d'Australie-Occidentale, les auteurs réalisent une analyse du cycle de vie d'un bus alimenté par une pile à combustible et établissent ses performances par rapport aux bus au diesel et au gaz naturel actuellement en fonctionnement.

Les éléments principaux à retirer de la méthodologie utilisée sont la définition des types d'impacts ainsi que la définition de l'envergure et de l'étendue de l'analyse.

Quatre catégories d'impact sont définies :

- 1) Le potentiel de réchauffement climatique. Ce dernier est principalement lié aux émissions de CO₂ et de méthane (CH₄).
- 2) Le potentiel d'acidification. Il dépend surtout des émissions de dioxyde de soufre (SO₂) et consiste en l'acidification de la pluie, des sols et de l'eau.
- 3) Le potentiel d'eutrophisation. Il est influencé par les composants phosphorés et azotés émis et se caractérise par une modification des concentrations de nutriments dans les lacs, les rivières et les sols.
- 4) Le potentiel de création d'ozone photochimique. Son importance est déterminée par les concentrations en hydrocarbures et a pour conséquence l'augmentation de la production d'ozone troposphérique (ozone de basse atmosphère qui est un polluant important de l'air, nocif pour la santé humaine).

L'étude définit également l'étendue à prendre en considération lors de l'établissement de l'analyse du cycle de vie. Elle mentionne notamment le fait que, pour le diesel et le gaz naturel, les émissions liées à certaines opérations ne doivent pas être prises en considération parce qu'elles n'influencent la balance du cycle de vie que de moins d'un pourcent. C'est le cas des impacts liés à la construction et au démantèlement des équipements d'infrastructure, car ils sont optimisés pour de grands volumes. Pour la pile à combustible par contre, il est important de considérer les équipements de transport, compression et purification de l'hydrogène, parce qu'ils ne sont prévus que pour de petits volumes.

Cette notion de délimitation du problème devra également être incorporée dans notre analyse, en n'oubliant pas d'y intégrer, pour le bus fonctionnant au biogaz, le coût économique et environnemental des infrastructures à développer pour un fonctionnement optimal.

3.4. ETUDES COMPARATIVES BIOGAZ – AUTRES CARBURANTS

Plus particulièrement, d'autres études ont également été entreprises afin d'établir la comparaison, du point de vue environnemental, entre des bus fonctionnant au biogaz et des bus utilisant d'autres moyens de propulsion. Le papier publié par Ryan et Caulfield (2010)

évalue les impacts en termes d'émissions de quatre modèles différents pour la flotte de bus de Dublin :

- 1) Modèle 1 : situation actuelle : bus au diesel respectant la norme Euro II, III ou IV
- 2) Modèle 2 : bus au diesel respectant la norme Euro V
- 3) Modèle 3 : bus au gaz naturel
- 4) Modèle 4 : bus au biogaz.

Les résultats obtenus dans cette analyse sont basés sur l'utilisation du modèle d'émissions COPERT 4, logiciel développé en collaboration avec l'Agence Européenne pour l'Environnement. Ils ne prennent en considération que la partie des émissions liées à l'utilisation et à la fabrication du carburant. Ils ne constituent donc pas une analyse complète du cycle de vie de ces différents bus. Cependant, les conclusions générées par rapport aux émissions liées à l'utilisation et à la fabrication du carburant sont claires : le modèle d'utilisation d'un bus au biogaz est celui qui permet, par rapport à la situation actuelle, la plus grande réduction pour tous les types d'émissions.

Le papier de Kliucininkas et al. (2012) établit également, une comparaison des émissions de différents composants, dans la ville de Kausas en Lituanie, pour des bus fonctionnant :

- au diesel
- à l'électricité produite à partir de pétrole
- à l'électricité produite à partir de gaz naturel
- au gaz naturel
- et au biogaz.

Les résultats obtenus indiquent que, pour la partie relative à la combustion des carburants, les émissions au kilomètre du bus fonctionnant au diesel sont toujours supérieures à celles générées par l'utilisation d'un bus roulant au biogaz, sauf dans le cas des émissions de SO₂. Le potentiel d'acidification est donc plus important lors de l'utilisation d'un bus alimenté par du biogaz. Dans cette étude, les émissions de CO₂ produites par un bus diesel sont inférieures à celles produites par un bus biogaz. Néanmoins, il faut rappeler que ce résultat ne tient compte que du CO₂ émis lors de la combustion du carburant. Il ne considère dès lors pas l'intégralité du cycle de vie du biogaz. Il faut évidemment rappeler que ce dernier a, pour la partie utilisation du carburant et sur l'intégralité de son cycle de vie, un bilan CO₂

neutre puisqu'il renvoie dans l'atmosphère la même quantité qui avait été captée précédemment par les déchets ou plantes (formés de matière organique) dont il est issu.

L'étude soulève aussi la question de l'efficacité énergétique de la technologie de combustion. En effet, lorsque le bus est alimenté au biogaz, 852,4 g de ce dernier sont nécessaires afin de parcourir un trajet d'un kilomètre, alors qu'il ne faut que 215,7 g de gaz naturel classique pour fabriquer l'électricité permettant à un trolleybus de se déplacer sur la même distance. Lorsque le gaz naturel traditionnel est utilisé directement comme carburant, 409,5 g sont nécessaires pour réaliser un parcours d'un kilomètre. Le gaz naturel utilisé directement comme carburant est donc 1,9 fois moins efficace que lorsqu'il est utilisé pour produire de l'électricité. La technologie de combustion du carburant joue donc un rôle essentiel dans l'efficacité énergétique de ce même carburant.

3.5. ETUDES D'UTILITÉ DU BIOGAZ DANS LA FILIÈRE CARBURANT

Les études réalisées à propos du biogaz ne traitent pas uniquement que de son utilité lorsqu'il est substitué à d'autres types de carburants dans les bus. En effet, le biogaz peut également servir dans des fonctions différentes telles que la production de chaleur, la production d'électricité ainsi que la cogénération. Dans un rapport de synthèse réalisé par RDC-Environnement, en collaboration avec l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME, 2007), on retrouve pour chaque filière de valorisation, la production équivalente évitée d'une autre source d'énergie ainsi que le résultat obtenu en ce qui concerne les quatre catégories d'impact préalablement déterminées (Annexe 4). Une des conclusions principales de ce document est que « les filières de valorisation sous forme de biogaz carburant dans des bus ou des BOM (bennes à ordures ménagères) en substitution au diesel sont les plus intéressantes au regard des quatre indicateurs retenus (effet de serre, acidification, eutrophisation et énergie) », RDC-Environnement (2007).

L'article de Lantz et al. (2007) établit aussi que, les bénéfices environnementaux globaux de l'utilisation du biogaz sont, en général, les plus importants quand le biogaz est utilisé en tant que carburant, en remplacement du pétrole ou du diesel. Ceci est dû à la réduction significative des émissions de certains polluants comme les oxydes d'azote ou les particules. L'utilisation du biogaz en remplacement du pétrole ou du gaz naturel dans des systèmes de production à grande échelle d'électricité ou de chaleur entraîne des réductions moins significatives de ces polluants (Borjesson & Berglund, 2007; Sundberg et al., 1997).

Cependant, malgré le rendement énergétique élevé du biogaz amélioré pour l'utilisation en tant que carburant, cette filière de valorisation reste peu utilisée, en Allemagne notamment. La principale raison invoquée est la moins grande disponibilité en termes d'infrastructures de station de distribution de gaz ainsi que le coût élevé de leur implémentation (Poesch et al., 2010). En outre, lorsqu'il est utilisé en tant que biocarburant, le biogaz doit subir un certain nombre de procédures destinées à le purifier.

Le digesteur produit en effet du biogaz constitué de 45 à 65% de méthane, le reste étant majoritairement du CO₂. Afin d'être conforme aux spécifications requises pour l'utilisation en tant que carburant, le biogaz généré doit avoir un contenu en méthane d'au moins 97% (Ahman, 2010). Le dioxyde de carbone doit être éliminé du produit initial afin d'en améliorer son efficacité énergétique. Le sulfure d'hydrogène doit également être enlevé car il peut accroître la corrosion en présence d'eau. En outre, le biogaz doit aussi être pressurisé jusqu'à environ 300 bars afin de pouvoir être stocké (Gerbinet, 2011). Toutes ces étapes entraînent un coût supplémentaire pour l'utilisation du biogaz en tant que biocarburant, ce qui permet, entre autres, d'expliquer le faible degré de développement de cette filière de valorisation.

4. DIMINUTION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE LA VILLE DE LIÈGE

Deux solutions principales seront étudiées dans ce travail. La première consiste en la diminution de la demande de transport vers le Sart-Tilman. La seconde se concentre sur l'utilisation d'un autre type de carburant pour les bus de la ligne 48, ligne principale utilisée par les étudiants pour relier le centre-ville et les amphithéâtres universitaires.

4.1. RELOCALISATION DES GRANDS AMPHITHÉÂTRES

Commençons notre analyse par la possible relocalisation des grands amphithéâtres, actuellement situés au Sart-Tilman, au centre-ville.

Afin d'étudier les impacts environnementaux et économiques d'une telle option, il est nécessaire de déterminer, dans un premier temps, le nombre d'étudiants concernés par les trajets quotidiens entre le centre-ville et le Sart-Tilman. Selon un sondage réalisé en janvier 2010 par la Commission d'Etudes et de gestion de la Mobilité et de l'Urbanisme de l'Université de Liège (CEMUL), environ 50% des étudiants qui se rendent au Sart-Tilman utilisent le bus comme moyen de transport. Parmi ces utilisateurs des bus, 28% empruntent la ligne 48, ce qui représente environ 2800 élèves.

L'objectif de cette section est de déterminer l'impact sur les transports d'une relocalisation des grands amphithéâtres. Ces derniers sont principalement utilisés par les étudiants de premier, deuxième et troisième Bachelier. Il faut dès lors déterminer la proportion de ces étudiants de Bachelier, par rapport au nombre total d'étudiants, pour trouver le nombre d'individus qui fréquentent les grands amphithéâtres et utilisent la ligne 48 lors de leurs déplacements. Pour ce faire, nous nous basons sur la proportion d'élèves en Bachelier à HEC-ULg, qui est de plus ou moins 57% (HEC-ULg, 2012).

Si nous admettons que cette proportion s'applique dans chacune des facultés de l'Université, environ 1600 étudiants suivant leurs cours dans les grands amphithéâtres utilisent la ligne de bus 48.

Pour évaluer les émissions de CO₂ économisées par la relocalisation des amphithéâtres au centre-ville, nous nous basons sur les chiffres de consommation moyenne des autobus. Selon les TEC, un bus diesel de type simple consomme en moyenne 45 litres au 100 km.

La quantité de CO₂ générée par la combustion d'un litre de diesel est déterminée sur base de l'équation chimique de combustion suivante : $2 \text{C}_{16}\text{H}_{34} + 49 \text{O}_2 \rightarrow 32 \text{CO}_2 + 34 \text{H}_2\text{O}$.

La masse molaire du CO₂ étant de $1 \cdot 12 + 2 \cdot 16 = 44$, une mole consommée d'hexadécane (diesel) rejette donc $16 \cdot 44 = 704$ grammes de CO₂. Sachant que la masse molaire du C₁₆H₃₄ est de 226 grammes par mole, on peut déterminer qu'un gramme de diesel consommé produit environ 3,11 grammes de CO₂. Finalement, la masse volumique du diesel, qui est de 0,85kg/litre, permet de déterminer que la quantité de CO₂ émise lors de la combustion d'un litre de diesel est de $3,11 \cdot 850$, soit 2.643 grammes ou 2,64 kg.

Puisque la consommation d'un litre de diesel produit 2,64 kg de CO₂, on peut, sur base d'une consommation de 45 litres aux 100 km, évaluer les émissions de CO₂ à environ 1,19 kg par kilomètre. La plus grande partie des étudiants se déplace aux heures de pointe, entre 7h et 9h le matin ou entre 16h et 18h le soir, heures auxquelles le taux de remplissage des bus est de 100%. Un bus de type simple a une capacité de maximum 100 personnes. A un taux de remplissage maximum, on peut donc attribuer une émission de 12 grammes de CO₂ par passager, pour chaque kilomètre parcouru.

Dans notre cas, le trajet effectué correspond à celui de la ligne de bus 48, qui relie la place Saint-Lambert (Opéra) au Sart-Tilman (Boulevard du Rectorat). Ces deux destinations sont séparées par une distance de 15 kilomètres. Nous faisons l'hypothèse que les étudiants effectuent ce trajet deux fois par jour (aller-retour). Chaque étudiant réalise donc un parcours en bus de 30 kilomètres par jour. Si l'on estime le nombre de jours d'enseignement par an à environ 180, les émissions de CO₂ évitées se monteraient à 65 kg de CO₂ par an et par étudiant. Si l'on multiplie ce chiffre par le nombre d'étudiants qui proviennent du centre-ville et prennent le bus pour monter au Sart-Tilman, l'économie théorique se chiffre à 104.000 kg ($1600 \cdot 65$) de CO₂ par an. Cette estimation correspond aux émissions de CO₂ évitées si l'ensemble des bus nécessaires au transport des étudiants de l'Université étaient supprimés.

Ce chiffre doit cependant être considéré avec prudence. En effet, la diminution du nombre d'étudiants utilisant la ligne 48 ne signifie pas automatiquement la suppression de l'ensemble des bus circulant sur cette ligne. Ces derniers continueront donc à émettre une certaine quantité de CO₂, qu'il faudra déduire des 104.000 kg de CO₂ économisés par an.

En outre, ces conclusions sont limitées au déplacement des étudiants qui utilisent les transports en commun de la ville de Liège (bus) pour se rendre jusqu'aux amphithéâtres du Sart-Tilman, à partir du centre-ville. Les calculs ne prennent pas en considération l'impact d'une relocalisation sur les déplacements des autres élèves. Pour les étudiants en provenance de l'extérieur de Liège, par exemple, l'impact écologique pourrait s'avérer négatif, à cause de la possible augmentation du nombre de kilomètres à parcourir en voiture, afin d'atteindre les amphithéâtres du centre-ville. A contrario, dans le cas où ces étudiants choisiraient de remplacer leur voiture par l'utilisation d'autres transports en commun pour atteindre le cœur de Liège, l'impact écologique des déplacements serait d'autant plus réduit. Toutes ces possibilités démontrent l'importance d'étudier l'impact ou non sur la congestion du centre d'une relocalisation des amphithéâtres. Par conséquent, la congestion doit également être prise en compte, puisque l'importance de cette dernière influence directement les émissions de CO₂.

La relocalisation des grands amphithéâtres dans le centre-ville pose également la question de la capacité d'infrastructures disponible dans le centre de Liège. Les anciens cinémas de l'Opéra ont été rachetés par l'Université afin d'être transformés en salle de cours, pouvant accueillir environ 1.100 étudiants (L'Avenir, 2011). Ces derniers pourraient dès lors être déduits du nombre de places nécessaires à l'accueil des étudiants de premier, deuxième et troisième Bachelier. Il reste néanmoins encore 8.900 (10.000-1.100) places à trouver dans le centre-ville ce qui, de prime abord, ne semble pas être chose aisée.

Enfin, la volonté de déplacer les amphithéâtres entraînerait nécessairement un besoin financier assez important, que ce soit pour le rachat de bâtiments déjà existants (cinémas de l'Opéra : 1100 places qui représentent un coût de 6 millions d'euros) ou la construction de nouvelles infrastructures.

De plus, la construction ou la réhabilitation des bâtiments dans le centre-ville seraient également une source supplémentaire d'émissions de CO₂. Ces dernières seraient non seulement liées à l'utilisation des matériaux nécessaires à la construction, mais également à l'énergie utilisée pour remettre en état ou construire un nouveau bâtiment.

Les émissions de CO₂ liées à un bâtiment sont d'une part générées par sa construction, cependant c'est l'aspect exploitation (chauffage par exemple) qui est responsable de la majorité des émissions. Selon le groupe Bouygues Construction (2012), « 40% des émissions

de CO₂ d'un bâtiment sont liées à la construction, 60% à l'exploitation (RT 2005¹, durée de vie de trente ans, hors déplacement des utilisateurs) ». C'est le résultat moyen obtenu après 330 bilans carbone réalisés avec CarbonEco® (logiciel de bilan carbone développé par Bouygues sur base de la méthode de l'ADEME) en 2009. Les émissions générées suite à l'exploitation des bâtiments existent déjà au niveau des constructions du Sart-Tilman. Des émissions supplémentaires ne sont donc pas à prendre en considération pour cette partie exploitation. Au contraire, de meilleures isolations ou des techniques de chauffage plus modernes et efficaces permettraient une réduction des émissions par rapport à la situation actuelle.

4.2. SUBSTITUTION PAR DES BUS AU BIOGAZ

Pour toutes ces raisons, il est intéressant d'étudier d'autres types de solutions, comme par exemple, l'utilisation d'un carburant différent pour le déplacement des autobus dans la ville de Liège. Rappelons qu'un autobus hybride est actuellement en phase de test dans la région liégeoise.

Une autre possibilité à envisager est l'utilisation de bus fonctionnant au biogaz pour les véhicules desservant la ligne 48 (qui relie le centre-ville au Sart-Tilman).

4.2.1. DÉFINITION

Le biogaz est un biocarburant fabriqué à partir de déchets organiques. Il est le produit d'une réaction de biométhanisation. Cette dernière consiste en une série d'opérations de dégradation biologiques de matières organiques, dans des conditions anaérobies, c'est-à-dire en absence d'oxygène (Léonard, 2002). La réaction de biométhanisation donne lieu à la production de biogaz et d'un digestat (résidu) et comprend quatre phases principales :

- 1) L'hydrolyse, qui permet de transformer des matières organiques complexes en molécules plus simples tels que des sucres, des alcools ou des acides aminés.
- 2) La fermentation, au cours de laquelle les molécules simples, obtenues lors de la première étape, sont transformées en hydrogène et en acides gras volatils.

¹ Réglementation thermique française 2005. Cette réglementation prévoit le respect de caractéristiques thermiques minimales dans les nouvelles constructions.

- 3) L'acétogénèse, qui consiste en la transformation des acides gras volatils en acide acétique (vinaigre), hydrogène et dioxyde de carbone, par des bactéries dites acétogènes.
- 4) La méthanogénèse, étape pendant laquelle s'effectue la transformation de l'acide acétique en méthane et dioxyde de carbone par des bactéries méthanogènes. L'hydrogène formé précédemment est consommé lors de cette dernière étape.

La proportion des éléments contenus dans le biogaz produit est variable et dépend notamment de la composition des déchets. Le biogaz est composé, en moyenne, de 50 à 80% de méthane (CH₄), de 15 à 45% de dioxyde de carbone (CO₂), de 5% d'eau (H₂O) et de 0 à 2% d'hydroxyde de soufre (H₂S).

Le digestat obtenu lors de la fabrication de biogaz ne constitue pas un simple déchet. Il peut être valorisé en tant que fertilisant efficace dans le domaine agricole. Ses propriétés agronomiques sont semblables à celles d'autres composants comme par exemple la matière obtenue après compostage. Le digestat peut être directement épandu ou être traité et séché pour rendre son utilisation plus facile et plus efficace.

Après une brève introduction à la méthode de fabrication et aux capacités énergétiques du biogaz, nous nous attarderons sur le potentiel de production dans la région liégeoise. Ensuite, notre analyse se poursuivra par l'étude des principaux avantages et inconvénients d'un bus fonctionnant au gaz naturel pour véhicule (GNV) et au biogaz. Les avantages des bus roulant au GNV sont également d'application pour les bus fonctionnant au biogaz, puisque ces derniers représentent une forme particulière d'utilisation, dans laquelle le gaz est généré à partir de déchets organiques (déchets ménagers, boues de stations d'épuration, boues de fosses septiques, déchets agricoles).

4.2.2. MÉTHODE DE FABRICATION

Comme déjà mentionné ci-dessus, le substrat utilisé pour produire le biogaz peut être très diversifié. Dans le cas qui nous intéresse, les matières premières utilisées pour la fabrication de biogaz sont les déchets verts et la partie fermentescible des déchets ménagers. En effet, notre étude est basée sur la possible valorisation des déchets traités par l'intercommunale INTRADEL. Le processus de fabrication du biogaz commence par le traitement des déchets organiques. Ceux-ci sont broyés et servent ensuite à alimenter le

digesteur. Ce dernier est généralement en mouvement, afin de faciliter le dégagement du biogaz. Le biogaz est finalement récolté et si nécessaire encore traité.

Le traitement du biogaz a notamment lieu quand celui-ci est employé dans le cadre d'utilisation qui nous intéresse, c'est-à-dire la filière carburant. L'objectif de ce traitement est d'éliminer le sulfure d'hydrogène afin d'atteindre les concentrations tolérées par les motoristes. La teneur en siloxanes, composés chimiques gazeux destructeurs des moteurs à gaz, et en composés fluorés et chlorés est aussi réduite. Enfin, une opération de purification est également pratiquée afin d'augmenter la concentration en méthane du biogaz (Léonard, 2010).

La biométhanisation peut être réalisée en voie sèche ou en voie humide. On parle de voie sèche lorsque la matière première présente un taux d'humidité inférieur à 75%. La voie humide peut être utilisée en diluant la matière première avec de l'eau. Cependant, lorsque le coût de ce prétraitement est trop élevé, la voie sèche lui est préférée. C'est entre autres le cas lors du traitement de la fraction fermentescible des déchets ménagers.

4.2.3. CAPACITÉ ÉNERGÉTIQUE DU BIOGAZ

La composition du substrat utilisé pour la fabrication de biogaz influence la quantité qui en est produite par unité de matière organique. La matière première utilisée détermine également la proportion des différents gaz contenus dans le biogaz (méthane, dioxyde de carbone, autres). Plus un substrat est riche en carbone et en hydrogène, plus la quantité produite de méthane est importante.

L'unité de volume conventionnellement utilisée pour le biogaz est le normal mètre cube (Nm³). Le Nm³ est une unité de volume standard qui permet de comparer entre elles des mesures effectuées dans des conditions différentes. Un Nm³ de gaz correspond à un mètre cube de gaz dans des conditions normales de températures et de pression, c'est-à-dire à une température de zéro degré Celsius et à une pression d'une atmosphère (Dictionnaire Environnement, 2012).

La capacité calorifique d'un Nm³ de biogaz dépend principalement de la quantité de méthane dont il est constitué. Du biogaz contenant 60% de méthane a un pouvoir calorifique de 22 MJ par Nm³. Cela correspond à l'équivalent de 0,58 l de diesel, de 0,56 l de mazout, de 0,65 l de fuel, de 0,21 m³ de propane ou de 0,7 kg de charbon (Léonard, 2002).

4.2.4. ÉTAT DES LIEUX DES MATIÈRES PREMIÈRES POUR LA FABRICATION DE BIOGAZ À LIÈGE

Avant d'étudier les avantages et inconvénients du biogaz, un état des lieux du potentiel de production à Liège doit être déterminé.

Rappelons au lecteur que la volonté d'utilisation du biogaz en tant que carburant dans les autobus à Liège tire son origine de la possible valorisation des déchets organiques collectés par l'intercommunale INTRADEL. Cette section est par conséquent consacrée à l'estimation des quantités de biogaz qui pourraient être produites à partir des déchets collectés dans la région liégeoise.

Les déchets intéressants pour la production de biogaz sont les déchets verts et la partie fermentescible des déchets ménagers, c'est-à-dire les déchets organiques. En 2009, environ 3.040 tonnes de déchets organiques et 58.000 tonnes de déchets verts ont été collectés par l'intercommunale (INTRADEL, 2009). A partir de ces références, il est possible d'établir la quantité maximale de biogaz que ces déchets permettraient de produire.

Comme déjà expliqué dans la section précédente, la nature du substrat utilisé impacte directement la quantité de biogaz produite par unité de matière organique. Une étude réalisée par Pöschl et al. (2010) détermine les rendements de biogaz dans une unité de production de petite échelle, pour chaque type de substrat utilisé individuellement. Lorsque le substrat est constitué de déchets verts, une tonne de ces déchets génère une production de biogaz équivalente à une énergie de 2.385 MJ. De même, une énergie de 2.649 MJ est produite à partir d'une tonne de déchets organiques (fraction fermentescible des déchets ménagers). Ces valeurs peuvent être aisément converties en Nm^3 , sur base du pouvoir calorifique du biogaz. Ce dernier, afin d'être utilisé en tant que carburant, doit contenir un taux de méthane supérieur à 97%. Le biogaz généré est de composition chimique identique à celle du gaz naturel et possède donc un pouvoir calorifique estimé entre 37 et 44 MJ par Nm^3 (Gaz de Bordeaux, 2012), en fonction des différentes qualités de gaz. La valeur considérée dans ce travail est une moyenne des pouvoirs calorifiques minimum et maximum, c'est-à-dire 40,5 MJ/ Nm^3 . Une tonne de déchets verts génère donc 59 Nm^3 de biogaz, contre 65 Nm^3 pour une quantité équivalente de déchets organiques.

A Liège, la quantité de biogaz qui peut être potentiellement produite à partir des déchets verts est donc estimée à 3.422.000 Nm³. Les déchets organiques permettraient, quant à eux, une production d'environ 199.000 Nm³. La quantité maximale productible annuellement de biogaz est donc évaluée à 3.620.000 Nm³.

Cette production équivaut à 2.584.700 kg de biogaz. En effet, sous des conditions normales de température et de pression (0°C, 1 atm), une mole de gaz occupe 22,4 litres (déterminé par la relation des gaz parfaits : Annexe 5). Un normal mètre cube comprend donc 44,6 moles de méthane. La masse molaire ce de dernier (16 grammes) permet d'établir que un mètre cube de gaz pèse 0,714 kg.

En se basant sur une consommation de 51,75 kg aux 100 km² et un trajet de 45.000 km par an, la production potentielle de biogaz à partir des déchets de la région liégeoise permettrait d'alimenter 110 autobus de type simple annuellement.

4.2.5. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DU BUS AU GNV

Dans le domaine du transport de personnes, les points positifs liés à l'utilisation du gaz naturel, par rapport au diesel, sont nombreux.

Une étude française réalisée par Rabl (2002) établit notamment la comparaison entre le cycle de vie d'un bus au gaz naturel et d'un bus au diesel. L'auteur a pris en considération les coûts externes liés au réchauffement climatique (production de CO₂ et de CH₄), à l'impact sur la santé humaine, aux dommages faits aux cultures ainsi que ceux liés aux dégâts provoqués par d'autres polluants sur certains matériaux. Après avoir monétisé la valeur totale de ces coûts, l'auteur a pu déterminer que le coût externe, exprimé en euros par kilomètre, lié à l'utilisation d'un bus au diesel représente entre deux et cinq fois celui lié à l'utilisation d'un bus au gaz naturel. Ces facteurs varient en fonction des différentes hypothèses qui sont prises par rapport à l'équipement du moteur du bus diesel (filtre à particule ou non) et à la valorisation économique d'un kg de CO₂.

Du point de vue de l'émission des polluants et de la santé, le bus au gaz naturel est donc moins nocif et moins coûteux en termes environnementaux que le bus au diesel. Il possède également d'autres avantages, notamment en ce qui concerne la pollution sonore. En

² Consommation prise en considération dans cette analyse, pour un bus de type simple fonctionnant au biogaz. Les hypothèses utilisées sont décrites dans la section « 4.4.1.1. Eléments de coûts ».

effet, un bus fonctionnant au gaz naturel génère moins de décibels qu'un bus fonctionnant au diesel. Une étude réalisée par Tzeng et al. (2005) permet notamment la comparaison entre différents types d'autobus, par rapport à un certain nombre de critères préétablis. La valeur prise par chaque critère correspond à la moyenne arithmétique des évaluations de ces critères par différents experts professionnels. La valeur attribuée au critère bruit est plus importante pour le bus au biogaz que pour le bus au diesel. Au vu de la fonction utilisée dans l'étude, ceci signifie que le bus au diesel présente un impact négatif plus important en termes de pollution sonore que le bus au gaz naturel.

D'autres aspects positifs peuvent encore être relevés lors de l'utilisation du bus au gaz naturel, notamment au niveau économique. Le premier élément à mettre en exergue est le prix unitaire du gaz naturel, nettement moins élevé que celui du diesel. Selon BeStat (SPF Economie, 2012), le prix officiel moyen (TVA incluse) à la pompe du litre de diesel 10 ppm était, pour février 2012 de 1,5311 euros par litre. Dans la réalité, les stations de distribution pratiquent des prix moins élevés. Dans une même station bruxelloise (DATS 24, 2008), le prix du diesel au 12 avril 2012 était recensé à 1,403 euros litre, alors que le prix du GNV était quant à lui de 0,89 euros par kg.

Ces prix sont exprimés dans des unités différentes, et il est dès lors essentiel de les ramener à une unité commune afin de pouvoir les comparer. Cette comparaison peut être réalisée en mettant en parallèle les coûts générés pour dégager une même quantité d'énergie, à partir de diesel ou de gaz naturel. La capacité calorifique minimale d'un Nm³ de gaz naturel est de 37 MJ/Nm³. L'utilisation de 0,97 litre de diesel (pouvoir calorifique : 38 MJ par litre) est nécessaire afin d'atteindre un dégagement d'énergie équivalent. Dans des conditions normales de température et de pression, un m³ comprend 0,714 kg de GNV. Pour obtenir une énergie de 37 MJ, un consommateur devra donc dépenser $0,714 * 0,89 = 0,64$ euro pour du GNV, contre $0,97 * 1,403 = 1,36$ euros pour du diesel. Pour une même quantité d'énergie produite, le coût d'utilisation du diesel est plus ou moins deux fois supérieur à celui de l'utilisation du GNV.

Un aspect intéressant qui peut également être pris en considération est l'existence, en Belgique, d'un réseau de distribution de gaz naturel déjà très largement développé. Le réseau de transport actuel comprend des conduites de plus de 3700 km de long, tandis que le réseau de distribution total est d'une longueur d'environ 50.000 km (Le Gaz Naturel, 2012).

Le gaz naturel possède des avantages par rapport au diesel, mais son utilisation présente également certains inconvénients.

Ces désavantages se situent en particulier au niveau économique. Certains coûts liés à l'utilisation du gaz naturel viennent s'ajouter à l'investissement initial d'achat du bus, comme par exemple, le coût lié à l'installation d'une station de remplissage ou le coût de réaménagement de l'entrepôt afin de permettre la distribution du gaz. Ces coûts doivent toutefois être amortis sur la durée de vie de l'utilisation des installations ainsi que sur le nombre de bus au GNV en fonctionnement.

D'autres aspects négatifs sont plus sociaux et découlent notamment d'une certaine crainte dans l'utilisation des bus au gaz naturel. Le risque d'explosion est perçu de façon plus importante par les chauffeurs des autobus, par exemple, et entraîne une certaine réticence de la part de ces derniers.

Le risque encouru lors de l'utilisation du GNV n'est rationnellement pas supérieur à celui encouru lors de l'utilisation du diesel. En effet, le GNV a une température d'inflammabilité très élevée (540°C), deux fois supérieure à celle du diesel (235°C). En outre, le GNV reste à l'état gazeux quelle que soit sa température, ce qui signifie qu'il n'est pas sujet au bleve (acronyme de l'anglais Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion ; risque d'explosion consécutif à la rupture d'un réservoir contenant un liquide à une température supérieure à sa température d'ébullition à la pression atmosphérique). Ces craintes, bien que fort peu justifiées, engendrent des résistances sociales à l'implémentation du GNV comme carburant et doivent aussi être prises en considération lors du développement d'un tel projet. Une communication appropriée sur les risques réels est un des éléments qui pourrait contribuer à la diminution des craintes et ainsi rationaliser les peurs.

En outre, cette réticence envers le gaz naturel peut être contrebalancée par des éléments positifs liés à l'utilisation du GNV, comme par exemple une fierté des chauffeurs de conduire des véhicules plus respectueux de l'environnement, et de contribuer ainsi à sa préservation.

4.2.6. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DU BUS AU BIOGAZ

Comme expliqué précédemment, le biogaz est une forme particulière du gaz naturel qui se caractérise par l'utilisation de déchets organiques comme matière première à sa

fabrication. Il en résulte donc que les avantages et inconvénients cités ci-dessus pour le gaz naturel s'appliquent tout autant dans le contexte d'une utilisation de biogaz. On peut néanmoins relever quelques points positifs supplémentaires pour ce dernier.

Le premier élément, le plus important, concerne les émissions de CO₂. La combustion du biogaz a un bilan CO₂ neutre. La combustion de biogaz entraîne effectivement des émissions de CO₂, mais ces dernières ont été compensées auparavant, par l'absorption d'exactly la même quantité de CO₂ par les déchets organiques utilisés pour la fabrication du biogaz. La quantité de CO₂ absorbée correspond donc à la quantité de CO₂ émise dans l'atmosphère, ce qui permet d'éviter tout réchauffement climatique lié à une augmentation de l'effet de serre. Cette caractéristique n'est pas présente dans le cas de l'utilisation du gaz naturel, car la combustion de ce dernier a pour conséquence la libération dans l'atmosphère de CO₂ auparavant contenu dans les couches inférieures de la terre.

Le second avantage est lié au caractère renouvelable du biogaz. Il offre une solution alternative dans la lutte actuelle contre la dépendance à l'énergie fossile. En outre, grâce à la quantité importante de déchets disponibles, le biogaz garde un fort potentiel de développement. En Suède par exemple, la production actuelle de biogaz représente environ 5 pétajoules alors que sa capacité totale est estimée à environ 50 pétajoules, soit 10 fois la quantité produite actuellement (Lantz et al., 2007). De plus, grâce à son caractère renouvelable et à son bilan neutre en termes de CO₂, le biogaz fait partie des moyens qui permettront d'atteindre deux des objectifs 20-20-20 de l'Union Européenne concernant l'énergie :

- 1) Une réduction des gaz à effet de serre d'au-moins 20%, par rapport aux valeurs repères enregistrées pour l'année 1990.
- 2) 20% de la consommation énergétique provenant de ressources renouvelables.

Le troisième objectif vise une réduction de 20% dans la consommation des énergies primaires, par le biais de l'amélioration de l'efficacité énergétique (Commission Européenne, 2010).

Puisqu'il est produit à base de déchets, le biogaz permet aussi une meilleure gestion de ceux-ci. En effet, la production de biogaz est basée sur la valorisation économique et environnementale des déchets. Elle offre dès lors une opportunité de réduction et de traitement des déchets organiques, tout en étant source de revenus économiques.

En comparaison avec d'autres types de biocarburants, comme par exemple le biodiesel ou le bioéthanol, la production de biogaz n'entre pas en concurrence avec les terrains consacrés à la production alimentaire. Ce dernier point est une caractéristique importante à prendre en compte dans le contexte actuel, où, encore en 2010, 925 millions de personnes étaient sous-alimentées (FAO, 2010).

Au niveau économique, l'utilisation de biogaz permet d'éviter la dépendance aux fluctuations de prix des énergies fossiles. Un avantage réside également au niveau des coûts de stockage. Introduit dans le réseau, le biogaz pourrait y être directement stocké, ce qui n'impliquerait pas de coût supplémentaire à ce niveau. Enfin, vu le réseau de distribution de gaz naturel déjà bien établi, et dans le cas où les zones de production seraient assez proches de ces conduites, aucun coût supplémentaire ne serait nécessaire afin d'assurer le transport en toute sécurité du biogaz. Ce dernier peut en effet être mélangé au gaz naturel sans aucun problème puisque, d'un point de vue chimique, il lui est tout à fait identique.

4.2.7. EXPÉRIENCES PRÉCÉDENTES LIÉES AUX BUS AU BIOGAZ

Le système de bus fonctionnant au biogaz a déjà été utilisé dans un certain nombre d'endroits dans le monde. On peut notamment citer, en exemple, la ville de Berne en Suisse, où l'opérateur de transport public Bernmobil a décidé d'échanger 70 anciens bus diesel contre des bus au biométhane. L'objectif actuel est de remplacer les 30 derniers bus pour que toute la flotte fonctionne au gaz.

A Göteborg et Linköping en Suède, on observe une volonté d'utiliser le biogaz comme carburant complémentaire au gaz naturel. Pour ce faire, une proportion de biogaz est injectée dans le réseau déjà existant de gaz naturel. L'objectif est d'atteindre 300 bus roulant au biogaz ainsi que de développer la production de biogaz à injecter dans le réseau, aussi bien pour les véhicules privés que pour les véhicules publics.

A Stockholm en Suède, 30 bus roulaient déjà au biométhane en 2007. Enfin, l'exemple le plus proche de Liège est la ville de Lille en France, dont environ 73% de la flotte des bus desservant la ville est constituée de bus au biogaz (Transpole, 2012). La ville est également active dans la production de biogaz à partir de la méthanisation des boues usées des stations d'épuration.

Toutes ces expériences menées en Europe sont positives au niveau de leur résultat. Les flottes de bus qui sont remplacées par des systèmes de propulsion au biogaz sont maintenues en utilisation après leur phase de test. Les différentes villes qui ont recours aux bus au biogaz tentent d'augmenter encore plus le nombre de bus propulsés grâce à ce carburant. Ces projets sont donc non seulement positifs pour l'environnement mais également techniquement et technologiquement viables.

4.3. MÉTHODOLOGIE

Quelques notions particulières doivent être définies préalablement à la présentation des développements suivants.

Les analyses qui seront effectuées dans les prochaines sections sont basées sur le principe de l'analyse du cycle de vie. L'objectif est de déterminer les coûts économiques et environnementaux des bus, sur base de l'ensemble des activités qu'ils génèrent tout au long de leur vie. Cette méthode de travail permet une comparaison globale entre deux éléments qui n'impactent pas forcément l'environnement à des moments identiques. Elle permet aussi une comparaison équitable entre les différents types de carburant et assure une certaine objectivité des résultats.

La revue de la littérature nous a permis d'identifier certains éléments essentiels au développement de nos idées. Le premier consiste en l'établissement précis des différents impacts à prendre en considération dans l'analyse. Nous rappelons au lecteur que l'objectif principal visé reste la diminution de l'impact au niveau réchauffement climatique, par le biais de la réduction des émissions de gaz à effet de serre (principalement CO₂). Cependant, notre analyse se concentrera également sur les émissions qui ont un impact sur deux autres catégories :

- 1) Acidification (principalement influencée par les émissions de SO₂)
- 2) Santé humaine (principalement influencée par les émissions de particules, de NO_x et de Composés Organiques Volatils (COV). Ces deux derniers composants interviennent dans la formation du smog (ozone troposphérique), qui peut altérer les tissus biologiques et les cellules, et notamment réduire la fonction pulmonaire lors de la pratique d'un sport) (Santé Canada, 2006).

Les activités, liées au cycle de vie d'un bus et à prendre en considération, seront déterminées par leur impact et l'intensité de leur influence sur les différentes catégories d'objectifs étudiées.

Dans ce travail, nous tenterons également d'évaluer en termes monétaires les coûts externes engendrés par l'utilisation de l'une ou l'autre des technologies, afin de pouvoir comparer les différents impacts dans une unité commune.

Toutes ces étapes nous permettront d'établir le coût global d'utilisation d'un bus au biogaz et d'un bus au diesel, en reprenant aussi bien les aspects économiques que les aspects environnementaux.

Enfin, nous analyserons nos différents résultats et discuterons les points critiques du raisonnement. Une notion importante à développer est la performance énergétique des différentes technologies. En effet, la performance d'une technologie de combustion impacte directement les émissions liées à une certaine distance. Un moteur avec un rendement meilleur permet, pour la même quantité consommée de carburant, de parcourir une plus grande distance et donc de diminuer la quantité d'émission par unité de distance. La technologie de combustion est encore plus importante dans le cas spécifique du GNV et du biogaz. Puisque que l'élément principal du mélange est le méthane, la partie de carburant non brûlé, qui se retrouverait donc potentiellement dans les gaz d'échappement, contribuerait d'autant plus au réchauffement climatique. Le méthane est, en effet, un composé dont le potentiel de réchauffement climatique est 23 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone (Smitz, 2010).

La prochaine section de ce travail reprend l'analyse des éléments de coûts économiques et environnementaux générés par l'utilisation d'un bus fonctionnant au biogaz et au diesel.

4.4. COMPARAISON ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE ENTRE UN BUS AU BIOGAZ ET AU DIESEL

4.4.1. COMPARAISON ÉCONOMIQUE ENTRE UN BUS AU BIOGAZ ET UN BUS AU DIESEL

4.4.1.1. Eléments de coûts

L'objectif de cette étude est d'effectuer une comparaison économique et environnementale entre l'utilisation d'un bus fonctionnant au diesel et l'utilisation d'un bus fonctionnant au biogaz.

Nous allons commencer notre analyse par lister et établir la valeur des différents coûts économiques intervenant dans l'utilisation d'un bus au diesel. Les informations ci-dessous nous ont été communiquées par les TEC Liège-Verviers.

La période de temps considérée est la durée de vie moyenne d'un autobus. Elle est estimée à une vingtaine d'années et correspond à un kilométrage de 45.000 km par an pour un bus de type simple et de 40.000 km par an pour un bus de type double (bus articulé).

Les différents coûts à prendre en considération pour un bus diesel sont les suivants :

- 1) Coût d'achat du bus
- 2) Coût d'utilisation du bus
 - a. Coûts liés à la consommation de carburant
 - b. Coûts liés à la maintenance et à l'entretien du bus
- 3) Coût de recyclage du bus.

Ces coûts ainsi que leur montant sont synthétisés dans le tableau 1, en fonction du type de bus considéré (bus simple ou bus articulé).

Les coûts de carburant calculés sont basés sur les consommations moyennes des autobus de la flotte actuelle des TEC Liège-Verviers. Ces consommations de carburant ne prennent pas en compte les différents types de ligne (avec leurs arrêts et démarrages spécifiques), la puissance du moteur, le type de boîte de vitesse, l'utilisation ou non de la climatisation ou encore la technique de conduite du chauffeur. Pour ce dernier paramètre, selon des sources constructeur, des écarts de plus de 10% ont parfois été mesurés d'un chauffeur à l'autre, pour un même bus. La consommation moyenne d'un bus simple est

estimée à 45 litres aux 100 km, alors que celle d'un bus double est évaluée à 60 litres aux 100 km. Les coûts de carburants sont basés sur le prix du diesel estimé à 1,388 euros le litre³. Ces coûts sont utilisés afin de permettre une comparaison équitable et objective entre les technologies diesel et biogaz. Il est évident que les sommes réellement déboursées par les TEC pour les frais de carburants sont moins importantes. Ils bénéficient effectivement de ristournes dues à la quantité commandée (consommation de plus ou moins 100.000 litres de diesel par jour pour les bus du réseau TEC Liège-Verviers).

Tableau 1 : Liste des coûts (en euros) liés à l'utilisation d'un bus fonctionnant au diesel : type simple et type double.

<u>Type de coût</u>	<u>Montant - Bus Simple</u>	<u>Montant - Bus Double</u>
Coût d'achat du bus	250.000	300.000
Coût d'utilisation du bus	967.140	1.122.240
<i>Coût du carburant</i>	<i>562.140</i>	<i>666.240</i>
<i>Coût de maintenance</i>	<i>405.000</i>	<i>456.000</i>
Coût de recyclage du bus	Non défini	Non défini
Coût total	1.217.140	1.422.240

Le tableau 2 établit la liste des coûts liés à l'utilisation d'un bus fonctionnant au biogaz. Les informations relatives au coût du carburant sont basées sur les données de consommation moyenne fournies par la société IVECO, pour un bus fonctionnant au gaz naturel. Les valeurs associées au bus de type simple correspondent à celles définies par la société IVECO pour le modèle de bus Citelis 12 m CNG. Les valeurs associées aux bus doubles sont basées sur celles déterminées pour le modèle de bus Citelis 18 m CNG. Les différents coûts à prendre en considération sont les suivants :

- 1) Coût d'achat
- 2) Coût d'utilisation du bus
 - a. Coûts liés à la consommation de carburant
 - b. Coûts liés à la maintenance et à l'entretien du bus

³ Prix du litre de diesel à la station DATS Anderlecht au 23 avril 2012. Les prix utilisés pour le coût au kg du GNV proviennent également de cette même station service.

c. Coûts d'infrastructures liés à l'installation d'une station de remplissage et à la modification de l'entrepôt

3) Coût de recyclage du bus.

La méthode souhaitée d'implémentation du biogaz carburant à Liège vise à utiliser des bus fonctionnant actuellement au gaz naturel, afin de les alimenter en biogaz. Les coûts d'achat du bus pris en compte dans cette étude sont donc ceux d'un bus alimenté par un moteur au gaz. Ce choix est basé sur une volonté d'efficacité et d'adaptabilité maximale. En effet, si une rupture d'approvisionnement venait à se produire, les autobus pourraient continuer à fonctionner normalement en utilisant du gaz naturel. L'objectif est de pouvoir utiliser indifféremment du GNV ou du biogaz.

Tableau 2 : Liste des coûts (en euros) liés à l'utilisation d'un bus fonctionnant au GNG/biogaz : type simple et type double.

<u>Type de coût</u>	<u>Montant - Bus Simple</u>	<u>Montant – Bus Double</u>
Coût d'achat du bus	287.500	345.000
Coût d'utilisation du bus	989. 360	1.047.840
<i>Coût du carburant</i>	<i>465.750</i>	<i>463.030</i>
<i>Coût de maintenance</i>	<i>486.000</i>	<i>547.200</i>
<i>Coût d'infrastructure</i>	<i>37.610</i>	<i>37.610</i>
Coût de recyclage du bus	Non défini	Non défini
Coût total	1.276.860	1.392.840

Les données concernant les coûts d'achat d'un bus au gaz naturel sont classées confidentielles par les sociétés constructrices des autobus. Malgré les différentes demandes réalisées auprès des constructeurs, nous n'avons pu obtenir ces données relatives aux prix. Le site internet Transbus (2009) estime cependant que le coût d'achat d'un bus fonctionnant au gaz naturel pour véhicule est en moyenne 38.000 euros plus cher que celui de son équivalent diesel. Les chiffres fournis par les TEC renseignent une valeur d'achat de 250.000 euros pour un bus de type simple fonctionnant au diesel. Un surcoût d'environ 15% du prix du bus diesel doit dès lors être attribué au coût d'achat d'un bus au gaz naturel. Les coûts d'achats d'un bus au gaz naturel, de type simple et de type double, ont été calculés sur base de cette hypothèse.

Les coûts de carburant sont calculés à partir des consommations moyennes fournies par la société IVECO. Selon les constructeurs, un bus de type simple nécessite 45 kg de gaz naturel afin de réaliser un parcours de 100 km. Un bus de type double a, quant à lui, besoin de 59 kg de gaz naturel pour réaliser le même parcours. Cette consommation est valable pour du gaz naturel pour véhicule. Comme déjà développé dans les sections ci-dessus, la pouvoir calorifique du biogaz est similaire à celui du GNV. A pouvoir calorifique égal, la consommation de biogaz correspond dès lors à la consommation de GNV.

Cependant, la consommation annoncée par les constructeurs est en général moins importante que la consommation réelle. Lors de notre recherche d'informations pour un bus de type simple, la société IVECO nous a en effet annoncé une consommation de 39 litres aux 100 km pour la technologie diesel alors que les TEC, sur base des consommations effectives, nous ont renseigné une valeur de 45 litres aux 100 km. Par souci de rationalisation, nous augmenterons dès lors les consommations théoriques obtenues pour le GNV de 15%, cette augmentation correspondant à la différence entre les valeurs annoncées et effectives pour la technologie diesel. Le même principe est utilisé pour les bus de type double. Les consommations réelles sont donc estimées à 1,09 fois les consommations annoncées. Sous ces conditions, la consommation des bus de type simple est évaluée à 51,75 kg aux 100 km, contre 64,31 kg pour les bus de type double.

Puisque, dans le cadre de ce travail, nous ne disposons pas du prix exact au kilogramme du biogaz, nous supposons son coût proche de celui du GNV. Afin de ne pas sous-estimer le coût du biogaz, nous prenons une marge de sécurité de 10% sur le prix au kilo et estimons dès lors le prix du biogaz à 1 euro par kg.

Les coûts d'entretien d'un bus au GNV sont plus importants que ceux d'un bus au diesel. La société IVECO nous a renseigné un coût de maintenance d'environ 20% supérieur pour le bus au gaz, par rapport à un bus classique fonctionnant au diesel. Cependant, ces différents coûts peuvent varier d'une situation à l'autre et dépendent de beaucoup de paramètres. Dans cette analyse nous considérons donc un surcoût de 20% pour le bus au biogaz. Cependant, afin d'être aussi précis que possible, nous analyserons également l'effet d'une variation plus faible ou plus importante de ce coût sur les conclusions tirées. Cette analyse de sensibilité sera développée dans la section suivante, lors de la discussion des résultats.

Les coûts liés à l'installation d'une station de remplissage et à la modification de l'entrepôt doivent être pris en considération mais répartis entre le nombre de bus utilisant le mode de propulsion au gaz. Selon un rapport du département américain des transports (2007), les coûts de modification du dépôt peuvent être estimés à 875.000 dollars, soit 663.840⁴ euros, alors que l'installation d'une station de remplissage au gaz revient à environ 2.000.000 de dollars, soit 1.517.460 euros. Les coûts totaux d'infrastructures sont donc de 2.181.300 euros. Les TEC Liège-Verviers utilisent actuellement 648 autobus (TEC Liège-Verviers, 2012), fonctionnant exclusivement au diesel. Ces bus sont répartis sur 11 dépôts. Dans chacun des dépôts de la zone se trouve une station de remplissage unique pour le carburant. Cela signifie donc que les 648 autobus sont alimentés à partir de 11 stations de remplissage. Par conséquent, une station est utilisée en moyenne par 58 autobus. Nous supposons que le même taux d'attribution peut être pris en considération pour l'installation d'une station de distribution de gaz. Le coût total de l'achat, de l'installation de la station, et du réaménagement des dépôts est dès lors à répartir entre 58 autobus. C'est sur cette base qu'a été établi le calcul des coûts liés aux infrastructures de distribution du carburant. Le coût à attribuer à chaque autobus est donc de 37.610 euros.

Les coûts de recyclage sont difficiles à évaluer. Cependant, il n'existe pas de différence notable entre les quantités et types de matériaux nécessaires à la fabrication d'un bus fonctionnant au gaz ou au diesel, qui justifierait une inégalité importante des coûts lors du recyclage des bus. Les coûts de recyclage sont donc fort similaires et nous pouvons, par conséquent, ne pas en tenir en compte dans l'analyse comparative.

4.4.1.2. Conclusions

Le tableau 3 synthétise les coûts économiques globaux liés à l'utilisation d'un bus de type simple et de type double, utilisant une technologie biogaz ou diesel.

Tableau 3 : Coûts économiques totaux (en euros) des bus de type simple et double, fonctionnant au biogaz ou au diesel.

	Diesel	Biogaz	Ecart
Type simple	1.217.140	1.276.860	+ 5%
Type double	1.422.240	1.392.840	- 2%

⁴ 1 USD = 0.758676 EUR, taux de change au 23 avril 2012.

En ce qui concerne le bus de type simple, le coût total d'utilisation sur l'intégralité du cycle de vie est moins élevé pour le bus au diesel que pour le bus au biogaz. La différence obtenue sur base de nos données est de 5%. Les surcoûts générés lors de l'utilisation du bus au biogaz sont les coûts de maintenance ainsi que les coûts d'amortissement de l'installation d'une station de distribution de gaz (coûts d'infrastructures). Les coûts de carburant sont, quant à eux, moins élevés lorsque du biogaz est utilisé. Bien que le rendement de la technologie au biogaz soit moins élevé que celui de la technologie au diesel (et que donc le bus au biogaz consomme plus que le bus au diesel : voir la discussion des résultats), le prix unitaire du biogaz, moins élevé que celui du diesel, permet une réduction conséquente (20%) des coûts de carburants sur les 20 années d'utilisation du bus.

Le bus de type double présente une tendance inverse à celle du bus de type simple. Le bus au biogaz revient dans ce cas moins cher que le bus au diesel. Une différence de 2% entre les deux technologies est à considérer, en faveur du bus au biogaz. Cette différence peut être expliquée par le coût du carburant, 40% plus élevé pour le diesel que pour le biogaz. Ces conclusions sont d'une part basées sur le coût unitaire du biogaz, moins élevé que celui du diesel, et d'autre part sur les consommations considérées des deux bus. Les données concernant le biogaz proviennent des constructeurs des autobus. Nous leur avons ensuite attribué un facteur correctif afin de les ajuster au mieux aux consommations réelles. Il se peut cependant que ces corrections ne soient pas suffisamment importantes dans le cadre du bus de type double. Cette dernière constatation pourrait expliquer le coût moins important du bus au biogaz, par rapport au bus au diesel. En effet, le facteur de correction appliqué aux bus de type double est moins élevé (9%) que celui appliqué aux bus de type simple (15%).

4.4.2. COMPARAISON ENVIRONNEMENTALE ENTRE UN BUS AU BIOGAZ ET UN BUS AU DIESEL

4.4.2.1. Description des phases principales considérées

Le cycle de vie d'un bus est schématisé par la figure 1. L'analyse du cycle de vie de chacun des deux modes de fonctionnement est constituée des éléments principaux suivants :

- 1) Construction du bus
- 2) Carburant ante utilisation
- 3) Utilisation du carburant
- 4) Recyclage du bus.

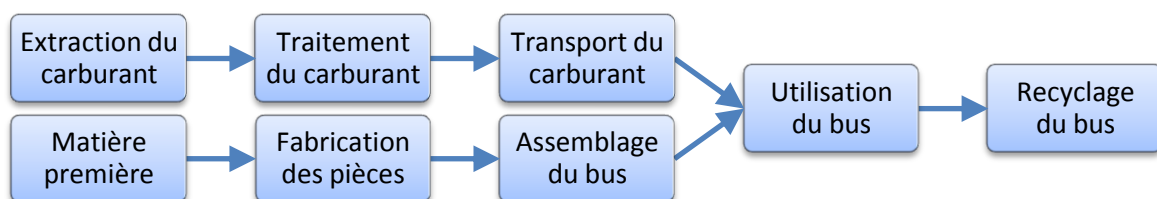
La phase de construction du bus reprend tous les éléments liés à la fabrication de ce dernier. Sont considérées comme parties intégrantes de cette phase, les matières premières utilisées ainsi que toutes les opérations génératrices d'éléments potentiellement nocifs pour l'environnement et la santé humaine.

La phase carburant ante utilisation consiste en l'extraction de ce dernier, son traitement afin d'être utilisé dans un moteur et son transport jusqu'au lieu d'utilisation. Dans le cadre de l'utilisation du biogaz, le contenu de cette seconde partie du cycle de vie est notamment influencé par la performance énergétique du réseau de distribution.

La phase utilisation du carburant reprend simplement les émissions produites lors de l'utilisation du diesel ou du biogaz dans un moteur. Les éléments qui s'y retrouvent sont le résultat de la combustion du carburant lors des déplacements effectués par les autobus. Le rendement des moteurs diesel et au gaz sont pris en considération dans cette partie de l'analyse.

Enfin, la phase de recyclage regroupe les émissions dues au traitement en fin de vie du bus. Ce dernier est recyclable à environ 75% (majoritairement les composés métalliques), selon un procédé de recyclage similaire à celui d'une voiture particulière. En fin de vie, un bus peut aussi être revendu en local, voire même être transféré vers des marchés de l'occasion plus éloignés (Afrique). Cependant, les autobus en fin de vie restent difficiles à exporter, surtout à cause de leur taille et de l'espace qu'ils utilisent lorsqu'ils sont transportés, par exemple en bateau.

Figure 1 : Etapes du cycle de vie d'un autobus.



4.4.2.2. Analyse du cycle de vie des émissions d'un bus au biogaz et d'un bus au diesel

4.4.2.2.1. Phase de construction du bus

Trois catégories génératrices d'émission sont à identifier dans le cadre de la réalisation de cette phase :

- 1) Matière première
- 2) Fabrication des pièces
- 3) Assemblage des composants du bus.

Dans la littérature, aucune donnée concrète liée aux émissions générées lors de la fabrication des autobus n'est disponible. Lorsque des comparaisons du cycle de vie de différents modes de propulsion sont réalisées, l'impact de cette phase sur les émissions est considérée identique et n'est dès lors pas prise en considération.

Toutefois, notons quand même que l'élément différenciateur principal, qui pourrait faire varier légèrement les résultats, est la quantité de matière première nécessaire à la fabrication d'un autobus. Une étude réalisée en Belgique par Pelkmans et al. (2002) établit qu'un bus au gaz naturel pèse, à vide, deux tonnes de plus qu'un bus au diesel. Sur base d'un poids moyen de 13 tonnes pour un bus diesel, cela correspond à une variation de 15%. Cette différence de poids est due à la masse supplémentaire des bonbonnes de gaz. Un bus au gaz naturel nécessite donc un peu plus de matière qu'un bus au diesel et l'impact des matières premières sur les différentes émissions peut dès lors être plus important pour le bus au GNV. Cet impact n'est cependant pas celui qui génère le plus d'émissions. Il est dès lors négligeable, en comparaison avec les émissions générées lors de l'utilisation du bus.

Les opérations de fabrication des pièces et d'assemblage sont, quant à elles, considérées comme variant peu d'un bus à l'autre (même type de châssis, mêmes sièges,...).

4.4.2.2.2. Phase ante utilisation et utilisation du carburant

Cette partie de l'analyse est basée sur les données récoltées par Ryan et Caulfield (2010), sur une flotte de 81 bus irlandais, dans la ville de Dublin. Les données collectées (vitesse moyenne, kilométrage annuel, norme EURO) ont été introduites dans le logiciel

COPERT4 afin d'évaluer les émissions annuelles liées à l'utilisation de différentes technologies. Deux groupes de bus qui nous intéressent pour cette étude sont comparés :

- 1) Le premier groupe reprend des bus diesel respectant la norme EURO V (81 bus).
- 2) Le deuxième groupe est quant à lui constitué de bus fonctionnant au biogaz (81 bus).

Le poids de ces bus est de 15 tonnes, c'est-à-dire le poids intermédiaire entre les bus de type simple (12,3 tonnes) et de type double (16,6 tonnes) utilisés dans le réseau urbain de Liège (STIB, 2012). Le substrat utilisé pour la fabrication du biogaz est constitué de déchets verts (herbe). Les résultats des différentes émissions sont synthétisés dans le tableau 4. Les valeurs de ces émissions correspondent à une flotte de 81 bus, avec un kilométrage annuel moyen de 69.012 kilomètres.

Dans cette analyse, nous accordons une attention particulière aux polluants qui impactent négativement l'environnement de trois manières principales : réchauffement climatique, acidification et santé humaine. Les différentes particules qui influencent directement ou indirectement ces catégories sont les suivantes :

- 1) Réchauffement climatique : CO₂ et N₂O
- 2) Acidification : SO₂
- 3) Santé humaine : COV, NO_x, NO₂, PM_{2,5} et PM₁₀.

Tableau 4 : Emissions annuelles en tonnes des polluants générés par une flotte de **81 bus**.

Polluant	Groupe 1 (EURO V)	Groupe 2 (biogaz)
CO ₂	7689	2809
N ₂ O	0,181	0
COV	0,24	5,59
SO ₂	0,244	0
NO _x	28,65	13,97
NO ₂	2,87	0
PM _{2,5}	0,671	0,221
PM ₁₀	0,883	0,432

Ces données sont basées sur l'hypothèse d'une neutralité carbone de 60% du biogaz produit à partir d'herbe. En effet, les différents traitements liés à la purification et à

l'augmentation de la densité en méthane du biogaz nécessitent l'utilisation d'énergie. Cette dernière est elle-même responsable d'émissions, dont l'importance varie en fonction du type d'énergie utilisé. L'efficacité de la technologie de combustion est également un autre paramètre qui détermine le pourcentage de neutralité carbone. En effet, si une nouvelle technologie permet d'utiliser moins de biogaz pour effectuer une même distance, les émissions identiques générées pendant la phase de fabrication de ce dernier peuvent être réparties sur une distance plus grande. La quantité d'émissions de CO₂ par unité de distance pèse dès lors moins lourd sur l'environnement.

A partir de ces informations, il est aisé de définir les émissions générées au kilomètre par un seul bus. Afin de ne pas alourdir inutilement l'analyse, la suite du raisonnement sera concentrée sur les émissions générées par un bus de type simple. En effet, du point de vue des émissions sur l'intégralité du cycle de vie, la seule différence à considérer est le kilométrage annuel moyen des bus. Une simple règle de trois doit dès lors être appliquée pour obtenir les valeurs correspondant aux bus de type double. Les résultats sont exposés dans le tableau 5.

Tableau 5 : Emissions en grammes par km des polluants générés par **un bus**.

Polluant	Groupe 1 (EURO V)	Groupe 2 (biogaz)
CO ₂	1375,499	502,507
N ₂ O	0,032	0,000
COV	0,043	1,000
SO ₂	0,044	0,000
NO _x	5,125	2,499
NO ₂	0,513	0,000
PM2,5	0,120	0,040
PM10	0,158	0,077

La principale conclusion liée à ces résultats est la nette diminution des émissions de CO₂ lorsque le biogaz est utilisé à la place du diesel. Elles sont réduites de 63% par rapport au groupe 1. Les émissions de CO₂ du premier groupe sont similaires à celles déterminées pour les autobus diesel, dans la section d'analyse des effets d'une relocalisation des amphithéâtres de l'Université.

Quand le biogaz est utilisé à la place du diesel, les émissions évitées sont de 873 grammes par kilomètre. Afin de calculer les émissions évitées en utilisant le biogaz, nous reprendrons ici les mêmes hypothèses que celles utilisées lors du développement de la

solution de relocalisation des amphithéâtres. Nous supposons donc un taux de remplissage des bus de 100%, une capacité de 100 personnes pour un bus de type simple, un nombre de 1600 étudiants, un trajet journalier de 30 km par étudiant, et un nombre de jours scolaires fixé à 180. Les émissions évitées annuellement se chiffrent à 75.400 kg de CO₂.

Les quantités de protoxyde d'azote (N₂O), de dioxyde de soufre (SO₂) et de dioxyde d'azote (NO₂) sont nulles lors de l'utilisation du biogaz comme carburant. Quant aux autres polluants, une diminution importante est d'application lorsque le biogaz est utilisé à la place du diesel, à l'exception des composés organiques volatiles (COV). Ces derniers jouent principalement un rôle dans la formation de l'ozone troposphérique, nocif pour la santé humaine. Les émissions de particules sont également très fortement réduites par rapport à l'utilisation de la technologie diesel.

4.4.2.2.3. Phase de recyclage du bus

Nous n'avons pas trouvé dans la littérature de données liées aux émissions de recyclage du bus. Cependant, comme Rabl (2002), nous ne voyons aucune raison pour laquelle la différence des émissions serait significative entre le bus diesel et le bus au gaz naturel. Pour cette raison, et tout comme pour la phase de fabrication du bus, nous ne considérons pas cette étape du cycle de vie dans notre analyse.

4.4.2.3. Coûts externes

Cette section concerne la valorisation des coûts externes générés par l'utilisation des autobus. L'objectif est de déterminer en unités monétaires les impacts de la pollution dus aux bus, mais non pris en charge par les utilisateurs de ces derniers. Cette méthode vise à intégrer les performances environnementales du bus dans l'analyse économique de son utilisation pendant toute sa durée de vie.

Les coûts externes sont définis en euros par unité de poids émise. Ces valeurs sont calculées sur base des impacts potentiels des polluants. Une fonction de type dose-réponse est générée afin d'estimer les conséquences, par exemple sur la santé ou le réchauffement climatique, des quantités de polluants émises dans l'air. Les réponses générées suite à cette fonction sont ensuite converties en unités monétaires. L'importance de la réponse détermine la valeur du coût. En ce qui concerne les gaz à effet de serre par exemple, le coût assigné au

méthane est plus important que celui assigné au dioxyde de carbone, au vu de son potentiel de réchauffement plus important.

Les coûts externes sont difficiles à évaluer. Différentes valeurs peuvent leur être attribuées et ces valeurs doivent dès lors être prises en considération, en tant que paramètres influençant les aspects économiques d'un projet. En outre, les méthodes d'évaluation des coûts externes évoluent continuellement. Cet impact des valeurs sur les coûts économiques d'un projet implique que les études de coûts externes requièrent des analyses de sensibilité, afin d'évaluer l'influence du coût d'un polluant sur les résultats économiques globaux. L'ADEME (2008) utilise les valeurs de coûts suivantes :

- 20 euros par tonne émise de CO₂
- 4.400 euros par tonne émise de NO_x
- 87.000 euros par tonne émise de particules.

Dans un article paru en 2002, Rabl définit également les différents coûts externes pour ces polluants. Les résultats sont les suivants :

- 29 euros par tonne émise de CO₂ (impact sur le réchauffement climatique)
- 8.600 euros par tonne émise de NO_x (impact sur l'eutrophisation et la santé humaine)
- 103.000 euros par tonne émise de particules (impact sur la santé humaine)
- 7.680 euros par tonne émise de SO₂ (impact sur l'acidification des sols)

Des différences de valeur assez importantes apparaissent pour le coût d'un même polluant. Ces dernières varient du simple au double, notamment dans le cas des NO_x. Les variations observées dépendent de la méthodologie utilisée pour qualifier et quantifier les réponses des fonctions dose-réponse ainsi que des variations et évolutions dans d'autres types de domaines. Au niveau de la santé par exemple, une cause comme l'asthme, générée par les polluants peut entraîner un coût moins important avec les années, de par la plus grande efficacité et le coût dégressif des soins apportés aux malades. D'un autre côté, ce coût peut également devenir plus important, de par l'augmentation du nombre de cas observés et donc ainsi du nombre de traitements à financer.

Les deux exemples ci-dessus ne représentent qu'une infime partie des résultats obtenus pour déterminer les coûts externes des émissions de polluants. Afin d'utiliser des

données les plus proches possible de la situation à Liège, nous considérerons des valeurs déterminées pour la Belgique.

Pour la valorisation des coûts du CO₂, nous baserons notre analyse sur une étude de l'INFRAS/IWW (2004). Cette dernière utilise le coût d'évitement pour valoriser la tonne de CO₂. Dans le contexte des émissions de dioxyde de carbone, le coût d'évitement est défini comme le coût engendré afin d'atteindre des objectifs de réductions fixés. Deux scénarios sont envisagés pour établir la valeur du coût d'évitement :

- 1) Les investissements nécessaires pour atteindre des objectifs de réduction de CO₂ de 50% entre 1990 et 2030. Cette solution entraîne la définition du coût maximum à attribuer à une tonne de CO₂.
- 2) Les investissements nécessaires pour atteindre des objectifs de réduction de CO₂ prévus par le Protocole de Kyoto (8% pour la Communauté Européenne d'ici 2012). Cette solution permet de définir le coût minimum à attribuer à une tonne de CO₂.

Les coûts engendrés par les émissions de NO_x, PM2.5, SO₂ et COV sont tirés de l'étude CAFE, réalisée pour la Direction Générale pour l'Environnement de la Commission Européenne (2005). Ce rapport établit, pour chaque pays européen, le coût de l'émission d'une tonne de polluants, sur base de quatre scénarios différents. Les coûts maximums et minimums obtenus lors de cette évaluation sont utilisés dans ce travail.

Les coûts externes liés aux particules PM10 proviennent du rapport « Handbook on estimation of external costs in the transport sector » (2008) et sont basés sur des analyses de cas réalisées lors de l'étude HEATCO (Bickel et al., 2006). Les coûts liés aux émissions de N₂O sont, quant à eux, basés sur les données recensées par Sutton et al. (2011).

Nous n'avons pas trouvé de façon directe les coûts liés aux émissions de NO₂. Nous les supposons égaux à ceux des émissions de NO_x. En effet, les oxydes d'azote sont définis comme une catégorie de polluants. Ces derniers comprennent entre autres les émissions de N₂O, NO, et NO₂ pour les plus connues d'entre elles. Les impacts de ces derniers, sur le climat et le changement climatique notamment, doivent être similaires et impliquent dès lors des coûts assez proches. Notre raisonnement est conforté par les coûts obtenus de façon directe pour les émissions de N₂O (entre 6.000 et 18.000 euros par tonne), qui sont

relativement proches de ceux récoltés directement pour les émissions de NO_x (entre 5.200 et 14.000 euros par tonne).

Les coûts liés à la pollution et au réchauffement climatique sont synthétisés dans le tableau 6.

Les valeurs monétaires attribuées aux coûts externes varient de façon très importante, d'une étude à l'autre. Pour rappel, notre analyse est basée sur trois études principales, à savoir l'étude CAFE, l'étude INFRAS/IWW et l'étude HEATCO. Nous avons choisi ces trois documents comme base de travail, parce qu'ils étaient également utilisés par le Centre Interuniversitaire d'Etude de la Mobilité (CIEM) dans leur rapport de 2010. Ce dernier consistait en l'évaluation des coûts externes liés au transport en Région Wallonne et a été rédigé pour la Direction Générale Opérationnelle des Ressources Naturelles et de l'Environnement du Service Public de Wallonie. La méthodologie d'analyse utilisée reste la même, peu importe les variations des valeurs attribuées aux coûts externes. Dans le cas où les valeurs utilisées dans ce travail s'éloigneraient de façon trop importante des coûts déterminés dans le futur, seule la substitution des chiffres actuels par les nouvelles valeurs devrait être effectuée.

Tableau 6 : Coûts en euros de l'émission d'une tonne de polluants.

Polluant	Coût minimum	Coût maximum
CO ₂	20	140
NO _x	5.200	14.000
PM2,5	61.000	180.000
SO ₂	11.000	31.000
COV	2.500	7.100
PM10	36.500	169.900
N ₂ O	6.000	18.000
NO ₂	5.200	14.000

Les coûts minimums et maximums sur l'intégralité de la durée de vie d'un bus, des polluants générés pour les deux catégories d'autobus repris dans le tableau 5 de la section « 4.4.2.2.2. Phase ante utilisation et utilisation du carburant », sont synthétisés dans les tableaux 7 et 8. Les résultats sont basés sur un kilométrage moyen de 45.000 km par an.

Tableau 7 : Coûts externes minimums (en euros) des émissions de polluants, lors de l'utilisation du carburant sur la durée de vie d'un bus de type simple.

Polluant	Groupe 1 (min)	Groupe 2 (min)
CO ₂	24.758,98	9.045,13
N ₂ O	174,85	0,00
COV	96,60	2.250,01
SO ₂	432,13	0,00
NO _x	23.986,17	11.695,87
NO ₂	2.402,80	0,00
PM2,5	6.590,00	2.170,48
PM10	5.189,03	2.538,69
TOTAL	63.630,56	27.700,17

Tableau 8 : Coûts externes maximums (en euros) des émissions de polluants, lors de l'utilisation du carburant sur la durée de vie d'un bus de type simple.

Polluant	Groupe 1 (max)	Groupe 2 (max)
CO ₂	173.312,85	63.315,88
N ₂ O	524,55	0,00
COV	274,35	6.390,03
SO ₂	1.217,82	0,00
NO _x	64.578,14	31.488,89
NO ₂	6.469,08	0,00
PM2,5	19.445,89	6.404,68
PM10	24.153,88	11.817,08
TOTAL	289.976,57	119.416,56

La principale remarque à faire à propos de ces chiffres est que les montants totaux calculés sont très fortement influencés par les valeurs attribuées aux coûts externes. Les coûts totaux obtenus lors de l'utilisation des coûts externes minimums sont 4,5 fois moins importants que ceux générés quand les coûts externes maximums sont pris en considération. Cependant, dans les deux cas de figure, le groupe fonctionnant au biogaz (groupe 2) génère bien moins de coûts externes que ses équivalents du groupe 1 (pour rappel, technologie diesel EURO V). Dans les deux cas étudiés (coût maximum ou coût minimum), les coûts externes du groupe 2 correspondent à un peu moins de la moitié des coûts externes totaux du groupe 1. Proportionnellement, la différence entre les deux technologies est légèrement plus grande

lorsque les coûts maximums sont considérés (une réduction de 58% des coûts en faveur du biogaz), que lorsque les coûts minimums sont utilisés (une réduction de 56% en faveur du biogaz).

Les émissions de CO₂ et de NO_x sont respectivement les premiers et deuxièmes responsables des coûts externes générés. Pour le dioxyde de carbone, cette constatation est expliquée par la quantité beaucoup plus importante de polluants émis (en termes de masse), par rapport aux autres types d'émission. Pour les NO_x, l'impact non négligeable des coûts externes provient surtout de la valeur attribuée à ces derniers. Ce coût unitaire plus élevé est expliqué par le caractère nocif plus poussé des NO_x, par rapport au CO₂ par exemple.

Entre l'utilisation d'un bus au diesel et l'utilisation d'un bus au biogaz, la réduction proportionnelle la plus importante est celle liée aux coûts des émissions de particules dont le diamètre est inférieur à 2,5 micromètres (PM_{2,5}). Les coûts générés par la technologie biogaz présentent en effet une réduction de 67% par rapport à la technologie diesel EURO V, pour les deux situations étudiées. La seconde diminution significative des coûts correspond aux émissions de CO₂. Les coûts externes des autres polluants sont également moins importants pour le groupe 2 que pour le groupe 1.

Le seul cas où les coûts externes du bus fonctionnant au biogaz sont supérieurs à ceux du bus fonctionnant au diesel concerne les émissions de composés organiques volatiles (COV). Ce résultat est simplement dû à la plus grande quantité de COV émise par le bus au biogaz.

4.4.3. COMPARAISON ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE : RÉSULTATS

Maintenant que les coûts environnementaux ont été transformés en unités monétaires, il est possible d'établir la comparaison globale des coûts entre l'utilisation d'un bus au biogaz ou d'un bus au diesel. Les coûts totaux établis sur le cycle de vie d'un autobus à Liège sont synthétisés dans les tableaux 9 et 10.

Tableau 9 : Coûts totaux (en euros) de l'utilisation d'un bus simple au biogaz et d'un bus simple au diesel sur une durée de vie de 20 ans – **coûts externes minimums**.

<u>Type de coût</u>	<u>Bus au diesel – norme EURO V</u>	<u>Bus au biogaz</u>
Coût d'achat du bus	250.000	287.500
Coût d'utilisation du bus	967.140	989.360
<i>Coût du carburant</i>	<i>562.140</i>	<i>465.750</i>
<i>Coût de maintenance</i>	<i>405.000</i>	<i>486.000</i>
<i>Coût d'infrastructure</i>	/	<i>37.610</i>
Coûts externes	63.630,56	27.700,17
Coût de recyclage du bus	Non pris en compte	Non pris en compte
Coût total	1.280.770,56	1.304.560,17

Tableau 10 : Coûts totaux (en euros) de l'utilisation d'un bus simple au biogaz et d'un bus simple au diesel sur une durée de vie de 20 ans – **coûts externes maximums**.

<u>Type de coût</u>	<u>Bus au diesel – norme EURO V</u>	<u>Bus au biogaz</u>
Coût d'achat du bus	250.000	287.500
Coût d'utilisation du bus	967.140	989.360
<i>Coût du carburant</i>	<i>562.140</i>	<i>465.750</i>
<i>Coût de maintenance</i>	<i>405.000</i>	<i>486.000</i>
<i>Coût d'infrastructure</i>	/	<i>37.610</i>
Coûts externes	289.976,57	119.416,56
Coût de recyclage du bus	Non pris en compte	Non pris en compte
Coût total	1.507.116,57	1.396.276,56

Le résultat principal qui ressort de ces tableaux est l'importance du rôle des coûts externes, lors de la comparaison du cycle de vie des autobus fonctionnant au biogaz ou au diesel.

Lorsque les coûts externes minimums sont considérés, le bus au biogaz reste plus cher que le bus au diesel. La différence entre les deux autobus passe cependant de 5% (dans le cas d'une comparaison seulement économique) à 2%, lorsque les coûts externes sont monétisés. Cette réduction de l'écart entre les deux technologies est expliquée par les émissions moins importantes de polluants qui sont générées lorsque du biogaz est utilisé à la place du diesel.

Quand les coûts externes maximums sont pris en compte dans l'analyse, l'utilisation d'un bus au biogaz devient moins chère que celle d'un bus au diesel. Lorsque seuls les aspects purement économiques sont pris en considération, le bus au biogaz a un coût 5% plus élevé que celui du bus au diesel. Une intégration des coûts externes maximums génère un coût total du bus au diesel supérieur de 8% à celui du bus au biogaz. Cette valeur change totalement la tendance des résultats obtenus en ne considérant que les coûts économiques. Ce renversement de situation ne peut être expliqué que par des coûts externes unitaires, proportionnellement plus importants lors de l'utilisation des coûts externes maximums que lors de l'utilisation des coûts externes minimums. La technologie diesel, émettant plus de rejets dans l'atmosphère, est donc sanctionnée plus sévèrement, ce qui lui vaut de devenir économiquement parlant moins rentable que son équivalent biogaz.

La conclusion principale à tirer de ces résultats est que, du point de vue de l'utilisation dans les transports en commun, la technologie biogaz ne revient pas beaucoup plus chère que la technologie diesel. Lorsque les coûts environnementaux sont inclus dans l'analyse économique, les bus fonctionnant au biogaz peuvent même revenir moins chers que l'utilisation des bus au diesel. La valeur des coûts externes considérés joue évidemment un rôle clé dans l'analyse de rentabilité des deux solutions.

En ce qui concerne les bus de type double, nous rappelons au lecteur que nous avons déterminé un coût purement économique plus important pour les bus au diesel que pour les bus au biogaz. En ajoutant les coûts environnementaux aux coûts économiques, l'écart observé entre les deux solutions n'est que plus important, toujours en faveur du biogaz. Il faut cependant rester prudent puisque, comme dans le cas du bus simple, les coûts globaux sont fortement influencés par les valeurs attribuées aux coûts externes. D'autre part, comme nous l'avons déjà évoqué plus haut, il ne faut pas non plus négliger le rôle de la différence entre les consommations annoncées par les fabricants et les consommations réellement observées sur le terrain.

4.4.4. DISCUSSION DES RÉSULTATS

Les résultats obtenus ci-dessus sont influencés par un grand nombre de paramètres. Le premier qui sera discuté dans cette partie est la performance de la technologie de combustion. Les éléments qui influencent les valeurs obtenues d'un point de vue économique et environnemental seront également mis en évidence. Certains sont directement en lien avec les hypothèses prises dans cette analyse, d'autres sont plus généralistes et touchent à des décisions qui ne sont pas directement influençables par les opérateurs et constructeurs des autobus.

4.4.4.1. Performance de la technologie de combustion

Les calculs réalisés ci-dessous sont basés sur les technologies de combustion utilisées par le fabricant IVECO pour le bus au gaz naturel et sur les technologies existant actuellement dans la flotte de bus des TEC Liège-Verviers pour le bus au diesel.

Avant tout développement plus approfondi, il est utile de rappeler que les calculs liés à la technologie du biogaz sont basés sur les informations provenant directement des constructeurs des autobus, légèrement adaptées afin de se rapprocher au plus de la réalité sur le terrain.

D'un point de vue environnemental, la technologie joue un rôle important dans la partie du cycle de vie liée à l'utilisation du carburant. Les résultats obtenus dans les sections précédentes sont définitivement liés à la performance et au rendement des technologies de combustion utilisées. La suite du raisonnement sera basée sur les données récoltées pour un bus de type simple.

Pour parcourir un kilomètre, un autobus de type simple devra consommer 0,5175 kg de biogaz ou 0,45 litres de diesel. L'énergie dont le bus a besoin afin d'effectuer un travail correspondant au déplacement de sa masse sur 1 km peut être évaluée à partir des pouvoirs calorifiques moyens respectifs des deux carburants. En utilisant du diesel, le bus aura besoin d'une énergie de $0,45 \times 38 = 17,1$ MJ alors que lorsque du biogaz est utilisé, une énergie de $0,5175 \times 40,5 = 21$ MJ sera nécessaire. Ces résultats signifient que le bus fonctionnant au biogaz a un rendement inférieur à celui fonctionnant au diesel. Selon les données récoltées, un bus au biogaz engendre donc une surconsommation de 22,8% par rapport à un bus au diesel. Rappelons que les données de consommation liées au gaz naturel proviennent d'informations

fournies par les constructeurs, sur lesquelles une augmentation de 15% pour les bus de type simple a été appliquée, afin d'obtenir une valeur plus proche de la consommation effective. Des études réalisées par l'ADEME (Coroller, 2009) évaluent la surconsommation réelle du GNV par rapport au diesel entre 20 et 45%. Ces résultats confortent les hypothèses que nous avons prises par rapport aux différentes consommations.

Pour effectuer le même travail, l'utilisation du biogaz nécessite donc plus d'énergie que lorsque du diesel est utilisé. L'écart entre ces deux valeurs doit être interprété comme la différence de rendement entre les deux technologies. En effet, la différence entre les deux situations ne peut être expliquée que par le type de technologie de combustion utilisée. Les contraintes mécaniques (forces de frottement au sol et dans l'air, poids du bus à déplacer) sont les mêmes pour les deux modes de fonctionnement. Les seules variations qui pourraient être constatées d'un bus à l'autre sont le poids du moteur ou une surcharge éventuelle liée au poids des bonbonnes de gaz. Si, pour un même travail effectué, l'énergie nécessaire au déplacement d'un bus sur un kilomètre est supérieure dans le cas de l'utilisation du biogaz, par rapport à l'utilisation du diesel, cela ne peut que signifier que le rendement de la technologie biogaz est légèrement inférieur à celui du rendement de la technologie diesel.

Le rendement de la technologie est une notion très importante qui a son rôle à jouer dans la performance environnementale des différentes solutions envisagées. En effet, une augmentation du rendement d'une technologie permet d'effectuer, sur base d'une même quantité d'énergie, un travail plus important qu'auparavant. Pratiquement, cela signifie que pour parcourir une même distance, la quantité de carburant utilisée peut être diminuée et avec elle, les différentes émissions liées à la combustion.

Une amélioration hypothétique future du rendement des moteurs au diesel pourrait modifier les résultats d'émission obtenus et réduire l'impact environnemental du diesel par rapport au biogaz. Pour rappel, les autobus au diesel dont il est question dans cette étude s'inscrivent dans le cadre de la norme EURO V, impliquant des moteurs de dernière génération. Les rendements des moteurs diesel ont fait l'objet de notables améliorations au cours de ces dernières années afin de répondre aux critères toujours plus stricts des différentes normes EURO qui se sont succédées sur ce même laps de temps.

Une réduction de l'impact environnemental des bus fonctionnant au diesel pourrait se produire, par exemple, dans une situation où la technologie serait assez performante pour

réduire de manière conséquente les émissions des polluants autres que le CO₂. En effet, en ce qui concerne les émissions de dioxyde de carbone, rappelons que, lors de l'utilisation d'une technologie liée au biogaz, le bilan CO₂ de l'utilisation du carburant est nul puisque la quantité renvoyée dans l'atmosphère correspond à celle captée précédemment par les matières organiques qui constituent les déchets. Cependant, les émissions liées à la fabrication du carburant restent à prendre en considération, notamment celles liées au traitement et au transport des déchets.

Enfin, rappelons encore une fois au lecteur que la technologie diesel considérée dans le cadre de cette analyse est basée sur des bus respectant les normes EURO V. Les bus de dernière génération sont conformes à cette réglementation mais ils ne sont pas totalement représentatifs de la flotte des autobus à Liège. Les bus les plus anciens sont, en effet, moins performants que les bus de type EURO V et les gains environnementaux obtenus en substituant ces bus d'ancienne génération par des bus au biogaz n'en seraient que d'autant plus importants.

4.4.4.2. Facteurs impactant l'analyse économique

L'analyse économique réalisée ci-dessus est évidemment basée sur un certain nombre d'hypothèses. Parmi ces dernières se retrouvent les différents niveaux de prix actuels du diesel et du biogaz, les coûts de maintenance des bus, les coûts d'installation des stations de distribution du gaz ainsi que le nombre d'autobus sur lesquels le coût des infrastructures est amortissable. Tous ces paramètres impactent les résultats et il est dès lors essentiel d'étudier les possibles variations obtenues, lorsque la valeur de ces paramètres est modifiée. Cette étude peut être réalisée par le biais d'une analyse de sensibilité, destinée à comparer les résultats obtenus à partir de différents scénarios.

Les données qui nous ont été renseignées à propos des coûts de maintenance des bus au biogaz donnent au lecteur une idée générale de leur impact sur les résultats. Néanmoins, la proportion dans laquelle varient ces coûts peut jouer un rôle lors de la comparaison entre les deux technologies. Pour cette raison, une analyse de sensibilité des résultats aux coûts de maintenance du bus au biogaz est développée ci-après. Les deux nouveaux scénarios à étudier pour le bus de type simple sont les suivants :

- 1) Le coût de maintenance d'un bus au biogaz est de 10% supérieur à celui d'un bus au diesel.
- 2) Le coût de maintenance d'un bus au biogaz est de 30% supérieur à celui d'un bus au diesel.

Le premier scénario génère, pour un bus de type simple, un coût de maintenance au kilomètre de 0,60 euro, alors que le second donne un résultat de 0,71 euro par kilomètre parcouru. Sur la durée de vie d'un bus, les coûts de maintenance varient donc entre 324.000 (pour le scénario le moins pénalisant) et 639.000 euros (pour le scénario le plus pénalisant). Utilisés dans les coûts totaux générés par les bus au cours de leur cycle de vie, ces valeurs influencent positivement ou négativement le coût d'utilisation d'un bus au biogaz, par rapport à celui d'un bus diesel.

En supposant le scénario un, le coût économique du bus au biogaz (1.114.859 euros) devient inférieur à celui du bus au diesel (1.217.140 euros).

- Lorsque les coûts environnementaux minimums sont monétisés et intégrés dans le coût total des autobus, les conclusions obtenues changent par rapport à la situation initiale. Le bus au biogaz devient plus intéressant que le bus au diesel. Ses coûts globaux s'élèvent à 1.142.289,11 euros, contre 1.280.770,56 euros pour le bus au diesel. La différence entre les deux technologies est de 12%.
- Lorsque les coûts environnementaux maximums sont monétisés et intégrés dans le coût total des autobus, les conclusions restent similaires à celles de la situation initiale. Le bus au biogaz reste plus avantageux (1.234.275,56 euros) que le bus au diesel (1.507.116,57 euros). La différence entre les deux technologies est simplement accentuée. Elle passe de 8 à 22%.

Quand le scénario deux est pris en considération, le coût économique du bus au biogaz (1.429.858,62 euros) reste supérieur à celui du bus au diesel (1.217.140 euros).

- Lorsque les coûts environnementaux minimums sont monétisés et intégrés dans le coût total des autobus, les conclusions restent identiques à celles de la situation initiale. Les coûts totaux d'utilisation du bus au biogaz s'élèvent à 1.457.558,79 euros, alors que ceux du bus au diesel se chiffrent à 1.280.770,56. L'avantage pour le bus au diesel passe de 2 à 13%.

- Lorsque les coûts environnementaux maximums sont monétisés et intégrés dans le coût total des autobus, les conclusions sont différentes de celles de la situation initiale. Le bus au biogaz devient en effet plus cher (1.549.274,56 euros) que le bus au diesel (1.507.116,57 euros). La différence entre les deux technologies est d'environ 3%, en faveur du diesel.

Le tableau 11 synthétise les conclusions obtenues, en fonction des hypothèses prises sur les coûts de maintenance du bus au biogaz.

Tableau 11 : Récapitulatif des conclusions obtenues en fonction des différentes hypothèses prises sur les coûts de maintenance d'un bus au biogaz.

Hypothèse	Conclusions	
	Coûts totaux avec coûts externes min	Coûts totaux avec coûts externes max
Scénario 1 : Maintenance biogaz = 1,1*Maintenance diesel	Biogaz < Diesel 12%	Biogaz < Diesel 22%
Situation initiale : Maintenance biogaz = 1,2*Maintenance diesel	Biogaz > Diesel 2%	Biogaz < Diesel 8%
Scénario 2 : Maintenance biogaz = 1,3*Maintenance diesel	Biogaz > Diesel 13%	Biogaz > Diesel 3%

Les résultats de l'analyse de sensibilité montrent que les conclusions varient en fonction des différentes hypothèses émises. Dans notre étude, la moitié des cas est favorable à l'utilisation d'un bus au biogaz, alors que l'autre moitié justifie l'utilisation d'un bus au diesel. Dans les cas favorables au biogaz, la différence entre les deux technologies s'élève au maximum à 22%. Dans les cas défavorables au biogaz, une variation maximale de 13% est constatée entre les deux modes de propulsion.

Un autre élément qui impacte les résultats actuels et futurs dans la comparaison des deux technologies est l'évolution du cours des carburants. En effet, si le prix par unité de diesel augmente de façon plus que proportionnelle, par rapport à celui du biogaz, la différence de coût entre les deux technologies devient moins importante et facilite l'investissement et la

transition vers le mode de fonctionnement au biogaz. Ce cas de figure est à envisager sérieusement dans la conjoncture actuelle. Le récent débat d'avril 2012 au Parlement Européen sur l'augmentation des accises appliquées sur le diesel est un exemple d'actualité, qui soutient la thèse de l'augmentation future du prix de ce carburant. Bien que le projet ait été finalement rejeté en masse par les parlementaires européens, une possible remise en question de cette idée dans les années futures n'est pas à exclure. Il ne s'agit là que d'un exemple déterminant les augmentations de prix. Le cours du pétrole toujours plus élevé est également un autre argument non négligeable.

Le rôle des politiques est crucial dans le domaine du prix des carburants. En effet, grâce à des moyens de subvention ou à l'aide de taxes pénalisant les modes de transports les plus polluants, le pouvoir élu peut faire varier les montants à effectivement dépenser pour le développement d'une nouvelle filière de carburant.

La qualité du substrat et donc sa composition chimique sont aussi des éléments déterminants dans l'analyse économique de la solution. En effet, la qualité de la matière première détermine le niveau de qualité et de quantité de biogaz produit. Plus la quantité produite par unité de substrat est importante et hautement concentrée en méthane, plus les traitements post-fabrication sont légers, ce qui permet de réduire les étapes de purification et avec elles les coûts.

4.4.4.3. Facteurs impactant l'analyse environnementale

Le caractère environnemental d'un problème implique la prise en considération d'un grand nombre de facteurs. Différents domaines très variés peuvent avoir une influence sur les résultats obtenus.

Comme déjà mentionné ci-dessus, la performance de la technologie utilisée est un des éléments clés qui influence les résultats en termes d'émissions. Elle n'est pourtant pas la seule.

La qualité du substrat ne joue pas qu'un rôle d'un point de vue économique. Elle influence également l'aspect environnemental. Plus un substrat produit un biogaz riche en méthane, moins il devra être traité pour pouvoir être utilisé en tant que carburant. La quantité d'énergie nécessaire à la phase de fabrication du biogaz est dès lors réduite, ce qui entraîne une réduction similaire des émissions générées pour produire cette énergie.

Un autre élément qui peut influencer la quantité d'émissions de CO₂ produite est la localisation des différents membres de la chaîne logistique. Ce point s'applique particulièrement à la distance qui existe entre l'endroit de récupération des déchets et l'endroit production du biogaz. En effet, si les déchets qui doivent être traités sont transportés sur de longues distances avant d'arriver à la station de génération de biogaz, les transports utilisés pour déplacer les matières premières génèrent plus d'émissions et réduisent donc ainsi la neutralité carbone du biogaz. Si les déchets générés en région liégeoise sont utilisés pour la fabrication de biogaz, aucun transport supplémentaire et donc aucune émission supplémentaire liée à ces transports ne doit être prise en considération dans l'analyse du cycle de vie d'un bus. En effet, qu'ils soient transformés en biogaz ou non, les déchets de la région liégeoise doivent de toute façon être transportés et traités à la station de traitement INTRADEL. Lorsque les déchets proviennent de plus loin, il y a lieu de considérer les émissions générées par les kilomètres supplémentaires parcourus, afin d'amener les déchets jusqu'à la station de traitement liégeoise.

Le transport du biogaz entre le digesteur (endroit de fabrication) et le lieu d'utilisation est moins problématique si les conduites de distribution du gaz naturel sont utilisées afin de faire circuler le biogaz. En effet, en utilisant le réseau déjà mis en place, le transport vers les lieux d'utilisation du biogaz ne génère pas d'émissions supplémentaires de CO₂. Cependant, il faut veiller à ce que les conduites de transport de gaz naturel contiennent un gaz du même type que celui du biogaz carburant. Nous rappelons au lecteur que, pour pouvoir être utilisé en tant que carburant, le biogaz doit présenter un taux de méthane d'au-moins 97%.

5. CONCLUSIONS

5.1. FAISABILITÉ ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE

Les différentes sections développées précédemment dans ce rapport permettent d'analyser la faisabilité économique et environnementale de l'utilisation d'un bus au biogaz à Liège.

Nous avons concentré notre étude sur deux solutions qui permettraient à la ville de Liège, par le biais de ses étudiants, de réduire les émissions de CO₂ lors du transport de personnes. La première solution étudiée est la relocalisation des grands amphithéâtres de l'Université de Liège. La seconde se concentre sur le remplacement des autobus actuels fonctionnant au diesel, par des autobus fonctionnant au biogaz.

Le premier point qui a été envisagé dans cette étude est la relocalisation des grands amphithéâtres du Sart-Tilman au centre-ville. Ce déménagement des plus grandes salles de cours de l'Université de Liège permettrait, dans le cas où tous les bus utilisés par les étudiants seraient totalement supprimés, une réduction des émissions de CO₂ d'environ 104.000 kg par an. Cette réduction est théorique puisqu'elle ne prend pas en considération le fait que les autobus continueront à circuler, pour une partie ou l'intégralité de la flotte, malgré la réduction du nombre d'étudiants. Même si dans des ordres de grandeur moins importants, les émissions de CO₂ continueront quand même à être générées. En outre, les résultats obtenus ne prennent en considération que les émissions de CO₂ générées par les étudiants qui utilisent la ligne 48 pour se rendre au Sart-Tilman. Une étude de l'impact de la relocalisation des amphithéâtres sur les étudiants qui utilisent un autre moyen de transport devrait dès lors être effectuée. En effet, si la relocalisation génère plus (utilisation des voitures) ou moins (utilisation des autobus ou marche à pieds) de congestion, les conséquences sur les émissions de CO₂ peuvent être favorables ou défavorables au développement de cette solution. L'option de relocalisation des amphithéâtres engendre également des coûts économiques importants, liés aux travaux de transformation ou de construction de nouveaux bâtiments.

Ces incertitudes sur l'impact réel d'une relocalisation des grands amphithéâtres sur la réduction des émissions de CO₂ nous ont amenés à formuler un autre type de proposition : le remplacement des bus actuels par des bus au biogaz. Cette solution est envisagée dans le cadre de l'utilisation et de la valorisation potentielle des déchets traités par l'intercommunale INTRADEL. Un autre élément déclencheur dans l'étude de cette proposition plutôt qu'une

autre est la neutralité du biogaz en termes d'émissions de CO₂. Si seule la phase d'utilisation du carburant est prise en considération, le bilan CO₂ du biogaz est tout à fait neutre. En effet, les émissions générées lors de la consommation du carburant sont entièrement contrebalancées par les absorptions de CO₂ par les matières organiques, dans les phases précédentes de leur cycle de vie.

Nous avons commencé notre étude de ce sujet par l'évaluation de la disponibilité des déchets afin de pouvoir produire le biogaz. L'analyse réalisée nous a permis de déterminer que la fraction fermentescible des déchets ménagers (déchets verts et déchets organiques) dans la région liégeoise, permettrait de générer la quantité de biogaz nécessaire à l'alimentation de 110 bus annuellement. Ce chiffre correspond à environ un sixième de la flotte de bus actuellement utilisée par les TEC Liège-Verviers. Dans une première phase, il est tout à fait possible de faire rouler une partie de la flotte d'autobus au biogaz. Dans une approche à plus long terme, il faudra néanmoins réévaluer les disponibilités des déchets, pour déterminer s'ils suffisent à l'utilisation du biogaz pour l'intégralité de la flotte de bus.

La seconde partie de notre analyse a porté sur la comparaison économique et environnementale entre les bus fonctionnant pour le moment au diesel à Liège, et des bus qui pourraient y fonctionner dans les années à venir grâce au biogaz.

Les résultats environnementaux sont clairement en faveur du bus au biogaz, particulièrement dans le domaine qui nous intéresse, c'est-à-dire les émissions de CO₂ qui provoquent un effet de serre additionnel.

Les résultats économiques sont quant à eux plus nuancés. En fonction des différentes hypothèses prises lors de nos calculs, les coûts générés sont parfois plus importants pour la technologie biogaz et parfois plus importants pour la technologie diesel.

Lorsque les coûts environnementaux et économiques sont tous les deux comptabilisés, l'intérêt de l'utilisation d'un bus au biogaz par rapport à un bus au diesel dépend également des hypothèses sur lesquelles sont basés les calculs. Dans 50% des cas, il est plus favorable d'utiliser un bus au biogaz, alors que dans les 50% restants, il est plus intéressant financièrement d'utiliser un bus au diesel. Dans le cas le plus favorable au biogaz, les coûts générés par un bus utilisant cette technologie sur son cycle de vie sont 22% moins importants que ceux obtenus en utilisant un bus au diesel. Dans le cas le plus négatif pour le bus au biogaz, les coûts sur l'intégralité de la vie sont de 13% supérieurs à ceux d'un bus au diesel.

En considérant uniquement les différentes phases développées dans notre analyse du cycle de vie, nous pensons qu'il est, d'un point de vue économique et environnemental, intéressant de développer l'utilisation des autobus au biogaz à Liège. Lorsque, dans notre comparaison et sur base de nos hypothèses initiales, le bus au diesel revient financièrement moins cher que le bus au biogaz, la différence entre les deux technologies varie entre 2 et 5% pour un bus de type simple. Cette différence est relativement peu élevée. L'impact du diesel ou du biogaz sur les coûts générés pour un bus, sur l'intégralité de son cycle de vie, ne diffère pas beaucoup d'une technologie à l'autre. L'utilisation du biogaz est dès lors à mettre en évidence de par son impact moins néfaste sur l'environnement. En outre, de par son aspect plus écologique et plus respectueux de l'environnement, le biogaz peut également être un atout pour les TEC en termes d'image de marque. Il est évident qu'il s'agit là d'un outil marketing de taille, afin de promouvoir les transports en communs liégeois ainsi que la ville de Liège dans sa globalité. Pour les étudiants utilisant actuellement l'autobus pour se rendre au Sart-Tilman, la technologie biogaz permet une réduction des émissions de 75.400 kg par an, par rapport à l'utilisation de la technologie diesel.

Cependant, il est évident que l'utilisation de ce type de bus implique des investissements tels que notamment le réaménagement des dépôts d'autobus, afin d'installer des stations de remplissage de GNV. L'utilisation du biogaz suppose également le remplacement de la flotte actuelle des autobus au diesel par des bus fonctionnant au gaz naturel. Ce changement peut cependant être vu de manière progressive, s'il est ajusté au rythme de remplacement actuel des bus. Enfin, la probable réticence des conducteurs d'autobus à l'utilisation du gaz, tout comme leur possible intérêt pour la conduite de véhicules plus respectueux de l'environnement doivent aussi être pris en considération, lors de la mise sur pied d'un tel projet.

Bien que les réductions d'émissions soient moins importantes pour la seconde solution (implémentation de bus au biogaz), nous la préférons à la première piste proposée (relocalisation des amphithéâtres). En effet, bien que les diminutions en termes d'émissions de CO₂ soient moins élevées, dans le cadre de l'utilisation du bus au biogaz, c'est cependant ce dernier cas qui, dans notre analyse, présente les résultats les plus fiables. Nous rappelons au lecteur que la quantité d'émissions calculées pour la solution des amphithéâtres doit être nuancée en fonction d'autres paramètres non analysés dans ce travail. Parmi ces derniers paramètres, on retrouve plus particulièrement l'influence sur la congestion et donc sur les émissions de CO₂ d'une relocalisation des amphithéâtres au centre-ville de Liège.

5.2. PISTES À DÉVELOPPER

Notre étude s'est placée dans le contexte particulier de l'utilisation du biogaz en tant que carburant. L'accent principal a été mis sur les différents impacts financiers et environnementaux de l'utilisation du biogaz dans les autobus de la ville de Liège. Notre analyse prend dès lors en considération tous les coûts liés directement aux bus, parmi lesquels sont compris les coûts de fabrication et de transport du biogaz jusqu'à son lieu d'utilisation.

Cependant, l'investissement à réaliser afin de construire une station de biométhanisation, permettant la fabrication du biogaz à Liège, n'a pas été étudié. Il doit toutefois être pris en considération puisqu'il s'agit d'une dépense d'argent conséquente pour la région. Une étude de faisabilité de ce type d'investissement doit être réalisée, afin de déterminer si les conditions nécessaires à la fabrication du biogaz (en termes d'infrastructures, de finances, de technologies, d'espace) sont disponibles dans la zone géographique de Liège.

L'analyse des ressources de matières premières disponibles pour la fabrication du biogaz à Liège ont, quant à elles, été analysées dans ce travail et sont reprises sous la rubrique « 4.2.4. Etat des lieux des matières premières pour la fabrication de biogaz à Liège ». Cependant, comme nous l'avons mentionné précédemment, les déchets verts et organiques traités actuellement par INTRADEL permettent de couvrir les besoins d'environ un sixième de la flotte actuelle d'autobus à Liège. A court terme, ces quantités sont donc suffisantes pour alimenter seulement une partie des autobus liégeois. Toutefois, si l'ensemble des bus devait être alimenté par du biogaz, il deviendrait intéressant d'étudier d'autres possibilités d'approvisionnement en termes de déchets et de déterminer leur origine. En outre, tous les déchets organiques et verts sont actuellement brûlés dans l'incinérateur Uvélia. La question de la réattribution de ces déchets se pose également, alors que, en 2010, une quantité plus importante de déchets que celle utilisée à l'époque était déjà nécessaire afin d'améliorer le rendement de l'incinérateur. La disponibilité de ces déchets verts et organiques doit dès lors être également analysée et étudiée.

L'utilisation d'un bus au biogaz est plus favorable que les technologies diesel actuellement en circulation dans le réseau de transports en commun de la ville de Liège. Cependant, il serait également intéressant de comparer la technologie biogaz à d'autres solutions de transports plus propres, comme par exemple les modes de transports hybrides ou électriques.

5.3. CONCLUSIONS FINALES

En conclusion, la mise en œuvre d'un bus au biogaz à Liège est clairement bénéfique d'un point de vue environnemental et plus spécialement en ce qui concerne les émissions de CO₂. Au niveau économique, la différence de coûts entre un bus au biogaz et un bus au diesel est relativement faible. Puisque, dans le cadre de l'utilisation du biogaz, l'effort financier à réaliser pour passer d'une technologie à l'autre, est peu important, il ne semble pas insensé de fournir cet effort afin de développer des modes de transports plus propres pour la ville de Liège. Cependant, les développements réalisés dans notre travail doivent être complétés par des études plus approfondies des coûts de développement d'une installation de biométhanisation ainsi que de la disponibilité des déchets nécessaires à la production du carburant utilisé dans les autobus.

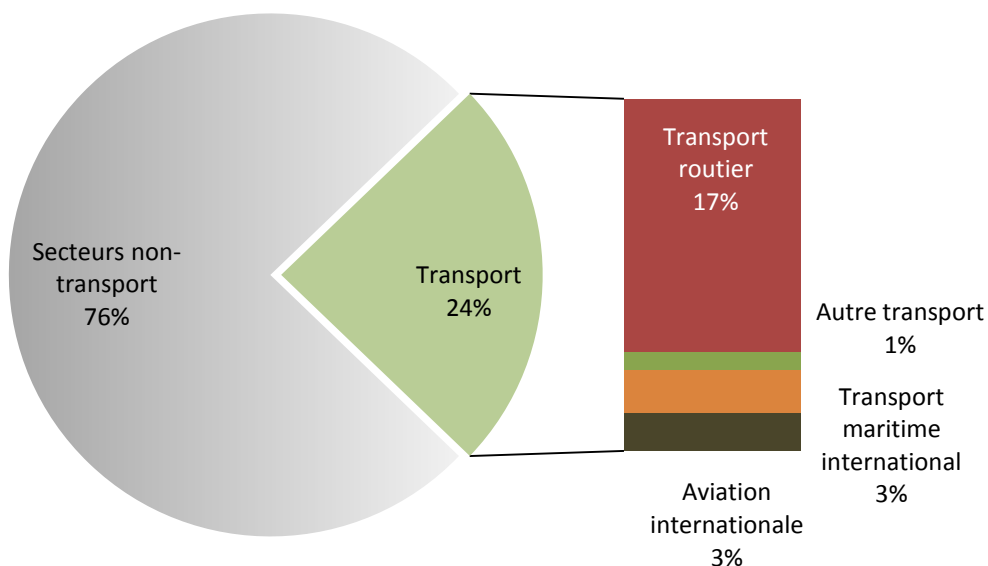
Annexes

1. Carte des pays membres de l'Espace Economique Européen



Source : Agence Européenne pour l'Environnement

2. Contribution du secteur du transport aux émissions totales de gaz à effet de serre, 2009 (EE32)



Source : Agence Européenne pour l'Environnement

3. Valeurs limites des normes de pollution EURO pour les poids lourds, bus et cars

Normes	Textes de référence (directives)	Date de mise en application (tous types)	NO _x (g/kWh)	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	Particules (g/kWh)
EURO 0	88/77	1/10/1990	14,4	11,2	2,4	-
EURO I	91/542 (A)	1/10/1993	9	4,9	1,23	0,36
EURO II	91/542 (B)	1/10/1996	7	4	1,1	0,15
EURO III	1999/96	1/10/2001	5	2,1	0,66	0,13
EURO IV	1999/96	1/10/2006	3,5	1,5	0,46	0,02
EURO V	1999/96	1/10/2009	2	1,5	0,46	0,02
EURO VI	Règlement (CE) n° 595/2009	31/12/2013	0,4	1,5	0,13	0,01

Source : Ministère du Développement durable français

**4. Influence de différentes filières de biogaz sur quatre catégories d'impact.
Valorisation d'1 Nm³ de biogaz brut (PCI : 5,7 kWh/Nm³)**

<i>Valorisation biogaz (filière substituée)</i>	Energie primaire non renouvelable MJ	Effet de serre à 100 ans g éq CO ₂	Acidification g éq SO ₂	Eutrophisation g éq (PO ₄) ²⁻
Chaleur (fioul)	-13	-1 390	1,5	0,59
Chaleur (GN)	-8,6	-1 141	4,0	0,74
Electricité	-9,8	-327	3,8	0,76
Cogénération (fioul)	-20	-920	3,2	0,72
Cogénération (Gaz Naturel)	-18	-800	4,4	0,80
Carburant (Bus diesel)	-7,0	-1 176	-4,7	0,11
Carburant (Bus GNV)	-7,8	-1 297	3,0	0,70
Carburant (BOM diesel)	-5,1	-1 020	-4,9	0,10
Carburant (BOM GNV)	-7,8	-1 299	3,0	0,70
Carburant (Voiture diesel)	-7,4	-1 241	1,2	0,54
Carburant (Voiture essence)	-13	-1 566	0,88	0,56
Carburant (Voiture GNV)	-7,8	-1 336	3,0	0,70

Source : ADEME

Les chiffres négatifs indiquent une réduction de l'impact lorsque du biogaz est utilisé en substitution aux énergies fossiles. Les chiffres positifs signifient, quant à eux, une augmentation de l'impact lorsque du biogaz est substitué aux énergies fossiles.

Les chiffres en gras indiquent les filières les mieux positionnées pour chaque indicateur.

5. Relation des gaz parfaits

$$pV = nRT$$

p = pression. S'exprime en Pascal.

V = volume. S'exprime en mètres cubes.

n = nombre de moles.

R = constante des gaz parfaits. S'exprime en J/kg.mol

T = température. S'exprime en Kelvin.

Bibliographie

1) Ouvrages

Le Petit Larousse Illustré. (2009). Paris : Larousse.

Sutton M., Howard, C. & Erisman J. (2010), *The European Nitrogen Assessment : Sources, effects and policy perspectives*. New York : Cambridge University Press.

2) Articles de revues scientifiques

Ahman, M. (2010). Biomethane in the transport sector - An appraisal of the forgotten option. *Energy Policy*, 38, 208-217.

Ally, J. & Pryor, T. (2007). Life-cycle assessment of diesel, natural gas and hydrogen fuel cell bus transportation systems. *Journal of Power Sources*, 170, 401-411.

Borjesson, P., Berglund, M., (2007). Environmental systems analysis of biogas systems—Part II: The environmental impact of replacing various reference systems. *Biomass and Bioenergy*, 326-344.

Kliucininkas, L., Matulevicius & J., Martuzevicius, D. (2012). The life cycle assessment of alternative fuel chains for urban buses and trolleybuses. *Journal of Environmental Management*, 99, 98-103.

Lantz, M., Svensson, M., Björnsson, L. & Börjesson, P. (2007). The prospects for an expansion of biogas systems in Sweden - Incentives, barriers and potentials. *Energy Policy*, 35, 1830-1843.

Ma, H., Balthasar, F., Tait, N., Riera-Palou, X. & Harrison, A. (2012). *Energy Policy*, 44, 160-173.

Pöschl, M., Ward, S. & Owende, P. (2010). Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. *Applied Energy Journal*, 87, 3305-3321.

Poeschl, M., Ward, S., & Owende, P. (2010). Prospects for expanded utilization of biogas in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 1782-1797.

Rabl, H. (2002). Environmental benefits of natural gas for buses. *Transportation Research Part D*, 7, 391-405.

Ryan, F. & Caulfield, B. (2010). Examining the benefits of using bio-CNG in urban bus operations. *Transportation Research Part D*, 15, 362–365.

Tzeng, G.H., Lin, C.W. & Opricovic, S. (2005). Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation. *Energy Policy*, 33, 1373-1383.

3) Cours, rapports et études universitaires, mémoires

Bickel, P., Friedrich, R., Hunt, A., De Jong, G., Laird, J., Lieb, Chr., Lindberg, G., Mackie, P., Navrud, S., Odgaard, Th., Shires, J. & Tavasszy, L. (2006). *Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment (HEATCO). Deliverable D6: Case Study Results*. IER : University of Stuttgart, Stuttgart.

Gerbinet, S. (2011). *Evaluation environnementale de systèmes de production d'électricité renouvelable*. Mémoire de Master en Ingénieur Civil en Chimie et Sciences des matériaux non publié, Université de Liège, Liège.

INFRAS/IWW. (2004). *External Costs of Transport: Update study*. University of Karlsruhe, Zürich/Karlsruhe.

Léonard, A. (2002). *Biométhanisation*. Département de Chimie Appliquée de l'Université de Liège, Liège.

Léonard, A. (2010). *Production et traitement du biogaz*. Journées de l'OIEau, Paris.

Pelkmans, L., Lenaers, G., & De Keukeleere, D. (2002). *Evaluation of Emissions and Fuel Consumption of Heavy Duty Natural Gas Vehicles in Real City Traffic*. Vito Flemish Institute for Technological Research, Belgium.

Smits, J. (2010). *Principes et méthodes de gestion environnementale*. Syllabus, HEC – Ecole de Gestion de l'Université de Liège, Liège.

Sundberg, M., Johansson W. & Hjortsberg, H., (1997). *Effects on soil, environment and economy*. Report nr. 12 (Recycle and Waste), Swedish Institute of Agricultural Engineering.

4) Sites internet – Rapports et documents en ligne

ADEME. (2007). *Analyse du Cycle de Vie des modes de valorisation énergétique du biogaz issu de méthanisation de la Fraction Fermentescible des ordures ménagères collectée sélectivement en France*. En ligne <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?sort=-1&cid=96&m=3&id=48358&ref=14226&nocache=yes&p1=111>, consulté le 5 avril 2012.

Agence Européenne pour l'Environnement. *Transport sector contribution to total GHG emissions, 2009 (EE32)*. En ligne <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/transport-sector-contribution-to-total>, consulté le 17 mars 2012.

Bouygues construction. (2012). *Emissions de CO₂*. En ligne <http://www.bouygues-construction.com/695i/developpement-durable/defis-environnementaux/emissions-de-co2.html>, consulté le 6 mars 2012.

CEMUL. (2010). *La mobilité à l'ULg – les résultats*. En ligne <http://www.cemul.ulg.ac.be/cms/uploads/Rapport%20BO%20version%201.pdf>, consulté le 7 avril 2012.

Clean Air For Europe (CAFE) – Cost Benefit analysis (2005). *Damages per tonne emission of PM_{2.5}, NH₃, SO₂, NO_x and VOCs from each EU25 Member State (excluding Cyprus) and surrounding seas*. Commissioned by: European Commission DG Environment. En ligne http://www.cafe-cba.org/assets/marginal_damage_03-05.pdf, consulté le 12 avril 2012.

Commission Européenne. (2005). *ExternE - Externalities of Energy – Methodology 2005 Update*. En ligne http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/kina_en.pdf, consulté le 3 avril 2012.

Commission Européenne. (2008). *Handbook on estimation of external costs in the transport sector*. En ligne http://ec.europa.eu/transport/sustainable/doc/2008_costs_handbook.pdf, consulté le 10 avril 2012.

Commission Européenne. (2009). *EU energy and transport in figures : statistical pocketbook*.

En ligne

http://ec.europa.eu/energy/publications/doc/2009_energy_transport_figures.pdf,

consulté le 7 avril 2012.

Commission Européenne. (2010). *The EU climate and energy package*. En ligne

http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index_en.htm, consulté le 10 avril 2012.

Coroller, P. (2009). *24èmes journées AGIR Toulouse, les 18 et 19 Juin 2009*. En ligne

<http://www.agir-transport.org/ImgPDF/72-7coroller.pdf>, consulté le 7 avril 2012.

DATS 24. (2012). *Station Anderlecht*. En ligne

http://www.dats24.be/dats/static/station_anderlecht_f.shtml, consulté le 12 avril 2012.

Dictionnaire Environnement. (2012). *Boiling Liquid Expanding Vapor*. En ligne

<http://www.dictionnaire->

[environnement.com/boiling_liquid_expanding_vapor_bleve_ID3046.html](http://www.dictionnaire-environnement.com/boiling_liquid_expanding_vapor_bleve_ID3046.html), consulté le

26 avril 2012.

Dictionnaire Environnement. (2012). *Normal mètre cube*. En ligne <http://www.dictionnaire->

[environnement.com/normal_metre_cube_nm3_ID477.html](http://www.dictionnaire-environnement.com/normal_metre_cube_nm3_ID477.html), consulté le 26 avril 2012.

Eco-réponses. (2011). *Rapport final – Mobilité électrique en réseau – Plug and Ride*. En ligne

<http://www.greenanswers.be/wp-content/uploads/2011/07/Rapport->

[final_plugandride.pdf](http://www.greenanswers.be/wp-content/uploads/2011/07/Rapport-final_plugandride.pdf), consulté le 13 février 2012.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2010). *Global hunger declining, but still unacceptably high*. En ligne

<http://www.fao.org/docrep/012/al390e/al390e00.pdf>, consulté le 10 mars 2012.

Gaz de Bordeaux. (2012). *Les caractéristiques du gaz naturel véhicules*. En ligne

<http://www.gazdebordeaux.fr/professionnels/caracteristiques-gaz-naturel-vehicule.php>,

consulté le 11 avril 2012.

GDFSUEZ Filiales. (2012). *Le GNV, un carburant performant et sûr*. En ligne

<http://www.gnvert-gdfsuez.com/fr/gaz-naturel-vehicule/le-gnv/atouts/securite/securite/>,

consulté le 11 avril 2012.

- HEC-ULg. (2012). *Bienvenue à HEC-ULg*. En ligne <http://www.hec.ulg.ac.be/a-propos-de/bienvenue-a-hec-ulg>, consulté le 29 février 2012.
- INTRADEL : L'intercommunale de traitement de déchets en région liégeoise. (2009). *Rapport annuel de gestion 2009*. En ligne <http://www.intradel.be/media/pdf/rapport-annuel/Rapport-de-gestion-2009.pdf>, consulté le 13 avril 2012.
- L'Avenir. (2011). *ULg : travaux en cours à l'Opéra*. En ligne http://www.lavenir.net/article/detail.aspx?articleid=DMF20111122_00081389, consulté le 18 février 2012.
- La Libre. (2011). *Le 1^{er} train à l'énergie solaire en Belgique est parti d'Anvers*. En ligne <http://www.lalibre.be/societe/planete/article/665331/le-1er-train-a-l-energie-solaire-en-belgique-est-parti-d-anvers.html>, consulté le 13 février 2012.
- La Libre. (2011). *La SRWT réinvente le bus hybride*. En ligne <http://www.lalibre.be/societe/planete/article/636201/la-srwt-reinvente-le-bus-hybride.html>, consulté le 3 mars 2012.
- Le Figaro. (2011). *Le premier train solaire circule en Belgique*. En ligne <http://www.lefigaro.fr/environnement/2011/06/06/01029-20110606ARTFIG00685-le-premier-train-solaire-circule-en-belgique.php>, consulté le 13 février 2012.
- Le Gaz Naturel. (2012). *Transport en Belgique*. En ligne <http://www.gaznaturel.be/consommateurs/le-gaz-naturel/ou-trouve-t-on-le-gaz-naturel/transport-en-belgique>, consulté le 8 février 2012.
- Ministère du Développement durable français. *Véhicules aux normes pour réduire la pollution*. En ligne http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Vehicules_aux_normes_pour_reduire_la_pollution_de_l_air.pdf, consulté le 6 mai 2012.
- Mon Assurance Auto. (2012). *Eco-bonus wallon en 2012 : prime de la région wallonne pour voitures d'occasion et neuves*. En ligne <http://www.mon-assurance-auto.be/prime-a-la-casse-eco-bonus-auto.html>, consulté le 9 avril 2012.

- Plateforme Biocarburants. (2012). *Le bioéthanol*. En ligne <http://www.biofuels-platform.ch/infos/bioethanol.php>, consulté le 4 février 2012.
- RTC Télé Liège. (2011). *Etude de faisabilité positive pour les navibus*. En ligne <http://www.rtc.be/reportages/societe/1443577-etude-de-faisabilite-positive-pour-les-navibus>, consulté le 19 mars 2012.
- Santé Canada. (2006). *A propos de la qualité de l'air et la santé*. En ligne http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/air/out-ext/effe/talk-a_propos-fra.php#oxydes, consulté le 5 mai 2012.
- SPF Economie. (2012). *Tarif officiel moyen produits pétroliers derniers 24 mois*. En ligne http://economie.fgov.be/fr/statistiques/chiffres/energie/prix/moyen_24/, consulté le 25 février 2012.
- STIB. (2012). *Véhicules : bus*. En ligne <http://www.stib.be/bus.html?l=fr>, consulté le 10 avril 2012.
- TEC Transport En Commun en Wallonie. (2012). *TEC Liège-Verviers*. En ligne <http://www.infotec.be/index.aspx?PageId=633021251308109456>, consulté le 9 avril 2012.
- Transbus. (2009). *Le GNV, Gaz Naturel pour Véhicules*. En ligne <http://www.transbus.org/dossiers/gnv.html>, consulté le 10 mars 2012.
- Transpole. (2012). *Transpole avance > Développement durable*. En ligne <http://accessible.transpole.fr/accessibilite/environnement/developpement-durable/plus-de-respect-environnement-601.aspx>, consulté le 5 mai 2012.