

LES BUS PROPRES ET ECONOMES EN ILE-DE-FRANCE BILAN DES TECHNOLOGIES

Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Ile-de-France
15 rue Falguière – 75740 Paris cedex 15
tél. : 01.53.85.77.40 – Télécopie : 01.53.85.76.02
[http : www.iaurif.org](http://www.iaurif.org)

Directeur Général : François DUGENY
Directeur du Département Transports et Infrastructures : Alain MEYERE
Auteur de l'étude : Louis SERVANT, chargé d'études

© IAURIF –juillet 2007

Crédit photos de couverture : RATP Jean François MAUBOUSSIN et Didier DUPUY, MARNE ET MORIN

REMERCIEMENTS

L'auteur de l'étude remercie toutes les personnes qui l'ont aidé dans sa tâche (Voir en Annexe 1 la liste des personnalités auditionnées ou contactées).

Les résultats et conclusions de cette étude sont tributaires des données que certaines des personnes contactées ont bien voulu mettre à notre disposition. La nature et la qualité de ces données, variables d'un interlocuteur à l'autre, marquent les limites de notre propre travail.

SOMMAIRE

Synthèse des principales conclusions de l'étude	7
Introduction	13
1. Les émissions de polluants et de gaz à effet de serre liées aux transports	15
1.1 Les polluants	15
1.2 Les gaz à effet de serre	16
1.3 La part des transports routiers dans les émissions régionales	16
1.4 La part des émissions des bus franciliens au sein du transport routier	17
2. Evolution des normes européennes d'émissions des moteurs de poids lourds et de bus	19
3. Description sommaire des motorisations bus existantes	21
3.1 Le moteur diesel	21
3.2 Le moteur GPL	28
3.3 Le moteur GNV	28
3.4 La composition de la flotte bus RATP	30
4. Les émissions et les technologies bus étudiées	31
4.1 Les technologies existantes	31
4.2 Les technologies futures	32
4.3 Les émissions de gaz à effet de serre du puits à la roue	32
5. La méthodologie	33
6. La comparaison des émissions mesurées sur les véhicules existants	35
6.1 Les données	35
6.2 L'évolution des émissions	37
6.3 Commentaires des résultats	40
7. La comparaison des émissions mesurées sur les véhicules disponibles dans un futur proche	43
7.1 Les données	43
7.2 L'évolution des émissions	46
7.3 Commentaires des résultats	47

8. Les émissions de gaz à effet de serre du puits à la roue	49
8.1 Calcul des émissions de gaz à effet de serre du puits à la roue	49
8.2 Commentaires des résultats	51
9. Les coûts environnementaux et économiques	53
9.1 Les coûts environnementaux	53
9.2 Les coûts économiques	56
9.3 Conclusions	60
10. Les évolutions possibles des motorisations thermiques diesel et GNV	63
10.1 L'étude AFGNV	63
10.2 L'étude JRC-CONCAWE-EUCAR	68
10.3 Conclusion	78
11. Les technologies potentielles du futur à moyen et long terme : le bus électrique et le bus hybride	81
11.1 Le bus électrique	81
11.2 Le bus hybride	87
11.3 L'évaluation des bus hybrides de New-York	93
11.4 Conclusions sur les potentialités des bus électriques et hybrides	97
Bibliographie sommaire	99
Quelques sites Internet	101
Annexe 1 : Personnalités auditionnées ou contactées	103
Annexe 2 : Calcul de la part des bus RATP et OPTILE dans la consommation régionale des carburants routiers (année 2003)	105
Annexe 3 : Sigles utilisés	107

SYNTHESE DES PRINCIPALES CONCLUSIONS DE L'ETUDE

La comparaison a porté sur 16 technologies existantes - ou disponibles à court terme - appartenant aux trois filières technologiques de moteurs thermiques : diesel, GPL (gaz de pétrole liquéfiés) et GNV (gaz naturel véhicule).

Après l'analyse de l'évolution des émissions au fur et à mesure de l'introduction de nouvelles normes et d'équipements de dépollution on a calculé les coûts économiques et environnementaux des trois filières technologiques : diesel, GPL et GNV.

On a ensuite examiné les évolutions possibles des motorisations thermiques diesel et GNV puis des technologies électriques et hybrides.

1. LE DIESEL DESORMAIS EQUIVALENT AU GNV ET MEILLEUR QUE LE GPL

Les résultats concernent d'une part les **émissions réglementées** et mesurées (selon un cycle RATP) **des polluants locaux** - le monoxyde de carbone (CO), les hydrocarbures non méthaniques (HC), les oxydes d'azote (NO_x), et les particules (PM) – et d'autre part les **émissions de gaz à effet de serre**, exprimées en équivalent gaz carbonique (CO₂) et calculées « du puits à la roue » (de l'extraction à la consommation).

- 1.1. **Sauf pour le monoxyde de carbone (CO), les normes ont permis de réduire très sensiblement les émissions des polluants locaux mais nettement moins celles des gaz à effet de serre (équivalent CO₂).** Ainsi, pour la filière diesel, le passage de Euro 1 (octobre 1993) à Euro 3 (octobre 2001) a réduit les émissions d'HC de 23%, celles de NO_x de 37% et celles de PM de 87%, mais celles de CO₂ de seulement 17%. La moindre réduction des émissions de CO₂ provient du fait qu'elles sont directement liées à la consommation de carburant fossile dont la baisse est plus difficile à obtenir que celles des polluants locaux. Le passage à Euro 5 permettra de poursuivre ces réductions¹ : - 94% pour les HC, -60% pour les NO_x, -62% pour les PM et -16% pour le CO₂.
- 1.2. **Dans la filière diesel on note la très grande efficacité du filtre à particules (FAP)** qui retient non seulement les grosses particules mais également les micro-particules (les plus nocives). Par exemple équiper d'un FAP un bus diesel Euro 3 permet de diminuer de 99% ses émissions de HC et de 89% celles de PM. Cependant les émissions de NO_x baissent peu (-5%), tandis que celles de CO₂ augmentent légèrement (+2%). L'augmentation du CO₂ est directement liée à celle de la consommation de carburant créée par l'usage du FAP.
- 1.3. **Les biocarburants en revanche ne sont pas très intéressants pour les polluants locaux** ; ils ont même tendance à accroître les émissions de NO_x. **Leur principal intérêt est de réduire les émissions de CO₂ « du puits à la roue »** : -23% quand on passe d'un bus Euro 3 fonctionnant au seul gazole à un bus consommant du biocarburant mélangé à hauteur de 30% au gazole.
- 1.4. Si on compare les trois filières technologiques on s'aperçoit qu'**à ce jour le bus GPL est le moins intéressant** : il émet plus de NO_x que ses concurrents (+25% par rapport au diesel Euro 5 et +125% par rapport au GNV Euro 3) et de CO₂ (+47% par rapport au diesel Euro 5 et +15% par rapport au GNV Euro 3) tout en n'apportant pas d'avantage décisif sur les autres émissions.

¹ Ces bus seront systématiquement équipés d'un filtre à particules (FAP) et d'un système DeNO_x alors que le bus Euro 3 de base ne l'est pas

- 1.5. **La compétition se fait donc actuellement entre le bus diesel et le bus GNV.** Le premier a fait nettement plus de progrès que ce dernier, de sorte que **l'avantage du GNV réside surtout dans les émissions de NO_x** (le GNV Euro 3 en émet 4,5 fois moins que le diesel Euro 3). Cependant le diesel Euro 5 permettra de réduire ce ratio à 1,8 (grâce au système DeNO_x). Le GNV émet en revanche plus de CO₂ (+5% par rapport au diesel Euro 3 et +27% par rapport au diesel Euro 5); **l'usage du biocarburant à 30% de dosage augmente l'attrait du diesel pour la réduction de l'effet de serre** (dans ce cas le GNV émet 64% de plus de CO₂ que le diesel Euro 5).

Les deux filières peuvent donc aujourd'hui être considérées comme quasi équivalentes du point de vue des émissions ce qui n'était pas le cas en 1996, lorsque le Conseil Régional a lancé son programme « bus propres ». Il était alors justifié de favoriser à la fois l'acquisition de bus GPL et GNV malgré leur surcoût d'achat élevé (de l'ordre de 20%) par rapport au bus diesel. Il était également judicieux de financer l'équipement des bus diesel en filtres à particules.

2. DES SURCOUTS DONT LA RENTABILITE SOCIOECONOMIQUE DOIT ÊTRE REEVALUEE PERIODIQUEMENT

L'analyse des coûts environnementaux actualisés sur la durée de vie des véhicules, calculés selon le cycle conventionnel ADEME-RATP, confirme le constat précédent. Il était alors justifié de favoriser à la fois l'acquisition de bus GPL et GNV malgré leur surcoût d'achat élevé (de l'ordre de 20%) par rapport au bus diesel. Il était également judicieux de financer l'équipement des bus diesel en filtres à particules. Le choix d'un bus GPL au lieu d'un bus diesel, tous les deux Euro 2, apportait un « gain » environnemental actualisé de près de 40 000 € sur une durée de vie de 15 ans ; celui d'un bus GNV près de 60 000€ ; l'équipement en FAP d'un bus diesel apportait un « gain » de plus de 25 000 €.

Aujourd'hui, compte tenu des avancées technologiques des bus diesel, la comparaison est totalement modifiée : le bus GPL est moins intéressant que le diesel Euro 5 (« surcoût » de 36 000 €) et l'achat d'un bus GNV EEV au lieu d'un bus diesel Euro 5 n'apporte qu'un « gain » actualisé de 9 000 € (sur une durée de vie de 15 ans) ; si le bus diesel utilise du diester (à 30%) ce « gain » est réduit à 7 400 €.

Les évolutions techniques imposent donc que soient revues périodiquement le contenu des politiques de soutien à l'équipement en véhicules propres pour tenir compte des améliorations des performances des véhicules.

3. ET QUI DEPEND DES CONDITIONS D'EXPLOITATION :

L'analyse des coûts économiques en situation réelle aboutit à des résultats différents selon que l'on se place dans le cas de l'exploitation RATP ou de celle de l'entreprise MARNE-ET-MORIN.

- 3.1. Dans le cas de la RATP elle confirme le manque d'intérêt du bus GPL à cause de son coût économique plus élevé que les autres filières (+21% par rapport au diesel et +9% par rapport au GNV) non compensé par des « gains » environnementaux (son coût global actualisé est 17% plus élevé que celui du diesel Euro 3 et 15% plus élevé que celui du GNV Euro 3).

A l'inverse, le coût économique actualisé du bus GNV est plus élevé (+11%) que celui du bus diesel mais si on y ajoute le coût environnemental actualisé le bilan global est quasiment le même. La subvention régionale égalise, pour l'entreprise, le coût économique des bus GNV et diesel et le gain environnemental apporté par le bus GNV (49 000 €) est du même ordre que celle-ci : la subvention régionale actuelle apparaît donc justifiée.

- 3.2. En revanche, dans le cadre d'exploitation de l'entreprise MARNE-ET-MORIN, et avec les données fournies par cette entreprise, le coût économique actualisé du bus GNV est beaucoup plus élevé (+41%) que celui du bus diesel, même avec la subvention régionale (qui s'élève à 108 000 €). Comme le bus diesel est également subventionné (72 000 €), seule la différence (36 000 €) est à prendre en compte. Or celle-ci excède très largement le gain environnemental du bus GNV (ici égal à 13 000 €). Dans ce cas, le bus GNV apparaît beaucoup plus coûteux que le bus diesel pour l'entreprise sans que l'effort financier régional se justifie au regard du seul coût environnemental évité. L'écart de subvention régionale entre GNV et diesel est tout à la fois insuffisant pour compenser les surcoûts économiques de la filière GNV, et trop élevé par rapport aux avantages environnementaux que le recours à cette filière procure à la collectivité.
- 3.3. Ces résultats très différents s'expliquent essentiellement par le contexte d'exploitation et la taille de l'entreprise :
 - Circulant en périphérie, dans des secteurs moins denses que ceux de proche couronne, les lignes MARNE-ET-MORIN présentent des consommations, en particulier pour le diesel, nettement plus faibles que celles de la RATP. De ce fait, elles émettent moins de polluants et de gaz à effet de serre (GES) au km alors qu'elles doivent supporter des coûts fixes du même ordre.
 - Du fait de sa taille qui se répercute sur son volume de commandes, l'entreprise MARNE-ET-MORIN paie beaucoup plus cher son GNV que la RATP.

4. LES EVOLUTIONS POSSIBLES DES MOTORISATIONS THERMIQUES DIESEL ET GNV

Les rares études récentes disponibles concernent uniquement les voitures particulières. Elles concluent toutes les deux, pour le moyen terme (2010-2015) à l'avantage potentiel du GNV par rapport au gazole pour ce qui est des émissions de gaz à effet de serre.

- 4.1. L'étude la plus complète (étude européenne JRC-CONCAWE-EUCAR) aboutit à **l'avantage du GNV sur le gazole** lorsqu'on n'utilise pas de biocarburant : à l'horizon 2010 le diesel est moins consommateur d'énergie (-25%) du puits à la roue mais émet 13% de plus de gaz à effet de serre. Pour les versions hybrides (2010 et au-delà) le GNV aboutit à une consommation d'énergie équivalente au diesel et émet 20% de gaz à effet de serre en moins.
- 4.2. En revanche si on tient compte des biocarburants de première génération et des carburants de synthèse à partir de la biomasse le bilan gaz à effet de serre du diesel s'améliore : les émissions du puits à la roue baissent en proportion du taux d'introduction de ces carburants alternatifs. **A partir d'un taux d'incorporation de biocarburant variable selon le carburant alternatif retenu, la comparaison diesel/GNV pour les émissions de gaz à effet de serre s'inverse.**
- 4.3. Cependant, le **coût marginal estimé de la tonne de carbone évitée** quand on introduit une nouvelle technologie (en remplacement du gazole pur) **est dans toutes les options envisagées supérieure à la valeur tutélaire française de 100 €** (valeur 2000 retenue

dans l'instruction cadre du 25 mars 2004 du ministère des transports), soit 27,3 € la tonne de CO₂.

- 4.4. Les opérations les plus intéressantes sont l'introduction des bio-diesels (première génération) et des gazoles de synthèse à partir du bois (deuxième génération) : coût de la tonne de CO₂ évitée allant de 32 à 188 €. Le procédé de gazéification BL (« Black liquor ») est le plus performant : 51 € pour la synthèse du gazole ex-bois et 32 € pour le di-méthyl-éther)

Les versions non hybrides GPL et GNV ne sont pas intéressantes selon le critère de coût à la tonne de CO₂ évitée : de 305 à 684 €. Les versions hybrides GNV et diesel sont encore plus chères : respectivement 508 et 1062 €.

5. LES TECHNOLOGIES POTENTIELLES DU FUTUR : LE BUS ELECTRIQUE ET LE BUS HYBRIDE².

- 5.1. Malgré ses nombreux avantages d'utilisation (fiable, silencieux, agréable à conduire, très bon rendement du moteur, couple moteur plus important que le diesel au démarrage, entretien relativement facile et peu coûteux, économe en fonctionnement, pas d'émissions polluantes ou de gaz à effet de serre) le bus électrique risque de se limiter pendant encore assez longtemps à l'exploitation de lignes urbaines courtes par des véhicules de gabarit réduit.

En effet son développement est actuellement fortement contrecarré par le poids et le coût des batteries ainsi que par le coût du véhicule lui-même. Or, même en cas de doublement d'ici 2020 de la capacité massique des batteries, le poids des batteries nécessaires demeurera environ 15 fois plus important que celui du gazole (ce calcul tient compte du rendement 3 fois plus élevé du moteur électrique par rapport au moteur thermique).

Il devrait toutefois être possible d'améliorer les performances en exploitation, notamment l'autonomie, en couplant des batteries (réservoir d'énergie) et des supercapacités (réservoir de puissance), avec récupération de l'énergie de freinage et recharges rapides en ligne (aux arrêts), ce qui permettrait l'usage du bus électrique autrement que sur des lignes urbaines courtes. Reste à savoir si le bilan économique sera attractif.

Par ailleurs et dès maintenant les constructeurs cherchent à réduire le coût des véhicules électriques. C'est le cas par exemple de GEPEBUS avec l'« OREOS 40 » qu'il prévoit de lancer en 2008, véhicule plus petit (40 places) que celui qui équipe les lignes Montmartrobus (50 places) mais deux fois moins cher

- 5.2. Dans l'attente, soit d'une rupture technologique dans le domaine des batteries, soit d'une technologie de remplacement du moteur diesel (la pile à combustible ?), la solution intermédiaire qu'est le bus hybride diesel/électrique devrait se développer³.

Le bus hybride n'a pas encore percé en Europe. En revanche il se développe aux Etats-Unis, plus particulièrement dans la ville de New-York où le parc atteignait 550 bus hybrides fin 2006. L'étude du NREL (National Renewable Energy Laboratory) publiée en janvier 2006 montre que, sur le cas new-yorkais, le remplacement de bus diesel par des bus hybrides est rentable malgré un surcoût important. Ce résultat serait dû pour une large part au fait que les autobus diesel new-yorkais avec lesquels les bus hybrides ont

² L'essentiel des informations provient des documents « Les bus propres en France. Les bus électriques » ADEME, EDF, CERTU (octobre 2004) et « Les technologies des moteurs de véhicules lourds et leurs carburants. Tome 1 » Gabriel PLASSAT (ADEME, janvier 2005).

³ On peut également envisager un bus hybride GNV/électrique

été comparés sont d'anciens modèles nettement plus consommateurs (+39%) que les autobus de la RATP.

- 5.3. Toutefois les progrès possibles dans les technologies batteries et supercapacités laissent espérer l'introduction de tels bus à moyen terme en Europe. A long terme on peut même envisager des bus hybrides rechargeables (c'est-à-dire des véhicules utilisant vraiment deux énergies : le gazole et l'électricité) permettant une bien plus longue utilisation en mode électrique pur. Cela implique, outre les progrès techniques, des réductions importantes sur les coûts des batteries et supercapacités.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

- En dix ans, les performances environnementales des autobus se sont améliorées à des rythmes différents selon les filières (diesel, GNV et GPL). Dans les dix à quinze ans qui viennent, ces évolutions se poursuivront et il est probable que des technologies non utilisées à grande échelle aujourd'hui en raison soit de leur coût, soit de performances limitées qui en réduisent le domaine d'utilisation, deviennent plus intéressantes. Ce pourrait être le cas des autobus hybrides associant moteur électrique et moteur thermique dont l'intérêt serait renforcé s'ils étaient rechargeables.
Dans ces conditions, l'avantage que présente une filière particulière par rapport à une autre est susceptible d'évoluer et **il serait bon que le dispositif de soutien de la Région Ile-de-France aux véhicules propres et économes (filières faisant l'objet d'une aide et montant de la subvention) soit périodiquement révisé** pour en tenir compte.
- Les gains environnementaux apportés par les filières actuelles ou futures sont très sensibles aux conditions d'exploitation. Il serait bon de réfléchir à la manière d'en tenir compte lors de l'attribution des subventions en ayant toutefois présent à l'esprit que l'équipement en véhicules propres et économes comporte aussi une dimension civique et exemplaire.

INTRODUCTION

A la fin des années 90 l'acquisition de « bus propres », au sens de la loi n°96-1236 sur « l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie » (LAURE) du 30 décembre 1996, était une priorité de l'Exécutif régional.

A l'époque les bus diesel avaient une mauvaise image de marque. Outre la pollution locale imputable au moteur diesel - essentiellement les oxydes d'azote (NO_x) et les particules (PM) - les bus dégageaient une fumée noire très visible surtout pendant les accélérations des véhicules.

Malgré un début de renforcement des normes européennes sur les moteurs de poids lourds et de bus (la norme EURO 2 était applicable à partir du 1^{er} octobre 1996) les collectivités locales françaises - dont le Conseil régional d'Ile-de-France - ont souhaité disposer très rapidement de bus propres.

On a donc favorisé l'emploi de motorisations au gaz de pétrole liquéfiés (GPL) et surtout au gaz naturel véhicule (GNV). Ces véhicules étaient sensiblement plus « propres » que le diesel : moins d'émissions d'hydrocarbures (HC), d'oxydes d'azote (NO_x), de particules (PM) et pas de fumées noires. En outre ils sont plus silencieux. En revanche ils sont plus coûteux (tant à l'investissement qu'à l'exploitation) et plus consommateurs d'énergie.

Mais le diesel a fait ensuite de gros progrès et l'avantage écologique du GPL et du GNV s'est sensiblement réduit pour plusieurs raisons :

- l'arrivée du filtre à particules (FAP) a permis de réduire drastiquement (de l'ordre de 90%) les émissions de particules et d'éliminer les fumées noires. L'avantage du FAP est qu'il peut être monté en retrofit sur des véhicules existants.
- le problème des oxydes d'azote (NO_x) est en voie de résolution grâce à la mise au point récente de systèmes « DeNO_x » permettant de baisser très fortement ces émissions.
- les exploitants franciliens - notamment la RATP - mettent en avant le fait que les bus GPL et GNV sont à la fois plus coûteux et plus difficiles à exploiter.
- Enfin, avec la montée rapide du prix du pétrole et du gaz, la contrainte énergétique est devenue beaucoup plus forte ; or le moteur diesel est plus économe en énergie que ceux au GPL et au GNV.

Toutes ces considérations ont amené le Conseil régional à demander à l'IAURIF de faire une évaluation de sa politique passée, de comparer les technologies existantes à la fois sur leurs performances écologiques et leurs coûts économiques et à appréhender les évolutions technologiques futures. C'est l'objet de cette étude.

Après un rappel sur les émissions de polluants et de gaz à effet de serre liées aux transports (chapitre 1) et sur l'évolution des normes européennes d'émissions des moteurs de poids lourds et de bus (chapitre 2) on décrira sommairement les motorisations bus existantes (chapitre 3) puis les émissions et les technologies bus étudiées (chapitre 4) ainsi que la méthodologie (chapitre 5). On aborde ensuite la comparaison des émissions mesurées sur les véhicules existants (chapitre 6) et celles sur les véhicules disponibles dans un futur proche (chapitre 7). On procède en outre à une estimation des émissions de gaz à effet de serre « du puits à la roue » (de l'exploitation à la consommation des carburants) (chapitre 8). La comparaison se termine par le calcul des coûts environnementaux et économiques actualisés

des trois grandes filières en service : diesel, GPL et GNV (chapitre 9). On aborde enfin la prospective technologique en examinant les évolutions possibles des motorisations thermiques en concurrence aujourd'hui - diesel et GNV- (chapitre 10) et les technologies potentielles du futur à moyen et long terme : le bus électrique et le bus hybride (chapitre 11).

1. LES EMISSIONS DE POLLUANTS ET DE GAZ A EFFET DE SERRE LIEES AUX TRANSPORTS⁴.

1.1 LES POLLUANTS

Les polluants provenant des transports routiers sont classés selon deux catégories :

1.1.1 Les polluants primaires qui sont émis directement à l'échappement

- Le monoxyde de carbone (CO) est dû à une combustion rapide et incomplète des carburants (une bonne combustion donne du CO₂). Prenant la place de l'oxygène dans l'hémoglobine du sang, il provoque un manque d'oxygénation des organes conduisant à des intoxications chroniques (maux de têtes, vertiges, vomissements...). Il peut être mortel ou laisser des séquelles irréversibles.
- Les composés organiques volatils non méthaniques (COVNM), dont les hydrocarbures non méthaniques (HC hors méthane), et plus particulièrement les composés aromatiques tels que le benzène (C₆H₆), proviennent également d'une combustion incomplète du carburant et de l'huile. L'effet sur la santé est variable suivant le polluant, allant de la simple gêne olfactive à une irritation ou diminution de la capacité respiratoire. Le benzène est cancérigène à forte concentration.
- Les oxydes d'azote (NO et NO₂) résultent de l'association de l'azote et de l'oxygène à haute température. A la sortie du pot d'échappement le mélange est de l'ordre de 90% de NO (qui se transforme ensuite en NO₂) et de 10% de NO₂, gaz irritant qui provoque une hyper-réactivité bronchique chez les asthmatiques et augmente la sensibilité des bronches aux infections chez l'enfant.
L'Observatoire Régional de la Santé (ORS) a estimé que la pollution à l'oxyde d'azote pouvait augmenter de 7,9% les hospitalisations pour asthme des moins de 15 ans, de 3,3% celles pour maladies de l'appareil circulatoire et de 2% la mortalité toutes causes non accidentelles⁵.
- Les composés soufrés sont principalement émis par les véhicules diesel. Irritants des voies respiratoires, ils altèrent la fonction pulmonaire chez l'enfant et provoquent des crises d'asthme chez les asthmatiques.
- Les micro-particules (PM₁₀), ont la même provenance que les composés soufrés et pénètrent jusqu'aux bronchioles, en y véhiculant d'autres polluants toxiques : irritations et altération de la fonction respiratoire, surtout chez l'enfant, même à des concentrations relativement basses. Elles augmentent la mortalité pour causes respiratoires et cardio-vasculaires.
L'ORS a estimé que la pollution par les particules fines pouvait augmenter de 5,1% les hospitalisations pour maladies respiratoires des moins de 15 ans, de 4,7% la

⁴ Pour plus d'information voir l'étude « La pollution atmosphérique et les transports franciliens ». Louis SERVANT, Amélie SEBEK LAURIF, novembre 2004.

⁵ ORS Ile-de-France : « ERPURS 1987-2000 ». Janvier 2003. Les valeurs mentionnées correspondent à une augmentation de la pollution de fond d'un niveau de base (celui non dépassé par les 5% de jours les moins pollués de l'année) à un niveau médian (celui atteint ou dépassé la moitié des jours de l'année).

mortalité pour cause respiratoire et de 2,4% la mortalité pour causes cardio-vasculaires

Pour l'instant, les émissions des véhicules sont réglementées pour quatre de ces polluants : le monoxyde de carbone (CO), les hydrocarbures (HC), les oxydes d'azote (NO_x), et les particules (PM₁₀).

1.1.2 Les polluants atmosphériques secondaires qui résultent de la transformation chimique des premiers, dans l'atmosphère.

- L'ozone (O₃) résulte de la transformation chimique des oxydes d'azote et des composés organiques volatils non méthaniques sous l'action des ultraviolets. Ce gaz irritant altère la fonction pulmonaire, accroît les symptômes respiratoires (toux, oppression thoracique), notamment chez les sujets sensibles et exacerbe les crises d'asthme, surtout en cas d'exercice marqué.
L'ORS a estimé que la pollution par l'ozone pouvait augmenter de 1,9% les hospitalisations pour bronchopneumopathies chroniques obstructives (BPCO)
- L'acide sulfurique (H₂SO₄) est formé à partir des composés soufrés, contenu dans les pluies acides qui menacent la vie des forêts et des eaux, des cultures et des bâtiments, voire la santé humaine.
- L'acide nitrique (HNO₃) provient des oxydes d'azote et est également contenu dans les pluies acides.

Si la tendance générale en Ile-de-France est à la décroissance des concentrations de polluants locaux, la situation reste encore préoccupante pour le dioxyde d'azote (NO₂) dont la concentration ne connaît pas de baisse notable et excède l'objectif français de qualité de l'air tant en pollution de fond que surtout à proximité du trafic, pour le benzène (C₆H₆) dont les concentrations baissent mais sont toujours trop élevées à proximité du trafic, et enfin pour les particules fines (PM₁₀) dont la concentration de fond stagne depuis 2000 et qui excède les normes sanitaires de qualité de l'air à proximité du trafic.

1.2 LES GAZ A EFFET DE SERRE.

Le dioxyde de carbone (CO₂), qui émane de la combustion des carburants carbonés (carburants d'origine fossile, biocarburants), est très largement dominant dans les transports franciliens.

Le méthane (CH₄), qui vient principalement des véhicules fonctionnant au gaz naturel, est émis en quantités négligeables.

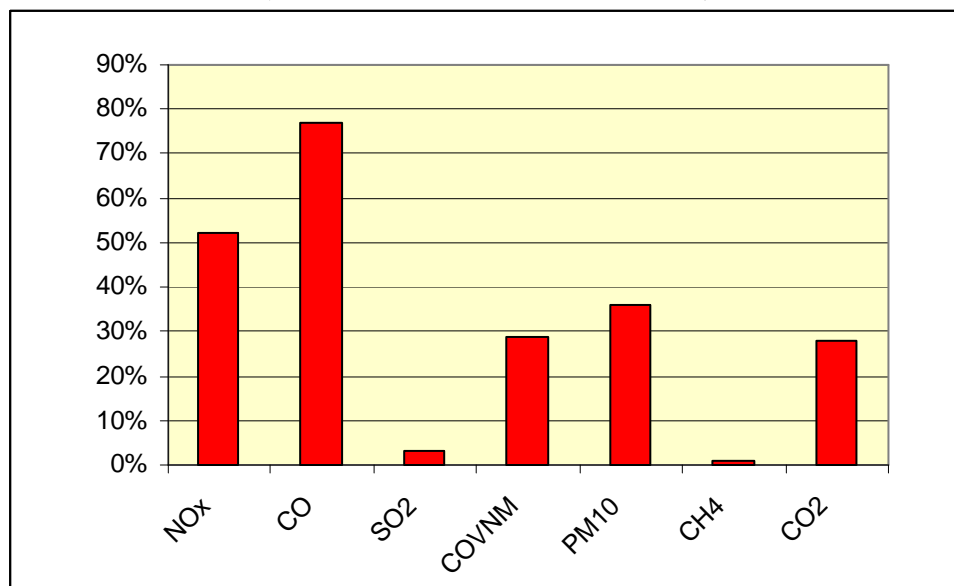
1.3 LA PART DES TRANSPORTS ROUTIERS DANS LES EMISSIONS REGIONALES.

Au sein du secteur des transports terrestres franciliens, la circulation routière est responsable de la quasi totalité des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre :

100% des émissions de méthane (CH₄), 99,9% de celles de monoxyde de carbone (CO), 99,8% de celles des composés organiques volatils non méthaniques (COVNM), 99,4% de celles des micro-particules (PM₁₀), 99,4% de celles de dioxyde de carbone (CO₂), 99,3% de celles de dioxyde de soufre (SO₂) et 98,3% de celles des oxydes d'azote (NO_x). (Source : inventaire 2000 d'AIRPARIF)

Par rapport aux autres secteurs d'activité, elle est le premier émetteur de monoxyde de carbone (CO) avec 77% du total, d'oxydes d'azote (NO_x) avec 52% du total, de micro-particules (PM₁₀) avec 36% du total et le second pour les composés organiques volatils non méthaniques (COVNM) avec 29% du total et le dioxyde de carbone (CO₂) avec 28% du total. Elle joue un rôle minime dans les émissions de dioxyde de soufre (SO₂) et de méthane (CH₄) [Figure 1.1]

Figure 1.1 Part du transport routier dans les émissions de polluants en IDF
(Source AIRPARIF, inventaire 2000)



1.4 LA PART DES EMISSIONS DES BUS FRANCILIENS AU SEIN DU TRANSPORT ROUTIER.

On peut estimer grossièrement la part des émissions des bus franciliens au sein du transport routier en calculant leur part de consommation annuelle dans les ventes de carburants routiers.

Ce calcul est détaillé dans l'annexe 2.

On constate que les quelques 8000 bus de la RATP et d'OPTILE⁶ ne représentent que 2,2% de la consommation de carburants routiers et des émissions de CO₂ en Ile-de-France. (voir figure 1.2)

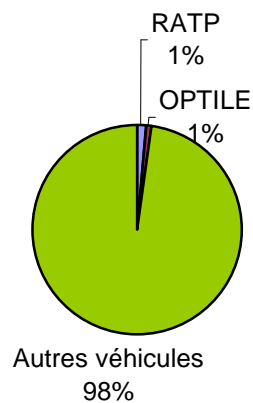
Leur contribution aux émissions de GES et à la pollution de fond des transports routiers est donc minime. En revanche, elle peut être élevée à proximité de certains axes très utilisés par

⁶ Organisation Professionnelle des Transports d'Ile-de-France

les autobus. La réduction de ces émissions est donc à rechercher, non seulement pour contribuer à l'amélioration de la qualité générale de l'air francilien, mais également à l'amélioration de cette qualité à proximité de ces axes et enfin pour renforcer l'image de marque des transports en commun routiers.

Par ailleurs, dans le contexte d'un pétrole durablement cher, les économies d'énergie de propulsion sont un facteur non négligeable de réduction des coûts d'exploitation des réseaux de bus.

Figure 1.2 : Part des bus RATP et OPTILE dans la consommation de carburants routiers. Année 2003 (Source : CPDP, RATP, OPTILE)



2. EVOLUTION DES NORMES EUROPEENNES D'EMISSIONS DES MOTEURS DE POIDS LOURDS ET DE BUS

A la différence des véhicules particuliers les normes de poids lourds et bus s'appliquent aux moteurs, compte-tenu du fait que les parcs concernés sont nettement moindres et que les moteurs sont susceptibles d'équiper différents types de véhicules.

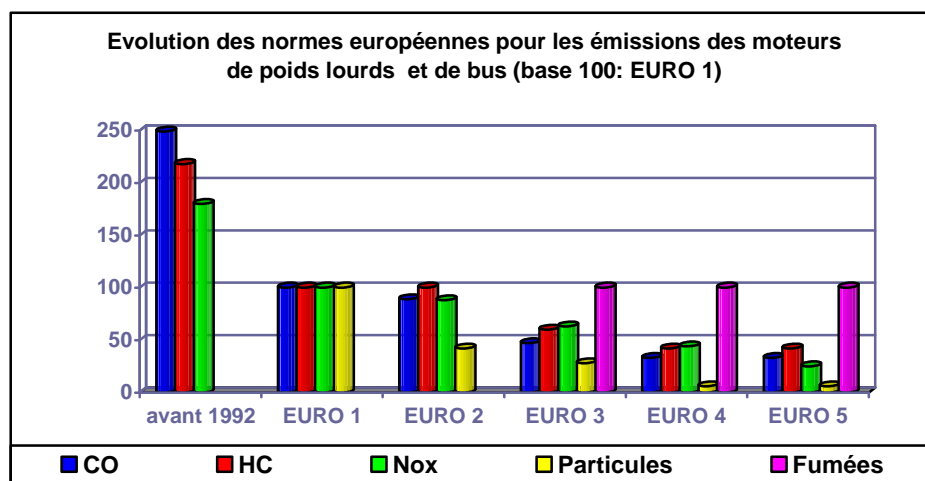
Les valeurs sont exprimées en g/kWh c'est à dire en grammes de polluant par unité d'énergie fournie par le moteur alors que les émissions des véhicules en fonctionnement doivent être exprimées en g/km. En conséquence, afin de comparer l'évolution réelle des émissions des bus il est nécessaire de faire des tests sur véhicules selon un cycle de fonctionnement déterminé. Le cycle retenu est le cycle ADEME/RATP correspondant au type de fonctionnement de la RATP. Ce sont ces résultats de tests que l'on utilisera pour l'étude comparative des émissions.

Toutefois l'examen des normes permet d'avoir une première idée sur les progrès réalisés. Ces normes sont indiquées dans le tableau 2.1 et la figure 2.1 ci-dessous.

Tableau 2.1 - Normes européennes d'émissions des moteurs de poids lourds et de bus

Etapas	Dates	Polluants en g/kWh sur cycle normalisé					
		CO	HC	NOx	HC+NOx	Particules	Fumées
EURO 0	avant 1992	11,20	2,40	14,40	16,80	-	
EURO 1	01/10/1993	4,50	1,10	8,00	9,10	0,360	
EURO 2	01/10/1996	4,00	1,10	7,00	8,10	0,150	
EURO 3	01/10/2001	2,10	0,66	5,00	5,66	0,100	0,50
EURO 4	01/10/2006	1,50	0,46	3,50	3,96	0,020	0,50
EURO 5	01/10/2009	1,50	0,46	2,00	2,46	0,020	0,50

Figure 2.1 Evolution des normes européennes pour les émissions des moteurs de poids lourds et de bus.



Ces évolutions sont considérables : on constate qu'un moteur neuf actuel (EURO 4) émet 7,5 fois moins de CO, 5,2 fois moins de HC et 4,1 fois moins de NO_x que son homologue d'avant 1992. Pour les particules les progrès sont nettement plus importants puisqu'un moteur EURO 4 actuel en émet 18 fois moins que son homologue EURO 1 (mis sur le marché le 1^{er} octobre 1993). Elles ont été obtenues grâce à l'amélioration de la combustion dans les moteurs mais aussi grâce à celle de la qualité du gazole.

Le tableau 2.2 ci-après résume l'évolution des normes européennes pour la qualité du gazole. L'effort principal a porté sur la teneur en soufre.

Tableau 2.2 Evolution des normes de qualité du gazole en Europe
(Source : IFP)

	1998	Janvier 2000	Janvier 2005	Janvier 2009
Soufre (max.)	500ppm	350ppm	50ppm	10ppm*
Cétane (min.)	49	51	51	**
Poly-aromatiques	-	11% max.	11% max.	**
Densité (max.)	860	845	845	**

* Les carburants à 10ppm de soufre devront être commercialement disponibles

** A l'étude

Le tableau 2.3 ci-dessous présente la composition des flottes de bus RATP et OPTILE selon les normes EURO.

Tableau 2.3 - Composition du parc bus francilien selon les normes Euro.
(Source : RATP, OPTILE)

	RATP (2005)		OPTILE (2004)		RATP+OPTILE	
	Valeur	%	Valeur	%	Valeur	%
Euro 0	350	9%	673	17%	1023	13%
Euro 1	798	20%	679	17%	1477	18%
Euro 2	1955	48%	1480	37%	3435	43%
Euro 3	977	24%	1165	29%	2142	27%
Total	4080	100%	3997	100%	8077	100%

3. DESCRIPTION SOMMAIRE DES MOTORISATIONS BUS EXISTANTES⁷

On ne décrit ici que les technologies en exploitation de manière significative en Ile-de-France, à savoir les bus diesel, GPL⁸ et GNV⁹. Pour les véhicules diesel on décrit les récents équipements destinés à réduire les émissions polluantes et le biocarburant ajouté au gazole. Les bus électriques et hybrides seront traités dans le chapitre 11 en tant que technologies pouvant émerger dans le futur.

3.1 LE MOTEUR DIESEL

Rudolf Diesel (1858-1913) a conçu le moteur à combustion interne qui porte son nom avec l'objectif d'améliorer le rendement thermodynamique des moteurs, en trouvant un remplaçant à la machine à vapeur.

De fait, son rendement énergétique est de 30 % supérieur à celui d'un moteur à essence de même puissance.

De nombreux carburants peuvent lui être associé comme les huiles végétales ou divers sous-produits pétroliers. Néanmoins, le gazole, plus lourd que l'essence, reste le combustible par excellence du diesel.

Son principe de fonctionnement repose sur un excès d'air du mélange air-gazole, et sur un taux de compression élevé. Ce dernier permet l'auto-allumage du mélange, à la différence du moteur à essence où l'allumage est obtenu grâce à une étincelle électrique. C'est donc un moteur à auto-allumage par compression.

A la différence du moteur à essence - où le mélange air-essence est introduit dès la phase d'admission - seul l'air est aspiré dans la phase d'admission. Il est ensuite comprimé ce qui l'échauffe jusqu'à une température supérieure à 450°C (température d'auto-inflammation du gazole) Le gazole n'est injecté (sous forte pression) qu'en fin de compression et s'auto-enflamme spontanément au contact de l'air chaud. Cette procédure permet d'obtenir un taux de compression quasiment double de celui du moteur à essence et par suite un rendement plus élevé.

Pour améliorer le rendement de ce moteur, les constructeurs ont fortement augmenté la pression d'injection du mélange air-gazole. Les nouveaux moteurs, dits « à rampe commune » (common rail) atteignent des pressions de 1500 bars et permettent une économie de consommation de 20 % par rapport aux moteurs précédents.

Actuellement tous les moteurs neufs diesel de base sont équipés d'un pot catalytique d'oxydation réduisant les émissions de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrocarbures (HC). Reste à réduire les émissions de particules (PM) et d'oxydes d'azote (NO_x). C'est l'objet des récents équipements de dépollution décrits ci-après. En outre l'usage des biocarburants permet d'améliorer le bilan des émissions de gaz carbonique (CO₂).

3.1.1 Les récents équipements de dépollution du moteur diesel.

Par rapport aux autres moteurs à combustion interne (essence, GPL et GNV) le moteur diesel émet sensiblement plus de NO_x et de particules (surtout des microparticules). On a donc cherché à réduire ces émissions grâce à des équipements de dépollution : le filtre à particules (FAP) au point depuis quelques années et le récent système DeNO_x.

⁷ L'essentiel des informations provient du document « Les technologies des moteurs de véhicules lourds et leurs carburants. Tome 1 » Gabriel PLASSAT (ADEME janvier 2005)

⁸ GPL : gaz de pétrole liquéfiés

⁹ GNV : gaz naturel véhicule

3.1.1.1 Le filtre à particules (FAP)

Le FAP a pour but de retenir les particules contenues dans les gaz d'échappement. Son principe est simple : un filtre très fin retient les particules d'un diamètre supérieur ou égal à 50 nanomètres¹⁰. Bien entendu ce filtre s'encrasse et se bouche : il est donc nécessaire de le régénérer régulièrement en brûlant les suies qui y sont piégées. Ceci suppose que les suies ne contiennent pas de sulfate, incombustible : il faut donc utiliser un gazole à faible teneur en soufre (50 ppm).

La principale difficulté technique du FAP réside dans la maîtrise de cette régénération périodique du filtre : le brûlage des suies ne doit pas dégrader le filtre et on doit limiter les niveaux de contre-pression atteints dans cette opération.

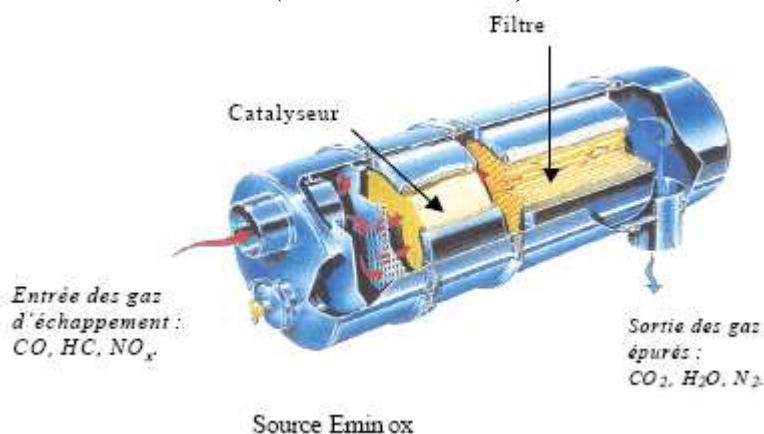
Il existe plusieurs types de FAP reposant sur des technologies différentes. Celles testées par l'ADEME sont décrites ci-dessous.

Après les avoir testées elle-même la RATP a finalement opté pour le filtre CRT d'Eminox.

- Le CRT (Continuous Regenerating Trap). Le filtre est couplé avec le catalyseur d'oxydation qui, sur les véhicules diesel, réduit les émissions de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrocarbures (HC). La régénération du filtre repose sur la formation en amont de celui-ci de dioxyde d'azote (NO₂) qui facilite l'oxydation des suies. Le CRT implique l'utilisation de gazole à très basse teneur en soufre (50 ppm ou moins).

La figure 3.1 montre un exemple de filtre CRT (Filtre Eminox).

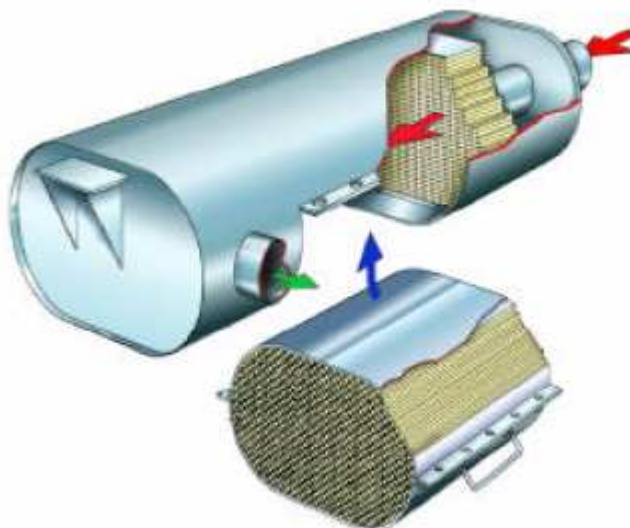
Figure 3.1 - Filtre à particules de type CRT
(Source : ADEME)



¹⁰ un nanomètre vaut un milliardième de mètre soit un millionième de millimètre ou encore un millième de micron (1 micron = 0,001 millimètre). Par conséquent le FAP retient les microparticules de diamètre supérieur à 0,05 micron.

- Le filtre ENGELHARD qui utilise un support filtrant en céramique imprégné de substance catalytique, ce qui permet de réduire la température de régénération à 400 ° C au lieu de 550 à 600 ° C (Voir la figure 3.2). L'utilisation de gazole à très basse teneur en soufre est vivement conseillée mais non impérative.

Figure 3.2 - Filtre ENGELHARD - (Source : ADEME)



- Le filtre AIRMEEX qui utilise un additif (fer et strontium) dans le gazole pour sa régénération (Voir figure 3.3). Son usage ne nécessite pas de gazole à très basse teneur en soufre.

Figure 3.3 - Filtre AIRMEEX (Source : ADEME)



	filtre à particules
marque	ibiden
support	carbure de silicium
dimensions	L = 10 " - D = 9 "
volume	10,4 litres
densité	200 cell./sq. inch

200 cell/sq inch signifie 200 cellules par inch² soit 31 canaux par cm²

- Le filtre COMELA qui repose sur le même principe que le CRT (couplage catalyseur d'oxydation – FAP). (Voir figure 3.4)

Figure 3.4 Filtre COMELA - (Source : ADEME)



Source CReeD

- Le filtre RECYCL’AIR. Dans ce filtre les suies ne sont pas brûlées mais collectées grâce à des plateaux électrostatiques dans une partie du filtre. La maintenance du filtre nécessite donc l’aspiration des suies recueillies et leur traitement en tant que « déchet spécial » (Voir figure 3.5).

**Figure 3.5 Filtre RECYCL’AIR
(Source : ADEME, CREED)**



3.1.1.2 Le système DeNO_x.

Les constructeurs automobiles ont fait des efforts notables pour réduire la formation des oxydes d'azote (NO_x) lors de la combustion dans le cylindre, notamment par l'adoption de la « rampe commune » d'injection à très haute pression et par les injecteurs-pompes unitaires (un par cylindre). Toutefois ces progrès ne permettent pas de respecter les futures normes européennes. On a donc mis récemment au point divers systèmes – dénommés « DeNO_x » pour réduire encore plus ces émissions.

Là encore il existe plusieurs technologies DeNO_x. On décrira seulement les deux solutions les plus répandues : SCR (selective catalytic reduction). et EGR (exhaust gas recirculation).

La technologie SCR a été adoptée par la majorité des constructeurs européens ; cependant SCANIA et MAN ont choisi EGR.

La RATP va tester les deux technologies.

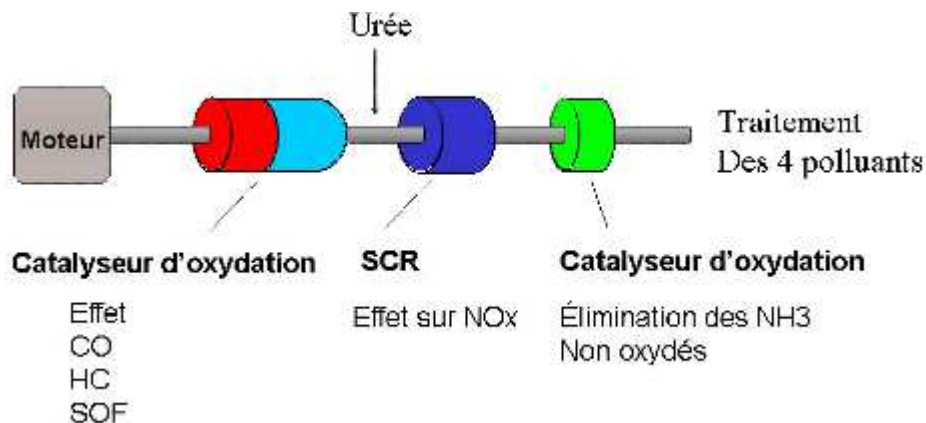
- La technologie SCR (« selective catalytic reduction » ou réduction catalytique sélective) repose sur la transformation chimique des NO_x présents dans les gaz d'échappement en azote (N₂) et en eau (H₂O) par injection d'un additif à base d'urée (CON₂H₄) dans ces derniers.

L'injection directe d'urée n'est possible qu'à haute température (entre 850 et 1 050 °C) et est peu praticable dans l'automobile. On utilise donc un catalyseur qui permet à la fois d'abaisser la température optimale de réaction et d'injecter l'additif dans une zone plus éloignée du moteur, moins sensible aux fluctuations de charge : c'est la réduction catalytique sélective.

Le nom commercial de l'additif est « Adblue ».

La figure 3.6 montre la complexité du montage.

Figure 3.6 Montage de la technologie SCR
(Source : ADEME)



Chaque bus doit être équipé d'un réservoir supplémentaire contenant l'additif et le dépôt doit comporter une infrastructure de stockage et remplissage des véhicules.

Les promoteurs d'Adblue font valoir que leur dispositif SCR permet un gain de consommation de carburant par rapport à un bus EURO 3 (norme applicable jusqu'au 1^{er} octobre 2006)¹¹.

¹¹ Des essais réalisés en exploitation sur 3 réseaux urbains allemands (Hambourg, Stuttgart et Labr) ont permis de constater une baisse de consommation de 5 à 7,5 % [Cf Michel CHLASTACZ « Adblue, EGR : deux solutions pour atteindre EURO 4 » dans « Transport public » no 1059 (juin 2006) pp. 76 à 80.]

- La technologie EGR (« exhaust gas recirculation » ou recyclage des gaz d'échappement) repose sur le retraitement d'une partie des gaz d'échappement et sa réintroduction dans le moteur avec l'air d'admission. Ceci permet une température de combustion moins élevée et diminue les émissions de NO_x. Cette diminution est d'autant plus prononcée que la fraction de gaz recyclés (taux d'EGR) est grande¹².

Les promoteurs de l'EGR font valoir que leur dispositif ne nécessite pas d'adjonction d'additif et évite les coûts d'équipement des bus (réservoir d'Adblue) et des dépôts. D'après eux le seul surcoût se limite au moteur et serait du même ordre que celui du véhicule SCR. Théoriquement la consommation de carburant devrait être un peu plus élevée. L'ADEME a réalisé plusieurs tests (au banc) sur l'usure du moteur liée à la mise en place de l'EGR et a abouti aux conclusions suivantes¹³ :

- l'EGR a tendance à accroître les teneurs en cendre (dégradation de l'huile) ainsi que la teneur en métaux (usure du moteur)
- l'usure est plus marquée dans les conditions de fortes charges
- les effets sont d'autant plus marqués que le taux d'EGR est élevé.

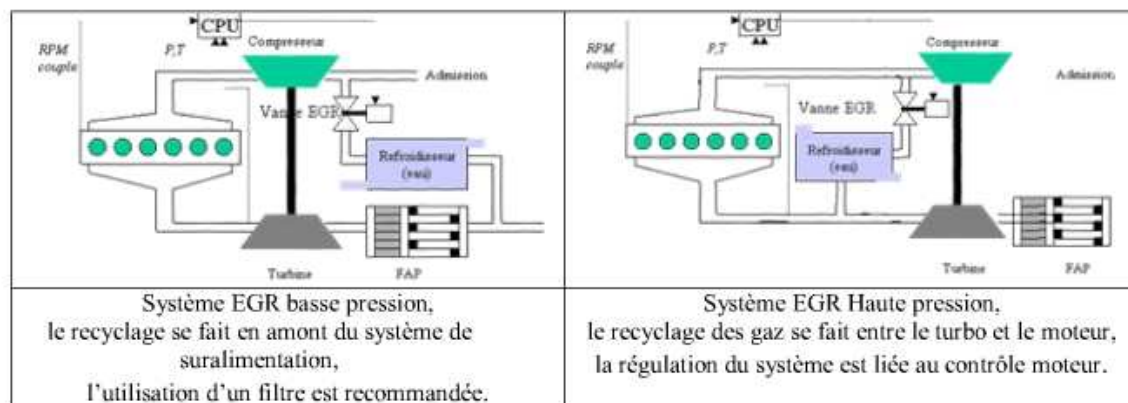
Il existe deux catégories d'EGR :

- les EGR dits internes, directement intégrés au moteur, principalement utilisés pour les moteurs à essence.
- Les EGR externes, basés sur l'utilisation d'une vanne qui prélève la partie des gaz d'échappement destinée à être réintroduite à l'admission. Elle permet l'usage d'un refroidisseur pour abaisser la température des gaz prélevés avant leur ré-injection.

La figure 3.7 montre les deux possibilités d'EGR externes.

Figure 3.7 Les deux possibilités d'EGR externes.

(Source : ADEME)



¹² Pour une quantité de gazole injectée, le remplacement partiel de l'air (qui contient 21% d'oxygène) par des gaz d'échappement (qui contiennent moins de 10% d'oxygène) diminue la concentration d'oxygène et par suite la formation de NO_x à une température donnée.

¹³ « Les technologies des moteurs de véhicules lourds et leurs carburants. Tome 1 » Gabriel PLASSAT (ADEME janvier 2005)

3.1.2 Les biocarburants

3.1.2.1 Définition

L'union Européenne définit le biocarburant comme suit¹⁴ :

« Un biocarburant est un combustible liquide ou gazeux utilisé pour le transport et produit à partir de la biomasse. La biomasse est la fraction biodégradable des produits, déchets, et résidus provenant de l'agriculture, de la sylviculture, des déchets industriels et municipaux. » Cette définition dépasse donc largement les seuls carburants provenant de l'agriculture.

En pratique on distingue deux types de biocarburants :

Ceux de génération 1, existants, fabriqués à partir de la production agricole.

Ceux de génération 2, produits à partir de la biomasse non agricole, existants ou en cours de développement.

Actuellement, dans les bus, seuls les biocarburants de génération 1 sont utilisés.

3.1.2.2 Intérêt et handicap

Le principal avantage des biocarburants est leur bilan global sur les émissions de CO₂ calculé sur le cycle de vie (« de la semence à la roue »).

En effet, comme un carburant classique, le biocarburant est composé d'hydrocarbures et rejette donc une quantité équivalente de CO₂ lors de sa combustion.

En revanche, la biomasse est renouvelable : elle se régénère en quelques années, alors que les carburants fossiles sont non renouvelables (régénération sur plusieurs millions d'années).

En outre, lors de sa croissance, la biomasse absorbe du CO₂ (photosynthèse) en quantité égale à celle produite lors de sa combustion.

Toutefois le bilan CO₂ d'un biocarburant n'est pas équilibré puisque de l'énergie (fossile donc génératrice d'émissions de CO₂) est utilisée pour sa culture, son extraction, sa transformation en biocarburant, le transport et le stockage de ce dernier.

L'IFP (Institut Français du Pétrole) considère que, par rapport au gazole, la réduction d'émissions de CO₂ est de l'ordre de 70 %. Le bilan exact des biocarburants fait encore débat.

Le grand handicap des biocarburants est leur coût de production qui constitue actuellement un frein important à leur développement.

Par la suite on ne s'intéresse qu'aux biocarburants substituables au gazole.

3.1.2.3 Les biocarburants de 1ère et 2ème génération

a) Les biocarburants de 1^{ère} génération substituables au gazole : les EMHV (Ester Méthylique d'Huile Végétale).

Les EMHV sont fabriqués à partir d'huile végétale (provenant du colza, tournesol ou soja) par réaction chimique avec du méthanol (CH₃OH).

En France les EMHV proviennent à 80 % du colza (EMC, Ester Méthylique de Colza) et 15 % du tournesol. Dans les flottes captives (comme les bus), les EMHV sont ajoutés au gazole au taux de 30 %. Elles ont l'avantage d'avoir un bon pouvoir lubrifiant et de ne pas nécessiter de modification du moteur diesel.

On dénomme souvent le mélange obtenu « diester », contraction de diesel et ester.

¹⁴ Directive 2003/30/CE du 8 Mai 2003 visant à promouvoir l'utilisation de biocarburants ou autres carburants renouvelables dans les transports.

b) Les biocarburants de 2^{ème} génération substituables au gazole : les BTL (Biomass To Liquid)

Cette filière est au stade de la recherche-développement. Elle a pour but de fabriquer du gazole de synthèse à partir de la biomasse.

Les matières collectées (bois, herbe,...) sont transformées en « gaz de synthèse » puis en gazole par le procédé de synthèse FISHER-TROPSH, du nom de ses deux inventeurs dans les années 1920.

3.2 LE MOTEUR GPL (GAZ DE PETROLE LIQUEFIES)

A l'instar du diesel, le moteur GPL est un moteur thermique à combustion interne. Outre le carburant (GPL au lieu de gazole) il en diffère par le système d'allumage de la combustion du mélange air-carburant : alors que le moteur diesel utilise l'auto-allumage par compression, le moteur GPL utilise la technologie du moteur à essence où l'allumage est obtenu grâce à une étincelle électrique (allumage commandé).

Le GPL est essentiellement composé de butane (C₄H₁₀) et de propane (C₃H₈), deux gaz issus soit des gisements de gaz naturel soit du raffinage du pétrole. On peut facilement l'amener de l'état gazeux à l'état liquide par une pression inférieure à 10 bars ce qui permet de le stocker et de le transporter facilement.. Son indice d'octane¹⁵ est voisin de celui de l'essence. Pour toutes ces raisons le GPL est facilement employé sur des moteurs modernes à allumage commandé, sous réserve d'aménagements pour la préparation du mélange carburé et de stockage dans des réservoirs dédiés. Cependant comme son pouvoir calorifique volumique est inférieur à l'essence¹⁶ (25 MJ/l contre 33 MJ/l pour l'essence), sa consommation en volume est donc plus élevée que celle de l'essence et a fortiori encore plus que celle du gazole.

Théoriquement un moteur GPL bien réglé émet :

- de faibles rejets de particules
- d'infimes rejets de composés aromatiques¹⁷ (dangereux et parfois cancérigènes comme le benzène)
- des rejets de CO, HC et NO_x pouvant être traités efficacement par le pot catalytique trois voies¹⁸ (car la combustion est stoechiométrique¹⁹)

3.3 LE MOTEUR GNV (GAZ NATUREL VEHICULE)

Le GNV est composé à plus de 80% de méthane (CH₄). Il est incolore, inodore et plus léger que l'air (densité 0,6 par rapport à l'air).

Compte tenu de la résistance à l'autoallumage élevée du méthane (fort indice d'octane), sa combustion est réalisée dans des moteurs à allumage commandé (en général par une bougie) au lieu de l'auto-allumage (moteur diesel).

Comme son indice d'octane est nettement meilleur que celui de l'essence (130 contre 95 pour l'essence) il est possible d'augmenter le taux de compression à 11-13 (au lieu de 10) et l'avance sur allumage de 15° à 25°²⁰ afin d'améliorer le rendement du moteur.

¹⁵ L'indice d'octane mesure la qualité antidétonante d'un carburant. Il caractérise la résistance au cliquetis

¹⁶ En revanche son pouvoir calorifique massique est plus élevé (46 MJ/kg contre 44 MJ/kg pour l'essence)

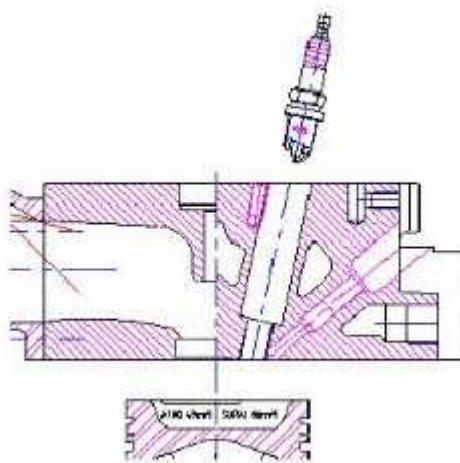
¹⁷ Hydrocarbures apparentés au benzène (C₆H₆). Leur nom provient du fait que beaucoup ont une odeur aromatique.

¹⁸ Pot catalytique spécialement conçu pour éliminer une bonne partie de ces trois polluants.

¹⁹ Combustion opérée avec un mélange stoechiométrique c'est-à-dire avec un mélange carburant/air correspondant à la combustion totale du carburant et de l'oxygène de l'air et à la formation des produits dans leur état d'oxydation le plus avancé (en quelque sorte le mélange optimal). L'efficacité du pot catalytique trois voies est maximale quand le mélange est stoechiométrique.

Pour les véhicules légers on utilise des moteurs à essence modifiés. Pour les véhicules lourds on adopte des moteurs diesel modifiés (en particulier on remplace l'injecteur gazole par une bougie ; voir figure 3.8)

Figure 3.8 - Mise en place d'une bougie dans une culasse Diesel à la place de l'injecteur gazole - (Source : ADEME)



La bi-carburant (GNV-essence) est possible sur les véhicules légers ; en revanche elle est impossible sur les véhicules lourds. Comme ces derniers font partie de flottes captives (c'est le cas des bus) ils peuvent faire le plein dans leur dépôt ou dans une station donnée.

Cependant il est important de noter qu'il n'existe pas de moteur dédié GNV (donc optimisé pour ce carburant) et que les modifications sur le moteur diesel pour l'adapter au GNV sont lourdes et coûteuses :

- mise en place de bougie dans la chambre de combustion et de bobines d'allumage,
- changement ou modification du répartiteur d'admission et du boîtier papillon,
- modification du piston au niveau de sa face supérieure,
- changement de tout le circuit carburant.

Du fait que le gaz naturel est un composé pratiquement pur, son usage permet des émissions moindres de polluants (CO, HC, NOx, particules) que le véhicule diesel de base (sans équipement de dépollution) notamment en site urbain (cas des bus). En particulier :

- il rejette peu de particules toxiques et de composés poly-aromatiques,
- les hydrocarbures imbrûlés émis comportent essentiellement du méthane (CH₄), gaz non toxique (mais gaz contribuant à l'effet de serre).

Toutefois les équipements de dépollution du moteur diesel alliés à l'amélioration de la combustion, permettent de réduire le handicap de ce dernier par rapport au moteur GNV.

En ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre (CO₂ et CH₄), en l'absence d'un moteur dédié GNV, elles sont actuellement du même ordre que celles du moteur diesel en circulation mais légèrement supérieures si on effectue le calcul « du puits à la roue » (voir chapitre 8)

²⁰ Angle de rotation du vilebrequin, exprimé en degrés, entre l'instant où l'étincelle jaillit et le point mort haut du piston..

3.4 - LA COMPOSITION DE LA FLOTTE BUS RATP

Le tableau 3.1 montre la composition de la flotte bus RATP selon les diverses technologies et les normes Euro.

On note en particulier le très fort équipement du parc diesel en filtres à particules (FAP) : 79% (représentant 76,5% du parc total)

Tableau 3.1 Composition de la flotte bus RATP selon les technologies et les normes Euro. Année 2005 - (Source : RATP)

Normes	GNV	GPL	diesel pur	diesel + FAP	diesel + FAP + B30%	diesel + émulsion	diesel + émulsion + FAP	Total
Euro 0			5	335		10		350
Euro 1			9	632	38	119		798
Euro 2	53	57	55	1617		173		1955
Euro 3	37		435	470	26	7	2	977
Total	90	57	504	3054	64	309	2	4080
%	2,2%	1,4%	12,4%	74,9%	1,6%	7,6%	0,0%	100,0%

FAP : Filtre à Particules

B 30 % : biodiesel à 30 % d'EMHV (Ester Méthylique d'Huile Végétale)

Emulsion : mélange de 85% de gazole, 12% d'eau et 3% d'additif

4. LES EMISSIONS ET LES TECHNOLOGIES BUS ETUDIEES

Les émissions étudiées sont les émissions réglementées (CO, HC hors méthane, NO_x et particules) ainsi que celles des gaz à effet de serre (en équivalent CO₂) également mesurées lors des tests ADEME-RATP.

Les technologies étudiées sont de deux types :

- d'une part les technologies existantes pour lesquelles on dispose de résultats de tests ADEME-RATP
- d'autre part les technologies futures pour lesquelles on ne dispose pas forcément de tels résultats

En ce qui concerne les gaz à effet de serre on traitera également les émissions « du puits à la roue » pour toutes ces technologies.

4.1 LES TECHNOLOGIES EXISTANTES

Ce sont celles des véhicules diesel, avec leurs diverses normes et équipements et avec l'addition éventuelle de biocarburant, et celles des véhicules GPL et GNV.

Plus précisément on analyse les performances des véhicules suivants :

Diesel (gazole à 50 ppm de soufre²¹)

- Euro 1
- Euro 1 + FAP (filtre à particules)
- Euro 2
- Euro 2 + FAP
- Euro 2 + B 30% (biodiesel à 30% de carburant EMHV, ester méthylique d'huile végétale)
- Euro 2 + B 30% + FAP
- Euro 3
- Euro 3 + FAP
- Euro 3 + B 30%
- Euro 3 + B 30% + FAP

GPL

- Euro 2

GNV

- Euro 2
- Euro 3

Soit en tout 13 technologies différentes.

REM 1 : il n'existe pas de résultats de tests pour les véhicules diesel Euro 0 (ces véhicules seront bientôt retirés du parc RATP). Il n'y en a pas non plus pour les diesel Euro 4 (norme

²¹ c'est-à-dire un gazole à très basse teneur en soufre indispensable à l'usage du filtre à particules.

Ppm signifie « partie par million » mesurée dans ce cas en poids (50 ppm de soufre représente donc 0.005% en poids soit 0,05 gramme de soufre par kilogramme de gazole).

applicable depuis le 1^{er} octobre 2006). En fait les véhicules que la RATP vient d'acheter récemment respectent déjà la norme Euro 5.

REM 2 : on n'a pas retenu le bus électrique, actuellement très marginal (les 12 véhicules de la ligne RATP Montmartrobus) car cette technologie ne peut être à ce jour utilisée que dans certaines conditions (notamment sur de courtes lignes). On examinera en revanche les possibilités futures du bus électrique.

4.2 LES TECHNOLOGIES FUTURES.

Ce sont d'abord les technologies classiques pour lesquelles on a pu obtenir des données de l'ADEME ou des constructeurs, à savoir :

- Diesel Euro 5 avec équipement DeNO_x (bus IVECO Agora équipé du système DeNO_x SCR²² par injection d'urée)
- Diesel Euro 5 DeNO_x SCR + B 30%
- GNV EEV²³ (qui va au-delà de la norme Euro 5)

Ensuite on examinera les possibilités de la motorisation électrique et hybride (véhicule fonctionnant en utilisant l'énergie électrique couplée à un carburant fossile classique).

4.3 LES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE DU PUIT A LA ROUE.

Ce calcul sera fait pour toutes les technologies (existantes et futures).

Dans un premier temps on corrigera les émissions des technologies incluant le biocarburant (B 30%) pour tenir compte du fait que, pendant sa croissance, la plante ayant servi à fabriquer le biocarburant a absorbé du gaz carbonique (CO₂).

Ensuite on calculera les émissions « du puits au réservoir » (pour le biocarburant cela correspond à la culture, récolte de la plante puis sa transformation en biocarburant).

Les émissions de gaz à effet de serre du puits à la roue sont la somme des deux catégories précédentes.

²² SCR : *Selective Catalytic Reduction* (Réduction catalytique selective)

²³ EEV : *Enhanced Environmentally friendly Vehicle* (véhicule de qualité environnementale bonifiée)

5. LA METHODOLOGIE

On est amené à distinguer deux catégories de technologies : d'une part les moteurs thermiques intégraux (existants et disponibles dans un futur proche) ; d'autre part les véhicules électriques et hybrides. En effet pour ces derniers on ne dispose pas de mesures d'émissions : le moteur électrique n'émet pas de polluant atmosphérique et de gaz à effet de serre et il n'existe pas de bus hybride en circulation en Ile-de-France.

On commence donc par les technologies de moteurs thermiques intégraux pour lesquels les données d'émissions existent.

Dans un premier temps on compare l'évolution des émissions mesurées sur les technologies existantes (de Euro 1 à Euro 3)

Ensuite on compare l'évolution des émissions mesurées sur les véhicules disponibles dans un futur proche avec les meilleures technologies existantes (Diesel Euro 3 et GNV Euro 3)

Puis pour l'ensemble de ces technologies on calcule les émissions de gaz à effet de serre du puits à la roue.

Enfin on compare leurs coûts environnementaux et économiques.

On aborde ensuite la prospective technologique.

On commence par examiner les évolutions possibles des motorisations thermiques en concurrence aujourd'hui : diesel et GNV. Comme il n'existe pas d'études prospectives sur les bus on s'appuie sur deux études prospectives récentes sur les motorisations de voitures particulières :

- une étude française de l'AFGNV (Association Française du Gaz Naturel Véhicule) « Le Gaz naturel Véhicules : quel potentiel ? » (novembre 2006), cofinancée par l'AFGNV, l'ADEME, la DGEMP et l'IFP.
- une étude européenne très complète et très documentée : JOINT RESEARCH CENTRE (European Commission)-CONCAWE-EUCAR²⁴ « Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context » (mars 2007).

On analyse ensuite les technologies potentielles du futur que sont le bus électrique et le bus hybride. Pour le premier on fait d'abord le bilan de cette filière à partir des données techniques et des expériences nationales (dont le Montmartrobus en Ile-de-France). On esquisse ensuite une vue prospective à partir de l'évolution prévisible à ce jour des performances des batteries électriques pour véhicules. Pour le second on présente le concept de bus hybride et les technologies de stockage à bord de l'énergie électrique applicables à ce concept. Comme ce type de véhicule est quasi inexistant en Europe mais se développe aux Etats-Unis, surtout à New-York, on présente les résultats d'une évaluation faite à New-York par le NREL (National Renewable Energy Laboratory).

²⁴ Pour l'explicitation des sigles voir l'annexe 3.

6. LA COMPARAISON DES EMISSIONS MESUREES SUR LES VEHICULES EXISTANTS.

6.1 LES DONNEES.

On a retenu les résultats de tests fournis par la RATP, complétés par des résultats de l'ADEME (cycle RATP) pour les quelques technologies où on n'a pas obtenu de données RATP. Les émissions de gaz à effet de serre (CO₂ et CH₄)²⁵ sont exprimées en équivalent CO₂.

Ces résultats sont présentés dans le tableau 6.1 ci-dessous dans lequel on a également indiqué les consommations des véhicules testés.

Tableau 6.1 Emissions en fonctionnement des véhicules existants (données brutes).
(Sources : RATP, ADEME)

Emissions en g/km

Consommations en l/100 km ou en Nm³/100 km (GNV)

Tous les moteurs diesel sont alimentés avec du gazole à très basse teneur en soufre (50 p.p.m.)

Technologies testées	Emissions et consommation					
	CO	HC (hors méthane)	NO _x	PM	Equivalent CO ₂	Consommation
Diesel Euro 1	2,3	1,4	31,5	1,4	1898	65,9
Diesel Euro 1 + FAP	1,74	1,44	31,5	0,09	1898	66
Diesel Euro 2	4,06	1,06	22,91	0,43	1420	54,3
Diesel Euro 2 + FAP	0,23	0,03	21,67	0,03	1502	57,1
Diesel Euro 2 + B 30%	4,08	0,86	29,99	0,55	1596	63,3
Diesel Euro 2+ B 30% + FAP	0,42	0,16	29,09	0,04	1592	63,7
Diesel Euro 3	2,71	1,08	19,92	0,18	1591	60,3
Diesel Euro 3 + FAP	0,05	0,01	18,95	0,02	1615	60,9
Diesel Euro 3 + B 30%	2,48	0,85	20,97	0,16	1613	63,7
Diesel Euro 3 + B 30% + FAP	0,11	0,03	19,27	0,04	1629	64,2
GPL Euro 2	1,5	0,06	14,97	0,03	1873	116,5
GNV Euro 2	4,33	0,6	10,14	0,03	1661	78,62
GNV Euro 3	0,06	0,7	4,5	0,02	1542	74,4

Nm³ (normo-m³) : quantité de gaz occupant 1 m³ pour une pression de 1013 bars et une température de 0°C (l'énergie contenue est voisine de celle d'un litre de gazole)

PM : particules

FAP : Filtre à Particules

B 30 % : biodiesel à 30 % d'EMHV (Ester Méthylique d'Huile Végétale)

Toutefois, en ce qui concerne le biocarburant, les émissions de gaz à effet de serre du tableau 6.1 ne tiennent pas compte du fait que, lors de sa croissance, la plante ayant servi à fabriquer le biocarburant a absorbé du gaz carbonique (CO₂) en quantité égale à celle rejetée lors de la combustion du biocarburant (assimilation chlorophyllienne).

²⁵ On rappelle que tous les véhicules (diesel, GPL et GNV) émettent du CO₂ ; en outre le GNV émet du méthane (CH₄)

On a donc effectué cette correction pour obtenir les valeurs du tableau 6.2 ci-dessous qui sont les valeurs retenues pour la comparaison.

Tableau 6.2 - Emissions en fonctionnement des véhicules existants avec corrections des émissions de gaz carbonique pour le biocarburant (prise en compte de l'absorption de ce gaz lors de la croissance de la plante).

(Sources : RATP, ADEME)

Emissions en g/km

Consommations en l/100 km ou en Nm³/100 km (GNV)

Tous les moteurs diesel sont alimentés avec du gazole à très basse teneur en soufre (50 p.p.m.)

Technologies testées	Emissions et consommation					
	CO	HC (hors méthane)	NO _x	PM	Equivalent CO ₂	Consommation
Diesel Euro 1	2,3	1,4	31,5	1,4	1898	65,9
Diesel Euro 1 + FAP	1,74	1,44	31,5	0,09	1898	66
Diesel Euro 2	4,06	1,06	22,91	0,43	1420	54,3
Diesel Euro 2 + FAP	0,23	0,03	21,67	0,03	1502	57,1
Diesel Euro 2+ B 30%	4,08	0,86	29,99	0,55	1117	63,3
Diesel Euro 2+ B 30% + FAP	0,42	0,16	29,09	0,04	1114	63,7
Diesel Euro 3	2,71	1,08	19,92	0,18	1591	60,3
Diesel Euro 3 + FAP	0,05	0,01	18,95	0,02	1615	60,9
Diesel Euro 3 + B 30%	2,48	0,85	20,97	0,16	1129	63,7
Diesel Euro 3 + B 30% + FAP	0,11	0,03	19,27	0,04	1140	64,2
GPL Euro 2	1,5	0,06	14,97	0,03	1873	116,5
GNV Euro 2	4,33	0,6	10,14	0,03	1661	78,62
GNV Euro 3	0,06	0,7	4,5	0,02	1542	74,4

Nm³ (normo-m³) : quantité de gaz occupant 1 m³ pour une pression de 1013 bars et une température de 0°C (l'énergie contenue est voisine de celle d'un litre de gazole)

PM : particules

FAP : Filtre à Particules

B 30 % : biodiesel à 30 % d'EMHV (Ester Méthylique d'Huile Végétale)

6.2 L'EVOLUTION DES EMISSIONS

Le tableau 6.3 ci-après indique les évolutions des émissions par rapport au véhicule diesel Euro 0 (calcul effectué à partir des données du tableau 6.2) et les figures 6.1 à 6.5 les représentent graphiquement pour chacune des émissions (CO, HC hors méthane, NO_x, PM et CO₂).

Tableau 6.3 - Evolution des émissions des véhicules existants par rapport au véhicule diesel Euro 1.

PM : particules

FAP : Filtre à Particules

B 30 % : biodiesel à 30 % d'EMHV (Ester Méthylique d'Huile Végétale)

Technologies testées	Emissions				
	CO	HC (hors méthane)	NO _x	PM	Equivalent CO ₂
Diesel Euro 1+ FAP	-24%	3%	0%	-94%	0%
Diesel Euro 2	77%	-24%	-27%	-69%	-25%
Diesel Euro 2+ FAP	-90%	-98%	-31%	-98%	-21%
Diesel Euro 2 + B 30%	77%	-39%	-5%	-61%	-41%
Diesel Euro 2+ B 30% + FAP	-82%	-89%	-8%	-97%	-41%
Diesel Euro 3	18%	-23%	-37%	-87%	-16%
Diesel Euro 3+ FAP	-98%	-99%	-40%	-99%	-15%
Diesel Euro 3+ B 30%	8%	-39%	-33%	-89%	-41%
Diesel Euro 3+ B 30% + FAP	-95%	-98%	-39%	-97%	-40%
GPL Euro 2	-35%	-96%	-52%	-98%	-1%
GNV Euro 2	88%	-57%	-68%	-98%	-12%
GNV Euro 3	-97%	-50%	-86%	-99%	-19%

Figure 6.1 Evolution des émissions de monoxyde de carbone (CO)
(Sources : RATP, ADEME)

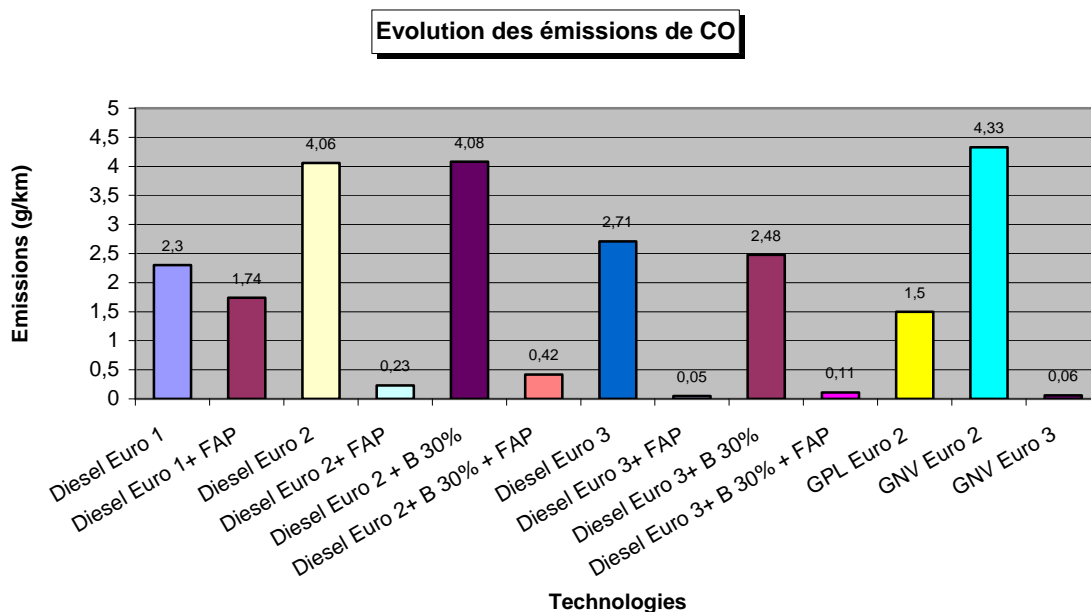


Figure 6.2 Evolution des émissions d'hydrocarbures non méthaniques (HC hors méthane)
(Sources : RATP, ADEME)

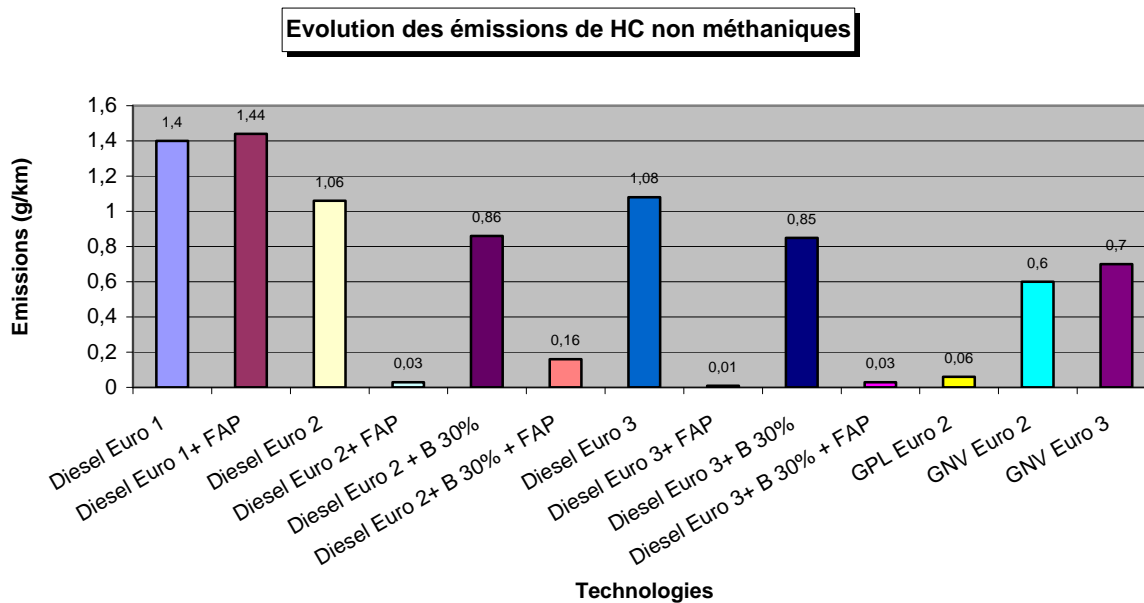


Figure 6.3 Evolution des émissions d'oxydes d'azote (NO_x)
 (Sources : RATP, ADEME)

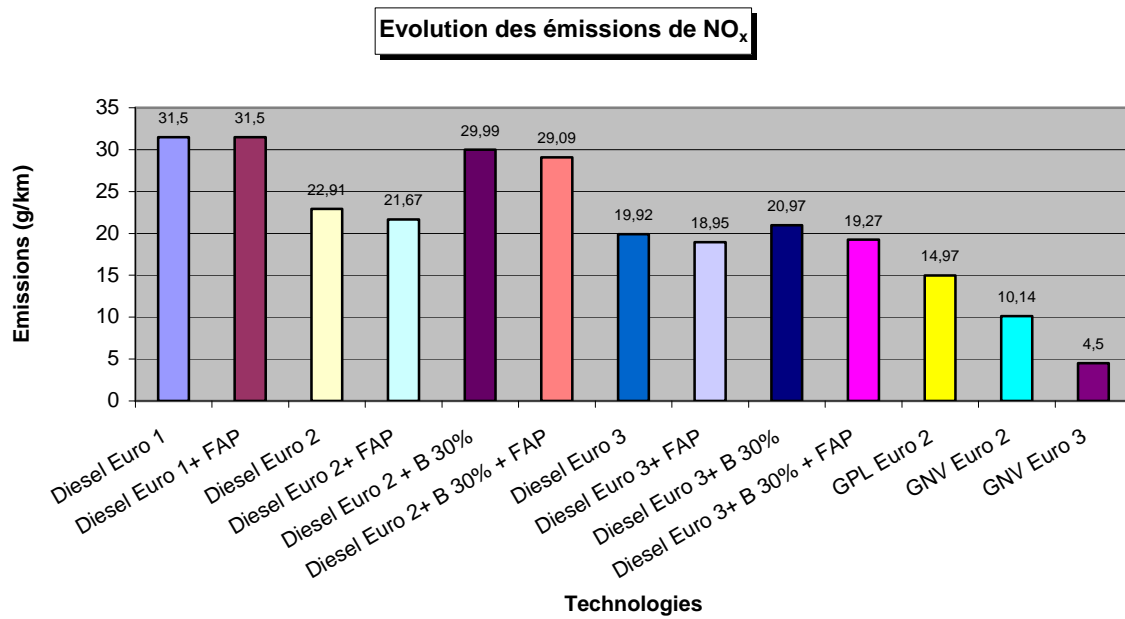


Figure 6.4 Evolution des émissions de particules (PM)
 (Sources : RATP, ADEME)

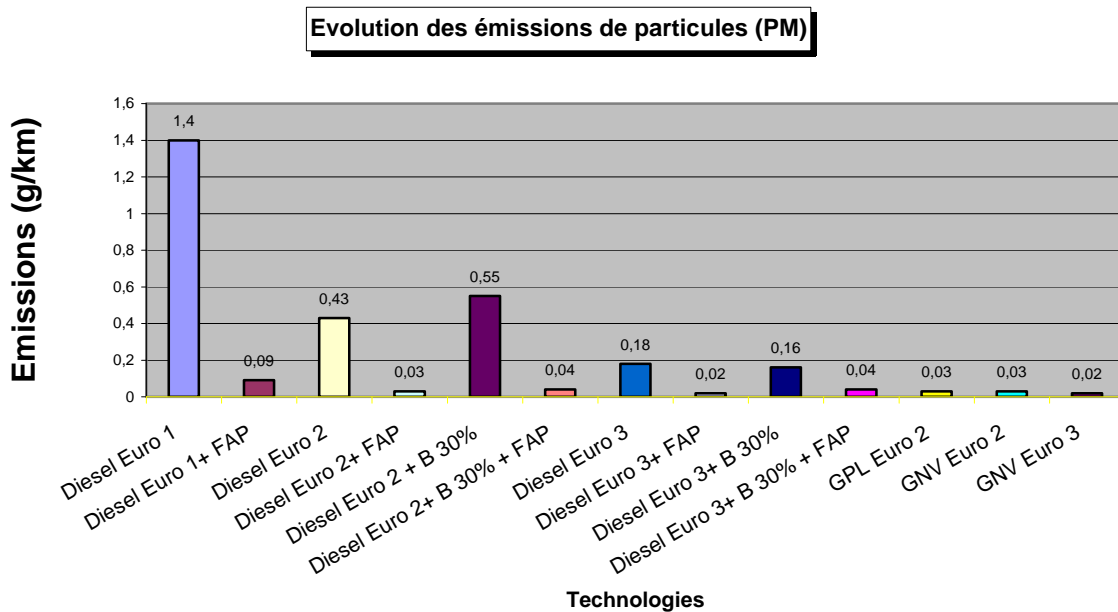
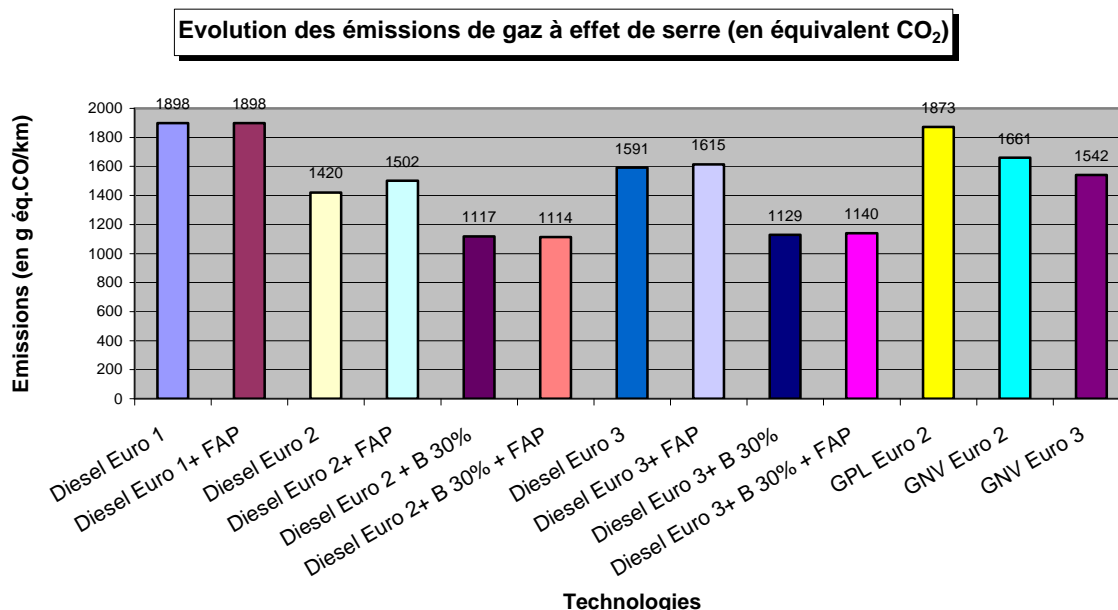


Figure 6.5 Evolution des émissions de gaz à effet de serre (en équivalent CO₂)
(Sources : RATP, ADEME)



6.3 COMMENTAIRES DES RESULTATS.

Pour ces commentaires on examine d'abord l'impact des normes, du filtre à particules et du biocarburant sur les émissions du bus diesel.

Ensuite on compare les meilleures technologies existantes de chaque filère : diesel, GPL et GNV.

6.3.1 L'impact des normes, du filtre à particules et du biocarburant sur les émissions du véhicule diesel.

Le tableau 6.4 montre l'impact des seules normes sur les émissions du bus diesel.

Tableau 6.4 - Impact des seules normes sur les émissions de la technologie diesel

	CO	HC (hors methane)	NO _x	PM	CO ₂
Euro2 / Euro 1	77%	-24%	-27%	-69%	-25%
Euro 3 / Euro 2	-33%	2%	-13%	-58%	12%
Euro 3/ Euro 1	18%	-23%	-37%	-87%	-16%

On constate que, sauf pour le monoxyde de carbone (CO), les seules normes ont permis de diminuer les émissions. Les baisses les plus sensibles sont les particules (PM) mesurées globalement ; cependant elles ne concernent pas les micro-particules (diamètre inférieur ou égal à 10 microns).

Le tableau 6.5 montre l'impact du filtre à particules (FAP) sur les émissions du bus diesel.

Tableau 6.5 Impact du filtre à particules (FAP) sur les émissions de la technologie diesel.

	CO	HC (hors méthane)	NO _x	PM	CO ₂
Euro1+FAP / Euro 1	-24%	3%	0%	-94%	0%
Euro2+FAP / Euro 2	-94%	-97%	-5%	-93%	6%
Euro3+FAP / Euro 3	-98%	-99%	-5%	-89%	2%
Euro3+FAP / Euro 1	-98%	-99%	-40%	-99%	-15%

Le succès du filtre à particules (FAP) est flagrant. Par rapport à un véhicule non équipé, la baisse des émissions de particules est très nette quelle que soit la norme considérée (de 89 à 94%). Il est important de rappeler que le FAP filtre non seulement les grosses particules mais également les microparticules (les plus nocives), ce que ne fait pas un véhicule non équipé même s'il est récent (norme Euro 3).

Il réduit également fortement les émissions de monoxyde d'azote (CO) et d'hydrocarbures (HC). En revanche il accroît très légèrement les émissions de gaz carbonique (CO₂) et diminue peu celles d'oxydes d'azote (NO_x).

Le tableau 6.6 montre l'impact du biocarburant sur les émissions du bus diesel.

Tableau 6.6 Impact du biocarburant sur les émissions du bus diesel.

	CO	HC (hors méthane)	NO _x	PM	CO ₂
Euro2+B30% / Euro 2	0%	-19%	31%	28%	-21%
Euro3+B30% / Euro 3	-8%	-21%	5%	-11%	-29%
Euro3+B30% / Euro 1	8%	-39%	-33%	-89%	-41%

Les effets du biocarburant diffèrent selon la norme du véhicule pour lequel on l'utilise. Dans tous les cas, il accroît les émissions d'oxydes d'azote (NO_x) et diminue en revanche celles d'hydrocarbures (HC) et de gaz carbonique (CO₂), avec des effets meilleurs s'il s'applique à un véhicule de norme Euro 3.

Pour les particules le bilan est mitigé (augmentation avec un bus Euro 2 et diminution avec un bus Euro 3).

Au total, son intérêt est plus grand en norme Euro 3

6.3.2 Comparaison diesel, GPL et GNV.

Le tableau 6.7 compare les émissions de la meilleure technologie de chaque filière à savoir :

- pour le diesel un bus Euro 3
- pour le GPL un bus Euro 2
- pour le GNV un bus Euro 3

Tableau 6.7 Comparaison des émissions de bus GPL et GNV à celles d'un bus diesel Euro 3 avec 30% de biocarburant (B 30%) et un filtre à particules (FAP).

	CO	HC (hors méthane)	NO _x	PM	Equivalent CO ₂
GPL Euro 2	1264%	100%	-22%	-25%	64%
GNV Euro 3	-45%	2233%	-77%	-50%	35%

Le GPL Euro 2 émet moins d'oxydes d'azote (NO_x) et de particules (PM) que le diesel Euro 3 avec biocarburant et filtre à particules. En revanche il émet nettement plus de CO, HC et équivalent CO₂.

Le GNV Euro 3 est sensiblement meilleur que le diesel Euro 3 avec biocarburant et filtre à particules pour les émissions d'oxydes d'azote (NO_x), de particules (PM) et de monoxyde de carbone (CO). Mais il émet beaucoup plus d'hydrocarbures (HC) et son bilan carbone est sensiblement détérioré.

7. LA COMPARAISON DES EMISSIONS MESUREES SUR LES VEHICULES DISPONIBLES DANS UN FUTUR PROCHE

7.1 LES DONNEES.

Les seules technologies futures pour lesquelles on dispose de données d'émissions sont :

- Diesel Euro 5 avec équipement DeNO_x (bus IVECO Agora équipé du système DeNO_x SCR²⁶ par injection d'urée)
- Diesel Euro 5 DeNO_x SCR + B 30%
- GNV EEV²⁷ (qui va au-delà de la norme Euro 5)

Les possibilités de la motorisation électrique et hybride (utilisant l'énergie électrique couplée à un carburant fossile classique) seront examinées dans le chapitre 11.

Les résultats sont présentées dans le tableau 7.1 et les figures 7.1 à 7.5. où on a également fait figurer ceux des meilleures technologies existantes. Pour le biocarburant on a tenu compte de l'absorption du gaz carbonique lors de la croissance de la plante dont il est issu.

Tableau 7.1 Emissions en fonctionnement des véhicules futurs avec corrections des émissions de gaz carbonique pour le biocarburant (prise en compte de l'absorption de ce gaz lors de la croissance de la plante).

(Sources : RATP, ADEME, IRISBUS IVECO)

Emissions en g/km

Consommations en l/100 km ou en Nm³/100 km (GNV)

Tous les moteurs diesel sont alimentés avec du gazole à très basse teneur en soufre (50 p.p.m.)

Technologies testées	Emissions et consommation					
	CO	HC	NO _x	PM	Equivalent CO ₂	Consommation
Diesel Euro 3	2,71	1,08	19,92	0,18	1591	60,3
Diesel Euro 3 + B 30%	2,48	0,85	20,97	0,16	1129	63,7
Diesel Euro 3 + B 30% + FAP	0,11	0,03	19,27	0,04	1140	64,2
GNV Euro 3	0,06	0,7	4,5	0,02	1542	74,4
Diesel Euro 5	2,53	0,06	8,07	0,065	1336	49,4
Diesel Euro 5 + B 30%	1,93	0,06	9,9	0,044	922	49,7
GNV EEV (données constructeur)	0,06	0,7	4,5	0,022	1542	74,4

On note que le véhicule GNV EEV aurait, selon le constructeur, exactement les mêmes émissions que le GNV Euro 3.

²⁶ SCR : Selective Catalytic Reduction (Réduction catalytique selective)

²⁷ EEV : Enhanced Environmentally friendly Vehicle (véhicule de qualité environnementale bonifiée)

Figure 7.1 Evolution des émissions de monoxyde de carbone (CO)
 (Sources : RATP, ADEME, IRISBUS IVECO)

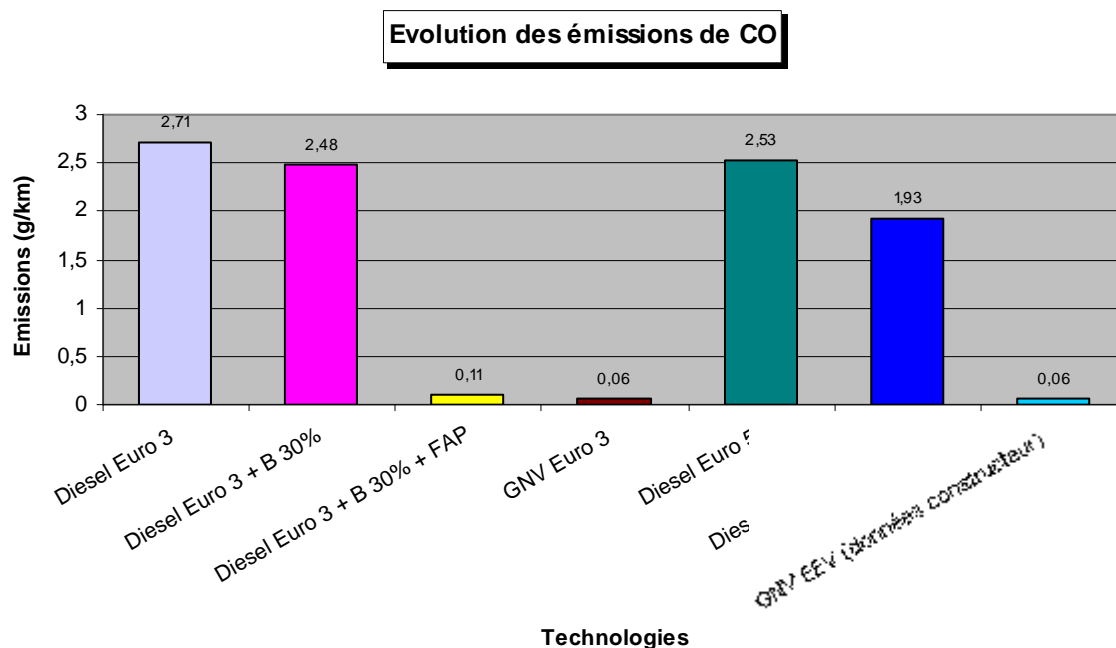


Figure 7.2 Evolution des émissions d'hydrocarbures non méthaniques (HC hors méthane)
 (Sources : RATP, ADEME, IRISBUS IVECO)

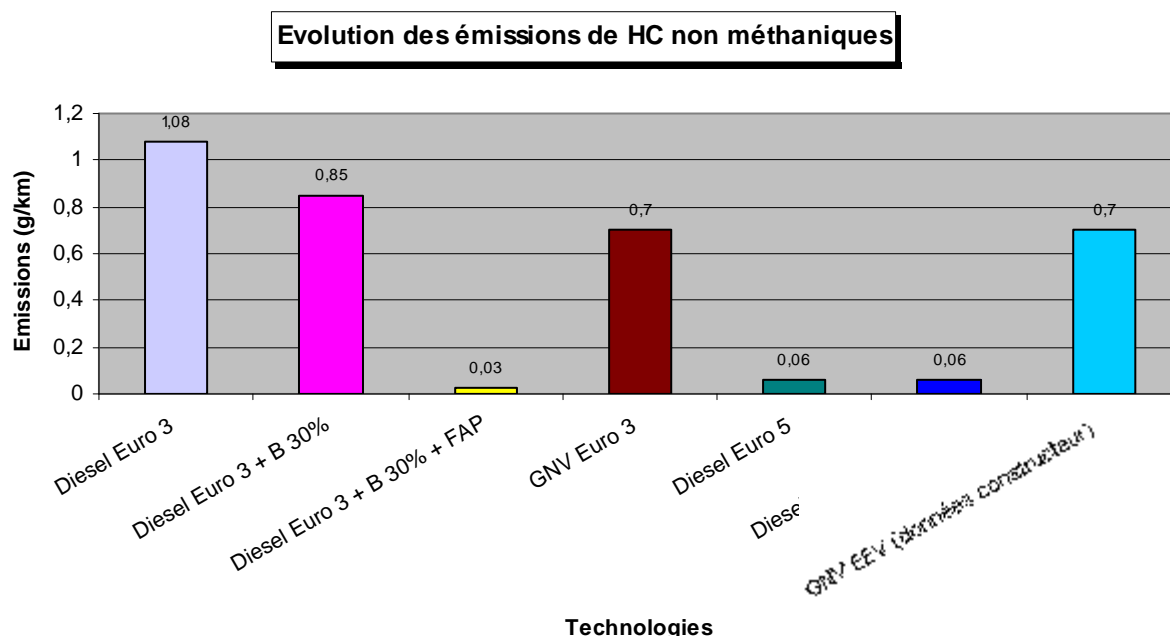


Figure 7.3 Evolution des émissions d'oxydes d'azote (NO_x)
 (Sources : RATP, ADEME, IRISBUS IVECO)

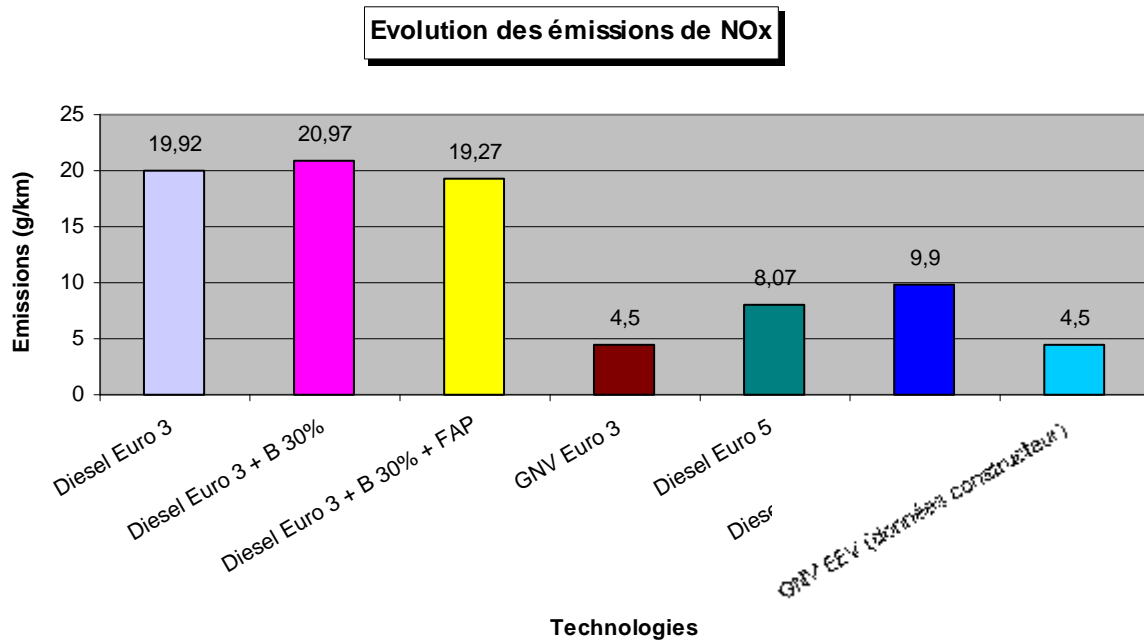


Figure 7.4 Evolution des émissions de particules (PM)
 (Sources : RATP, ADEME, IRISBUS IVECO)

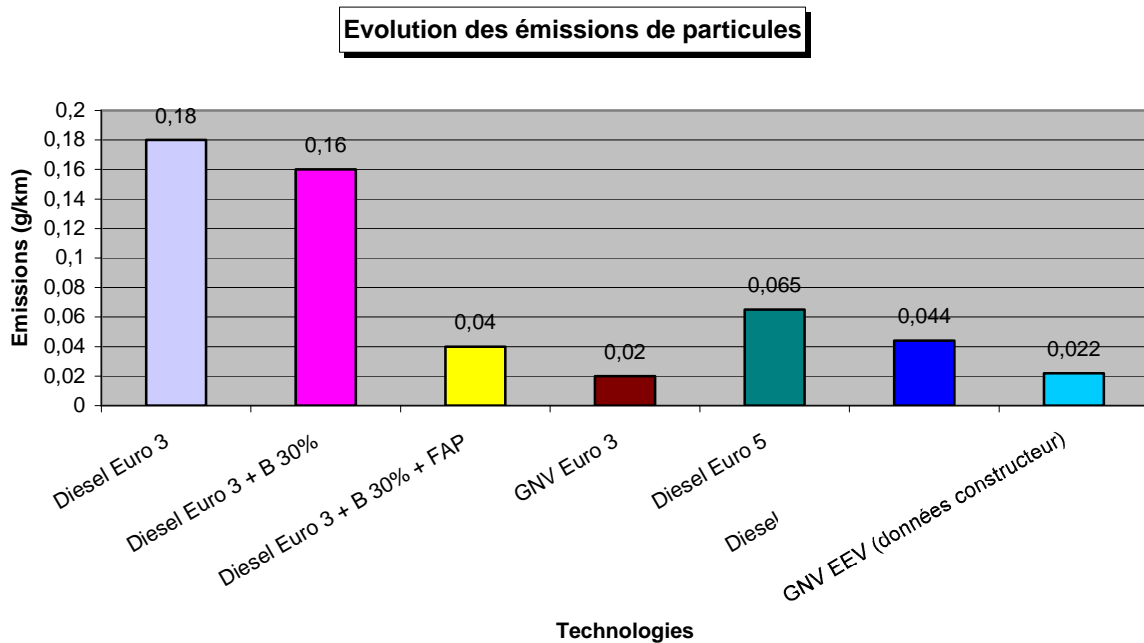
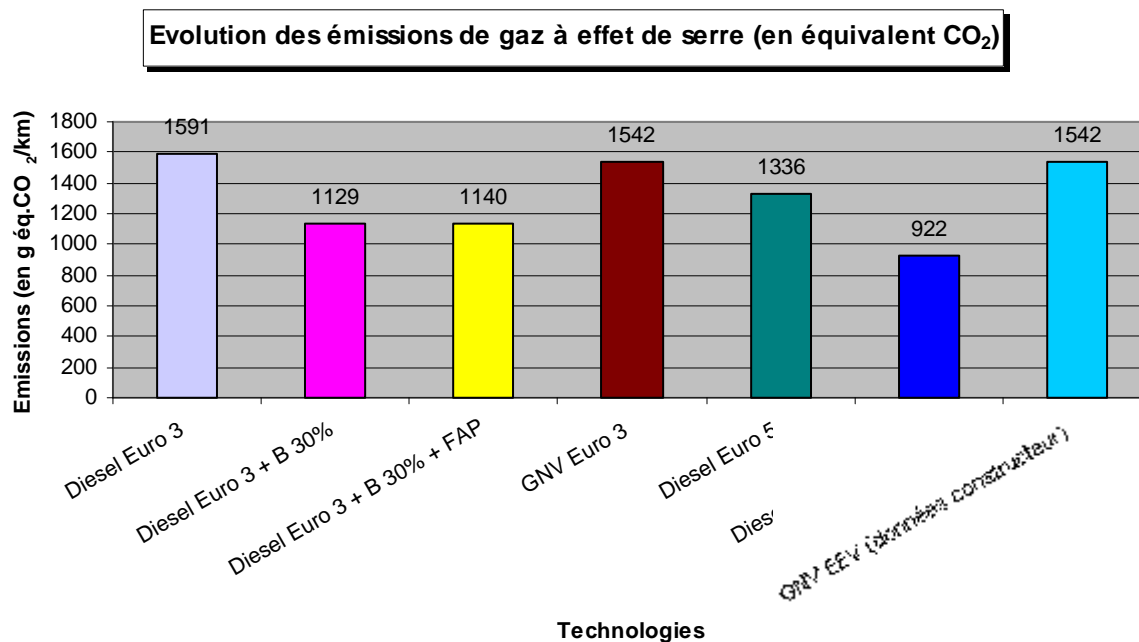


Figure 7.5 Evolution des émissions de gaz à effet de serre (en équivalent CO₂)
(Sources : RATP, ADEME, IRISBUS IVECO)



7.2 L'EVOLUTION DES EMISSIONS.

Le tableau 7.2 ci-après indique les évolutions des émissions par rapport au véhicule diesel Euro 3 (calcul effectué à partir des données du tableau 7.1)

Tableau 7.2 Evolution des émissions des véhicules futurs par rapport au véhicule diesel Euro 3.

Technologies testées	Emissions				
	CO	HC	NO _x	PM	Equivalent CO ₂
Diesel Euro 3 + B 30%	-8%	-21%	5%	-11%	-29%
Diesel Euro 3 + B 30% + FAP	-96%	-97%	-3%	-78%	-28%
GNV Euro 3	-98%	-35%	-77%	-89%	-3%
Diesel Euro 5	-7%	-94%	-59%	-64%	-16%
Diesel Euro 5 + B 30%	-29%	-94%	-50%	-76%	-42%
GNV EEV	-98%	-35%	-77%	-88%	-3%

7.3 COMMENTAIRES DES RESULTATS.

On constate que toutes les technologies futures ont des émissions moindres que le bus diesel Euro 3.

En ce qui concerne le diesel Euro 5, le principal avantage du diester est son impact sur le bilan gaz carbonique (en tenant compte de l'assimilation chlorophyllienne), à l'instar de ce qu'on a déjà noté sur les bus diesel existants.

Le bus GNV EEV a les mêmes performances que le GNV Euro 3.

Le tableau 7.3 ci-dessous le compare au bus diesel Euro 5.

Tableau 7.3 Comparaison du bus GNV EEV avec le bus diesel Euro 5.

	CO	HC	NO_x	PM	Equivalent CO₂
GNV EEV / Euro 5	-98%	1067%	-44%	-66%	15%
GNV EEV / Euro 5 + B 30%	-97%	1067%	-55%	-50%	67%

Le bus GNV EEV conserve un net avantage sur le bus diesel Euro 5 pour les émissions de monoxyde d'azote (CO), d'oxydes d'azote (NO_x) et de particules (PM). En revanche il émet beaucoup plus d'hydrocarbures non méthaniques (HC).

De plus son bilan gaz à effet de serre est moins bon surtout si le bus diesel Euro 5 utilise du biocarburant.

8 LES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE DU PUIT A LA ROUE

8.1 CALCUL DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE DU PUIT A LA ROUE.

Alors que la pollution atmosphérique (CO, HC hors méthane, NO_x et particules) est locale, les émissions de gaz à effet de serre ont un impact planétaire. C'est pourquoi on présente ici les émissions « du puits à la roue » alors que les données précédentes concernaient les émissions en circulation c'est-à-dire « du réservoir à la roue ». On doit donc leur ajouter les émissions de gaz à effet de serre « du puits au réservoir » c'est-à-dire celles créées par l'exploration, l'extraction, le transport, le raffinage et la distribution des produits pétroliers (essence, gazole, GPL et GNV). Pour les biocarburants on doit rajouter toutes les émissions créées pour la culture, la récolte et la transformation de la plante en biocarburant ainsi que la distribution de ce dernier.

Les calculs des émissions « du puits au réservoir » sont délicats et peuvent différer selon les sources. On a opéré ce calcul en partant des consommations des diverses technologies : connaissant les émissions unitaires « du puits au réservoir » pour fabriquer et livrer un litre de carburant (ou un Nm³ de gaz), on en déduit les émissions par kilomètre parcouru. Le détail du calcul est explicité dans le tableau 8.1 ci-après.

On a pris comme base les données IFP qui expriment les émissions « du puits au réservoir » en grammes équivalent CO₂ par Mégajoules (MJ) : première ligne du tableau. Connaissant le contenu énergétique du litre (ou du Nm³ pour le GNV) de carburant (deuxième ligne) on en déduit les émissions en grammes par litre (ou Nm³).

Tableau 8.1 - Calcul des émissions unitaires de gaz à effet de serre (GES) « du puits au réservoir » (en g/l ou g/Nm³) - (Sources : IFP, ADEME, DGEMP)

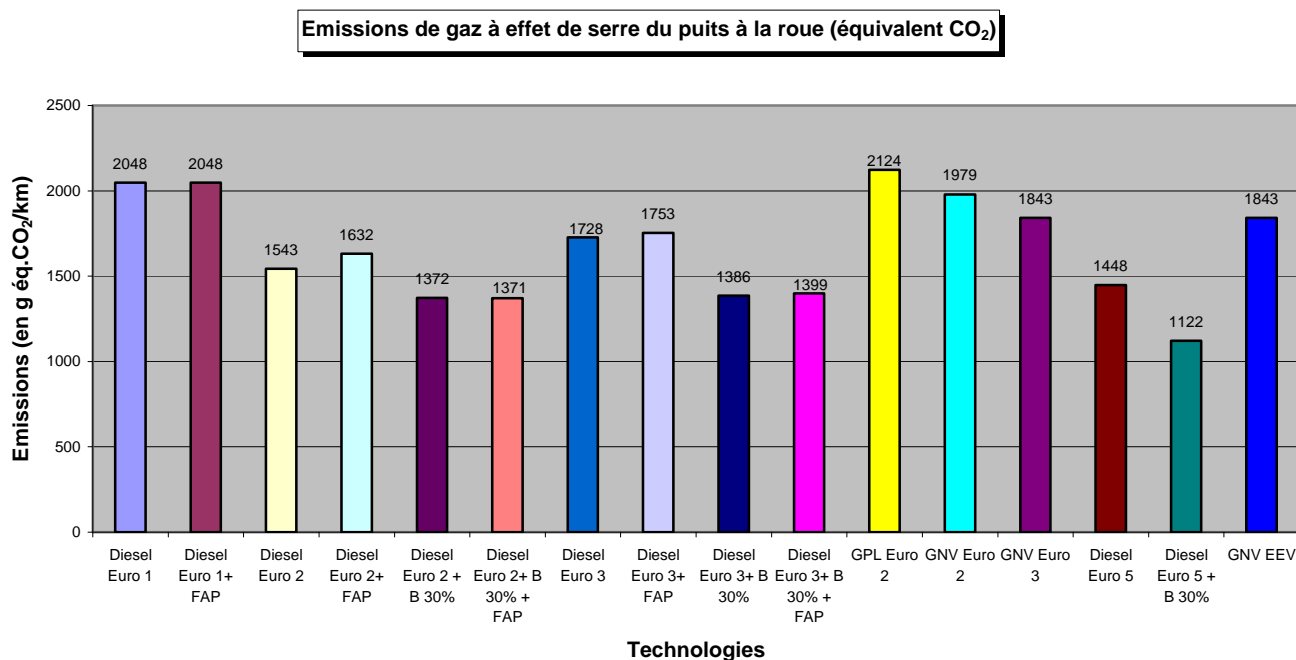
	diesel	diester 30%	GPL	GNV
GES (éq. CO₂) en g/MJ	6,4	11,6	8,5	10,1
MJ/litre ou MJ/Nm³ (GNV)	35,5	34,72	25,3	40
GES (éq. CO₂) en g/litre ou g/Nm³	227,2	402,8	215,1	404,0

Les résultats des calculs d'émissions de gaz à effet de serre « du puits à la roue » pour l'ensemble des technologies (existantes et futures) sont exposés dans le tableau 8.2 et sur la figure 8.1 ci-dessous.

**Tableau 8.2 - Calcul des émissions de gaz à effet de serre (équivalent CO2)
« du puits à la roue » (en g/km)**

Technologies	Equivalent CO ₂ en circulation (en g/km)	Equivalent CO ₂ corrigé (biocarburant) (en g/km) (A)	Consommation (en l ou Nm ³ / 100km)	Equivalent CO ₂ du puits au réservoir (en g/litre ou g/Nm ³)	Equivalent CO ₂ du puits au réservoir (en g/km) (B)	Equivalent CO ₂ du puits à la roue (en g/km) (A+B)
Diesel Euro 1	1898	1898	65,9	227,2	149,7	2048
Diesel Euro 1 + FAP	1898	1898	66	227,2	150,0	2048
Diesel Euro 2	1420	1420	54,3	227,2	123,4	1543
Diesel Euro 2 + FAP	1502	1502	57,1	227,2	129,7	1632
Diesel Euro 2 + B 30%	1596	1117	63,3	402,8	254,9	1372
Diesel Euro 2 + B 30% + FAP	1592	1114	63,7	402,8	256,6	1371
Diesel Euro 3	1591	1591	60,3	227,2	137,0	1728
Diesel Euro 3 + FAP	1615	1615	60,9	227,2	138,4	1753
Diesel Euro 3 + B 30%	1613	1129	63,7	402,8	256,6	1386
Diesel Euro 3 + B 30% + FAP	1629	1140	64,2	402,8	258,6	1399
GPL Euro 2	1873	1873	116,5	215,1	250,5	2124
GNV Euro 2	1661	1661	78,62	404,0	317,6	1979
GNV Euro 3	1542	1542	74,4	404,0	300,6	1843
Diesel Euro 5	1336	1336	49,4	227,2	112,2	1448
Diesel Euro 5 + B 30%	1317	922	49,7	402,8	200,2	1122
GNV EEV	1542	1542	74,4	404,0	300,6	1843

Figure 8.1 Emissions de gaz à effet de serre du puits à la roue.
(Sources : RATP, ADEME, IFP, DGEMP)



8.2 COMMENTAIRES DES RESULTATS.

En complément du tableau 8.1 et de la figure 8.2 le tableau 8.3 quantifie les évolutions des émissions de gaz à effet de serre du puits à la roue par rapport au bus diesel Euro 1. Par ailleurs le tableau 8.4 compare quelques technologies entre elles.

Pour les technologies existantes une nette réduction (-25% par rapport au diesel Euro 1 ; tableau 8.3) est intervenue avec l'arrivée des bus diesel Euro 2 mais s'est amoindrie avec le diesel Euro 3 (-16%). L'usage de biocarburant renforce cette réduction : - 20% quand on passe du diesel Euro 3 au diesel Euro 3 + B 30% (Tableau 8.4).

Le GNV Euro 2 et Euro 3 et surtout le GPL Euro 2 ont un bilan moins favorable que leurs homologues diesel.

Ainsi le GNV Euro 2 émet 28% de plus de gaz à effet de serre que le diesel Euro 2 et 44% de plus si ce dernier utilise du biocarburant (Tableau 8.4). Quant au GNV Euro 3 il émet 7% de plus de gaz à effet de serre que le diesel Euro 3 et 33% de plus si ce dernier utilise du biocarburant.

Le GPL Euro 2 est la technologie la plus émettrice : par rapport au diesel Euro 2 elle émet 38% de plus de gaz à effet de serre que le diesel Euro 2 et 55% de plus si ce dernier utilise du biocarburant (Tableau 8.4). Elle dépasse même le diesel Euro 1 de 4% (tableau 8.3).

A l'avenir le bus diesel Euro 5 permettra de diminuer encore les émissions de cette filière : - 16% par rapport au bus diesel Euro 3. En revanche le bus GNV EEV reste au niveau du bus GNV Euro 3 de sorte que son « handicap » par rapport au diesel se creuse : il émet 27% de gaz à effet de serre de plus que le diesel Euro 5 et 64% si celui-ci utilise du biocarburant (Tableau 8.4).

Tableau 8.3 Evolution des émissions de gaz à effet de serre du puits à la roue par rapport au bus diesel Euro 1.

Technologies	Variation par rapport au diesel Euro 0
Diesel Euro 1	0%
Diesel Euro 1+ FAP	0%
Diesel Euro 2	-25%
Diesel Euro 2+ FAP	-20%
Diesel Euro 2 + B 30%	-33%
Diesel Euro 2+ B 30% + FAP	-33%
Diesel Euro 3	-16%
Diesel Euro 3+ FAP	-14%
Diesel Euro 3+ B 30%	-32%
Diesel Euro 3+ B 30% + FAP	-32%
GPL Euro 2	4%
GNV Euro 2	-3%
GNV Euro 3	-10%
Diesel Euro 5	-29%
Diesel Euro 5 + B 30%	-45%
GNV EEV	-10%

Tableau 8.4 Comparaison des émissions de gaz à effet de serre du puits à la roue de quelques technologies.

	Variation (%)
Diesel Euro 2 + B 30% / diesel Euro 2	-11%
Diesel Euro 3 + B 30% / diesel Euro 3	-20%
GNV Euro 2 / diesel Euro 2	28%
GNV Euro 2 / diesel Euro 2 + B 30%	44%
GNV Euro 3 / diesel Euro 3	7%
GNV Euro 3 / diesel Euro 3 + B 30%	33%
GPL Euro 2 / diesel Euro 2	38%
GPL Euro 2 / diesel Euro 2 + B 30%	55%
Diesel Euro 5 / diesel Euro 3	-16%
Diesel Euro 5 + B 30% / diesel Euro 3 + B 30%	-19%
GNV EEV / diesel Euro 5	27%
GNV EEV / diesel Euro 5 + B30%	64%

9 LES COÛTS ENVIRONNEMENTAUX ET ECONOMIQUES

Pour chaque grande filière technologique - diesel, GPL et GNV - on aborde ici l'évaluation de deux types de coûts :

- d'une part le coût environnemental actualisé résultant d'une monétarisation des émissions,
- d'autre part le coût économique actualisé (investissements et coûts d'exploitation).

On a également calculé un coût global actualisé, somme des deux précédents.

9.1 LES COÛTS ENVIRONNEMENTAUX

Les coûts environnementaux sont ici calculés à partir des données RATP en affectant une valeur à chaque unité d'émissions produites.

On reprend les valeurs unitaires retenues par l'ADEME pour ses comparaisons²⁸. Elles résultent d'une étude européenne : ExternE²⁹. Ces valeurs sont indiquées dans le tableau 9.1 ci-après.

Tableau 9.1 Coûts environnementaux unitaires. Emissions en zone urbaine (En Euros par tonne émise) - (Sources : ADEME, EXTERNE)

Emissions	CO	HC	NO _x	PM	CO ₂
Coût environnemental (€/tonne)	3,48	2.000	8.200	126.900	46

A la différence des coûts économiques classiques - qui sont relativement bien connus et fiables - les coûts environnementaux sont plus difficiles à estimer et sujets à débats portant aussi bien sur les méthodes d'estimation utilisées que sur les résultats produits. Dans le cas présent, la méthode utilisée par l'étude ExternE repose sur une évaluation du coût des dommages en prenant en compte les secteurs suivants :

- Santé humaine
- Matériaux de construction
- Agriculture
- Forêts
- Pêche d'eau douce
- Biodiversité

En exprimant les impacts environnementaux sous la forme d'un coût monétaire, cette méthode établit des équivalences entre impacts de nature différente. Ainsi, d'après le tableau 9.1, une tonne de particules émises en milieu urbain équivaldrait, d'un point de vue environnemental, à 15,5 tonnes de NO_x, 63 tonnes de HC, 2 759 tonnes de CO₂ et 36 466 tonnes de CO. On a du mal à appréhender le bien fondé et la fiabilité de tels ratios.

Pour toutes les technologies de moteurs thermiques précédemment étudiées, on a calculé les coûts environnementaux RATP pour une année de fonctionnement (39.000 km par bus) et

²⁸ Voir Gabriel PLASSAT « Pollutants Emissions, global warming potential effect, comparison using external costs on urban buses. » Congrès AEA. Poitiers (5-6 avril 2006).

²⁹ Voir le site www.externe.info

pour une durée de vie (15 ans par bus). Pour être homogène avec le calcul économique qui suit on a adopté un taux d'actualisation de 4% pour le calcul du coût environnemental actualisé sur la durée de vie³⁰. En ce qui concerne le gaz carbonique (CO₂) on a retenu les émissions du puits à la roue.

Les résultats sont présentés dans le tableau 9.2 ci-après.

La figure 9.1 illustre les résultats sur la durée de vie du véhicule.

Tableau 9.2 Les coûts environnementaux actualisés des diverses technologies sur la durée de vie du véhicule.

Technologies testées	Coût environnemental annuel (€)						Coût environnemental actualisé sur la durée de vie (€)
	CO	HC	NO _x	PM	CO ₂ (puits à la roue)	Total	
Diesel Euro 1	0,31	109,20	10073,70	6928,74	3674,11	20 786	231 108
Diesel Euro 1+ FAP	0,24	112,32	10073,70	445,42	3674,11	14 306	159 057
Diesel Euro 2	0,55	82,68	7326,62	2128,11	2768,14	12 306	136 824
Diesel Euro 2+ FAP	0,03	2,34	6930,07	148,47	2927,81	10 009	111 281
Diesel Euro 2 + B 30%	0,55	67,08	9590,80	2722,01	2461,37	14 842	165 017
Diesel Euro 2+ B 30% + FAP	0,06	12,48	9302,98	197,96	2459,57	11 973	133 121
Diesel Euro 3	0,37	84,24	6370,42	890,84	3100,03	10 446	116 141
Diesel Euro 3+ FAP	0,01	0,78	6060,21	98,98	3144,88	9 305	103 455
Diesel Euro 3+ B 30%	0,34	66,30	6706,21	791,86	2486,48	10 051	111 753
Diesel Euro 3+ B 30% + FAP	0,01	2,34	6162,55	197,96	2509,81	8 873	98 650
GPL Euro 2	0,20	4,68	4787,41	148,47	3810,46	8 751	97 299
GNV Euro 2	0,59	46,80	3242,77	148,47	3550,33	6 989	77 706
GNV Euro 3	0,01	54,60	1439,10	98,98	3306,34	4 899	54 469
Diesel Euro 5	0,34	4,68	2580,79	321,69	2597,71	5 505	61 209
Diesel Euro 5 + B 30%	0,26	4,68	3166,02	217,76	2012,87	5 402	60 057
GNV EEV	0,01	54,60	1439,10	108,88	3306,34	4 909	54 579

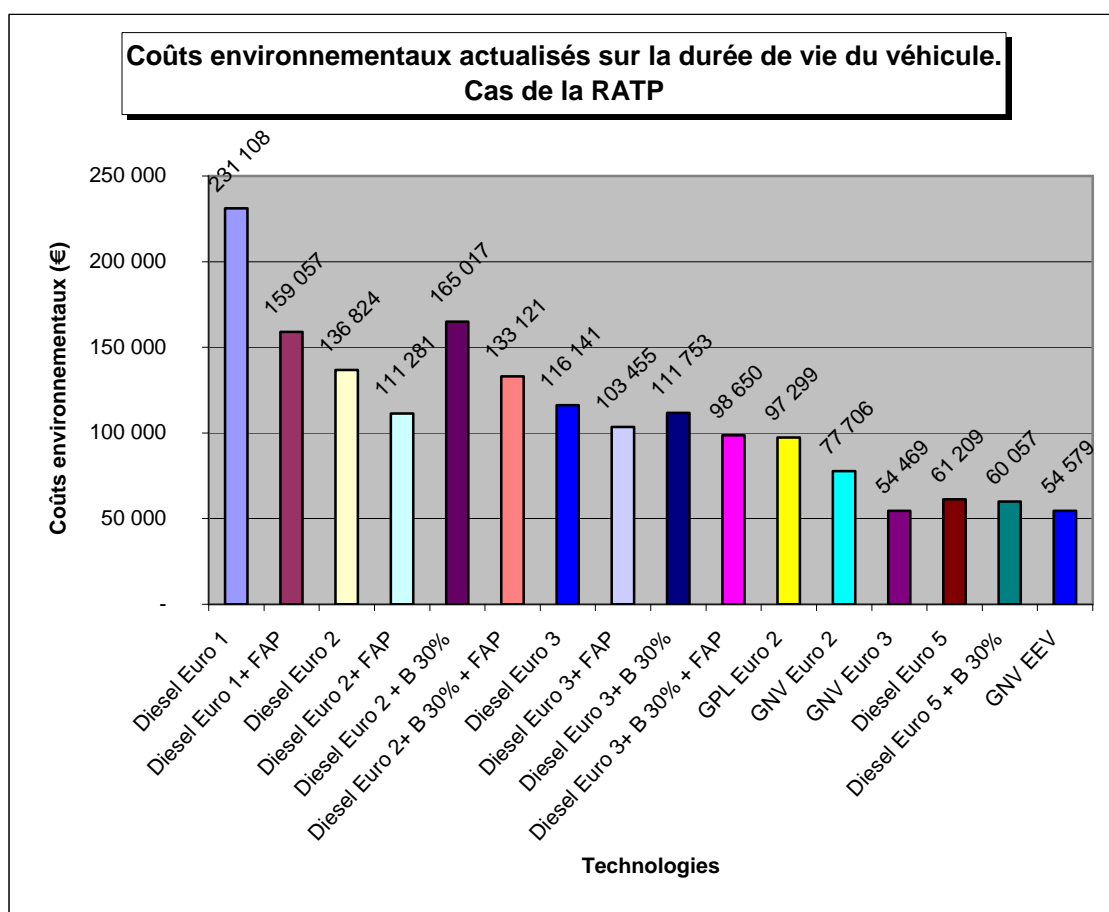
PM : particule

FAP : filtre à particules

B 30% : biodiesel à 30% d'EMHV (esther méthylique d'huile végétale)

³⁰ Ce qui revient à multiplier le coût annuel par 11,11839 (actualisation) au lieu de 15 (absence d'actualisation).

Figure 9.1 - Les coûts environnementaux actualisés des diverses technologies sur la durée de vie du véhicule



Sous les réserves déjà énoncées à leur propos les coûts environnementaux permettent de visualiser d'un seul bloc et selon une valeur « parlante » (le coût monétaire) l'impact environnemental global d'une technologie et son évolution.

Ainsi à la fin des années 1990, quand le Conseil régional a lancé son programme « bus propre », c'était la norme Euro 2 qui était en vigueur (à partir d'octobre 1996). Pour cette norme les bus GPL et GNV était globalement plus « écologiques ». Le calcul précédent attribue un coût environnemental actualisé de 136 824 € au bus diesel Euro 2 contre 97 299 € au bus GPL Euro 2 et 77 706 € au bus GNV Euro 2. Il était justifié à l'époque, comme cela fut fait, de favoriser à la fois l'acquisition de bus GPL et GNV et l'équipement de bus diesel en filtre à particules (FAP). Le choix d'un bus GPL au lieu d'un bus diesel, tous les deux Euro 2, apportait, dans les conditions d'exploitation de la RATP, un « gain » environnemental actualisé de 39 525 € sur une durée de vie de 15 ans ; celui d'un bus GNV, 59 118 € ; l'équipement en FAP d'un bus diesel apportait un « gain » de 25 543 €.

Aujourd'hui, compte tenu des avancées technologiques des bus diesel, la comparaison est totalement modifiée : le bus GPL est moins intéressant que le diesel Euro 5 (« surcoût » de 36 090 €) et l'achat d'un bus GNV EEV au lieu d'un bus diesel Euro 5 n'apporte qu'un « gain » actualisé de 8 944 € (sur une durée de vie de 15 ans) ; si le bus diesel utilise du diester (à 30%) ce « gain » est réduit à 7 390 €

La leçon que l'on peut en tirer est que l'on doit être prudent quand on définit une politique de véhicules propres et penser que des bouleversements peuvent s'opérer à moyen terme (10 ans).

9.2 LES COÛTS ECONOMIQUES

On a cherché à évaluer les coûts économiques dans deux conditions contrastées d'exploitation :

- la RATP, grande entreprise publique possédant 4.080 bus dont 57 GPL et 90 GNV (le reste étant des bus diesel),
- MARNE-ET-MORIN, entreprise privée familiale de taille moyenne : 190 bus dont 32 GNV.

Pour chaque entreprise et chaque filière on a calculé le coût économique actualisé d'un véhicule sur sa durée de vie (hors salaires des conducteurs) tenant compte des investissements fixes (coût du véhicule plus équipements spécifiques) et des coûts variables d'exploitation annuels (coût de maintenance et coût du carburant).

On a utilisé le taux d'actualisation officiellement retenu pour les calculs de choix économiques en France, soit 4%. Pour que la comparaison soit équitable on a retenu le même kilométrage annuel du véhicule quelle que soit la technologie : 39 000 km pour la RATP et 42 000 km pour MARNE -ET-MORIN. De même on a retenu la même durée de vie : 15 ans. On a supposé que les dépenses annuelles de fonctionnement sont constantes (en € constants)

Par ailleurs, les entreprises ayant reçu des subventions de la Région pour l'achat de leurs véhicules, on a déterminé le coût actualisé dans les deux situations suivantes :

- sans tenir compte des subventions régionales
- en tenant compte de celles-ci

On rappelle que les subventions régionales sont octroyées selon les modalités suivantes :

- RATP : le Conseil régional subventionne le surcoût des véhicules GPL et GNV par rapport à leur équivalent diesel
- MARNE-ET-MORIN : pour une acquisition en renouvellement du parc - hypothèse que l'on a retenue - le bus diesel est subventionné à hauteur de 30% de son coût plafonné à 240 000 € et le bus GNV à 40% de son coût plafonné à 270 000 €.

Enfin, bien que les coûts environnementaux ne soient pas de même nature que le coût actualisé, on a calculé à titre indicatif le « coût global actualisé sur la durée de vie », somme du coût actualisé CA et du coût environnemental actualisé de la technologie (calculé au § 9.1).

Le calcul nécessite de connaître le montant des investissements fixes et celui des coûts annuels de fonctionnement. Ils ont été approchés par un questionnaire adressé aux entreprises. Pour respecter l'aspect confidentiel de ces données on ne présente que les résultats de calcul et les hypothèses complémentaires que l'on a été éventuellement amené à adopter³¹.

³¹ Ce dernier point concerne la RATP qui n'a pas souhaité fournir le prix d'achat de ses carburants ; on a donc dû les estimer par enquête

9.2.1 Le cas de la RATP

Pour la RATP la comparaison se fait entre les technologies suivantes : diesel avec filtre à particules, GPL et GNV. En ce qui concerne le diesel on a également estimé les coûts dans le cas d'usage du diester 30% (biodiesel à 30% de biocarburant).

La RATP n'ayant fourni que les éléments d'investissements et de maintenance annuelle pour l'année 2004, il a été nécessaire d'estimer leur prix d'achat des carburants pour 2004 selon la méthode ci-après :

- En ce qui concerne le diesel et le GPL on a obtenu les prix moyens HT en 2004 des carburants vendus à la pompe en France auprès de la DGEMP³² : 0,3238 € le litre pour le gazole et 0,4135 € le litre pour le GPL. Compte tenu de la TIPP³³ existante à cette date et du remboursement de celle-ci pour les entreprises de transports en commun, on arrive aux prix nets 2004 hors TVA : 0,7157 €/l pour le gazole et 0,4135 €/l pour le GPL. On a également supposé que la RATP achetait le diester au même prix que le gazole.
- En ce qui concerne le GNV, l'absence de données auprès de la DGEMP et le fait que GNVert (filiale de Gaz de France) vende le GNV à des prix très variables suivant la quantité livrée nous a conduit à faire une enquête, y compris auprès de GNVert. On en a conclu que la RATP aurait acheté en 2004 son GNV entre 0,30 et 0,40 € hors TVA le Normo-m³. On a retenu le prix moyen : 0,35 €.

Les résultats sont présentés dans les tableaux 9.3 (calcul sans tenir compte de la subvention régionale pour l'achat des véhicules GPL et GNV) et 9.4 (calcul avec déduction de la subvention régionale pour l'achat des véhicules GPL et GNV).

Tableau 9.3 RATP Coûts actualisés sur la durée de vie d'un véhicule - Année 2004

<i>Hypothèses</i>	Gazole	Diester 30%	GPL	GNV
	<i>diesel Euro 3 + FAP</i>	<i>diesel Euro 3 + FAP + B30%</i>	<i>GPL Euro 2</i>	<i>GNV Euro 3</i>
Consommation (en l/km ou Nm³/km)	0,609	0,642	1,165	0,744
Hypothèse de coût du carburant net hors TVA (€/l ou €/Nm³)	0,7157 €	0,7157 €	0,4135 €	0,3500 €
Coût économique actualisé sur durée de vie	549 108 €	559 349 €	664 623 €	610 269 €
Coût économique actualisé relatif sur durée de vie (base : gazole)	1,00	1,02	1,21	1,11
Coût environnemental actualisé sur durée de vie	103 455 €	98 650 €	97 299 €	54 469 €
Coût global actualisé sur durée de vie	652 563 €	657 999 €	761 922 €	664 738 €
Coût global actualisé relatif sur durée de vie (base : gazole)	1,00	1,01	1,17	1,02

³² Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières

³³ Taxe Intérieure sur les Produits Pétroliers

Tableau 9.4 RATP Coûts actualisés sur la durée de vie d'un véhicule avec déduction de la subvention régionale pour l'achat des véhicules GPL et GNV. Année 2004.

	Gazole	Diester 30%	GPL	GNV
Hypothèses	<i>diesel Euro 3 + FAP</i>	<i>diesel Euro 3 + FAP + B30%</i>	<i>GPL Euro 2</i>	<i>GNV Euro 3</i>
Consommation (en l/km ou Nm³/km)	0,609	0,642	1,165	0,744
Hypothèse de coût du carburant net hors TVA (€/l ou €/Nm³)	0,7157 €	0,7157 €	0,4135 €	0,3500 €
Coût économique actualisé sur durée de vie	549 108 €	559 349 €	634 623 €	555 269 €
Coût économique actualisé relatif sur durée de vie (base : gazole)	1,00	1,02	1,16	1,01
Coût environnemental actualisé sur durée de vie	103 455 €	98 650 €	97 299 €	54 469 €
Coût global actualisé sur durée de vie	652 563 €	657 999 €	731 922 €	609 738 €
Coût global actualisé relatif sur durée de vie (base : gazole)	1,00	1,01	1,12	0,93

On constate tout d'abord que le véhicule GPL est nettement plus coûteux que les autres : par rapport au diesel le coût économique actualisé est de +21% sans subvention et +16% avec subvention. Même si on tient compte des coûts environnementaux cette distinction persiste : par rapport au diesel le coût global actualisé est de +17% sans subvention et +12% avec subvention.

Le GNV est plus cher que le diesel si on ne tient pas compte de la subvention régionale (de +11%) mais est équivalent si on en tient compte (de +1% seulement). En revanche si on tient compte des coûts environnementaux il est légèrement plus « onéreux » (+2%) sans subvention régionale mais moins « onéreux » avec subvention (-7%). On rappelle toutefois que les coûts environnementaux sont sujets à caution par nature et que le bilan global actualisé est donné ici à titre indicatif.

L'usage du diester à 30% augmente légèrement le coût économique du véhicule diesel (+2%) mais abaisse son coût environnemental (-5%). Cependant, compte tenu du poids relatif du coût économique, le coût global actualisé progresse très légèrement (+1%)

9.2.2 Le cas de MARNE-ET-MORIN

A la différence de la RATP l'entreprise MARNE-ET-MORIN a fourni tous les éléments économiques demandés pour l'année 2006. Cette entreprise n'ayant pas de bus GPL la comparaison a porté sur le diesel (gazole pur et diester à 30%) et le GNV.

Les calculs ont été faits selon les mêmes critères que pour la RATP, sachant que le kilométrage moyen des bus est plus important qu'à la RATP (42 000 km au lieu de 39 000) et que la consommation kilométrique est plus faible. On a donc corrigé les valeurs des coûts environnementaux au prorata de ces données³⁴.

Pour avoir une présentation identique à celle de la RATP on a fait figurer les prix d'achat des carburants avec l'accord de l'entreprise.

Les résultats sont résumés dans les tableaux 9.5 et 9.6 ci-après.

³⁴ Multiplication par le ratio des kilométrages et par celui des consommations

Tableau 9.5 MARNE-ET-MORIN Coûts actualisés sur durée de vie d'un véhicule. Année 2006.

	Gazole	Diester 30%	GNV
<i>Hypothèses</i>	<i>diesel Euro 3 + FAP</i>	<i>Diesel Euro 3 + FAP + B30%</i>	<i>GNV Euro 3</i>
Consommation (en l/km ou Nm³/km)	0,330	0,350	0,600
Coût carburant net hors TVA (€/l ou €/Nm³)	0,8100 €	0,9200 €	0,6400 €
Coût économique actualisé sur durée de vie	414 854 €	440 398 €	583 560 €
Coût économique actualisé relatif sur durée de vie (base : gazole)	1,00	1,06	1,41
Coût environnemental actualisé sur durée de vie	60 372	57 918	47 306
Coût global actualisé sur durée de vie	475 226	498 316	630 866
Coût global actualisé relatif sur durée de vie (base : gazole)	1,00	1,05	1,33

Tableau 9.6 MARNE-ET-MORIN Coûts actualisés sur durée de vie d'un véhicule avec déduction de la subvention régionale pour l'achat des véhicules diesel, GPL et GNV. Année 2006.

	Gazole	Diester 30%	GNV
<i>Hypothèses</i>	<i>diesel Euro 3 + FAP</i>	<i>diesel Euro 3 + FAP + B30%</i>	<i>GNV Euro 3</i>
Consommation (en l/km ou Nm³/km)	0,330	0,350	0,600
Coût net hors TVA (€/l ou €/Nm³)	0,8100 €	0,9200 €	0,6400 €
Coût économique actualisé sur durée de vie	342 854 €	368 398 €	475 560 €
Coût économique actualisé relatif sur durée de vie (base : gazole)	1,00	1,07	1,39
Coût environnemental actualisé sur durée de vie	60 372	57 918	47 306
Coût global actualisé sur durée de vie	403 226	426 316	522 866
Coût global actualisé relatif sur durée de vie (base : gazole)	1,00	1,06	1,30

Dans le cas de MARNE-ET-MORIN la technologie GNV est franchement plus chère que le diesel même en tenant compte de la subvention régionale. Sans cette dernière le coût économique est 41% plus élevé que celui du diesel ; avec la subvention il est encore supérieur de 39%.

Si on rajoute les coûts environnementaux, le coût global actualisé du GNV demeure encore nettement supérieur à celui du diesel : +33% sans subvention et +30% avec subvention.

Cette différence s'explique essentiellement par trois facteurs :

- 1- La consommation moyenne de gazole par véhicule urbain chez MARNE-ET-MORIN est nettement plus faible qu'à la RATP (-46%) alors que la consommation GNV est plus faible mais dans une moindre proportion (-19%)
- 2- L'entreprise MARNE-ET-MORIN paie beaucoup plus cher son GNV du fait de sa consommation moindre que la RATP (de l'ordre de +50% d'après un calcul sommaire pour ramener les prix à la même année de référence)

- 3- Les coûts de maintenance annuels des bus diesel RATP sont trois fois plus élevés que ceux de l'entreprise MARNE-ET-MORIN, alors que pour les bus GNV le surcoût RATP est de seulement 70%.

Pour le diester on aboutit à la même conclusion que dans le cas RATP : légère augmentation du coût économique et du coût global actualisé.

9.3 CONCLUSIONS

L'analyse des coûts environnementaux actualisés sur la durée de vie des véhicules confirme le choix du Conseil régional au moment du lancement de son programme « bus propre » à la fin des années 1990.

Il était justifié à l'époque, comme cela fut fait, de favoriser à la fois l'acquisition de bus GPL et GNV et l'équipement de bus diesel en filtre à particules (FAP). Le choix d'un bus GPL au lieu d'un bus diesel, tous les deux Euro 2, apportait, dans les conditions du cycle RATP, un « gain » environnemental actualisé de 39 525 € sur une durée de vie de 15 ans ; celui d'un bus GNV, 59 118 € ; l'équipement en FAP d'un bus diesel apportait un « gain » de 25 543 €. Aujourd'hui, compte tenu des avancées technologiques des bus diesel, la comparaison est totalement modifiée : le bus GPL est moins intéressant que le diesel Euro 5 (« surcoût » de 36 090 €) et l'achat d'un bus GNV EEV au lieu d'un bus diesel Euro 5 n'apporte qu'un « gain » actualisé de 8 944 € (sur une durée de vie de 15 ans) ; si le bus diesel utilise du diester (à 30%) ce « gain » est réduit à 7 390 €.

Ces gains sont liés aux performances des dispositifs techniques, performances susceptibles d'évoluer au cours du temps sous l'effet des progrès techniques. La leçon que l'on peut en tirer est que l'on doit être prudent quand on définit une politique de véhicules propres et penser que des évolutions importantes des performances peuvent justifier de réviser périodiquement les conditions d'attribution des aides publiques.

L'analyse des coûts économiques actuels aboutit à des résultats différents selon que l'on se place dans le cas de l'exploitation RATP ou de MARNE-ET-MORIN. Elle met en évidence l'importance de deux facteurs susceptibles d'influencer grandement les résultats et donc les choix d'une entreprise de transport :

- Les conditions effectives d'utilisation des véhicules qui jouent sur les consommations moyennes ;
- Les conditions économiques et en particulier les prix d'achat des carburants consentis par les constructeurs.

Dans le cas de la RATP elle confirme le manque d'intérêt du bus GPL. Le GNV est plus cher que le diesel si on ne tient pas compte de la subvention régionale (de +11%) mais est équivalent si on en tient compte (de +1% seulement). En revanche si on tient compte des coûts environnementaux il est légèrement plus « onéreux » (+2%) sans subvention régionale mais moins « onéreux » avec subvention (-7%). Le partage diesel-GNV est donc difficile. L'usage du diester 30% augmente légèrement le coût économique du véhicule diesel (+2%) mais abaisse son coût environnemental (-5%). Cependant, compte tenu du poids relatif du coût économique, le coût global actualisé progresse très légèrement (+1%).

Dans le cas de MARNE-ET-MORIN le bus GNV est nettement plus onéreux tant en l'absence de subvention régionale (+41%) qu'avec celle-ci (+39%). La prise en compte des coûts environnementaux ne modifie pas les conclusions (le coût global actualisé est alors respectivement plus élevé de +33% et +30%). Pour le diester on aboutit à la même

conclusion que dans le cas RATP : légère augmentation du coût économique et du coût global actualisé.

La différence des résultats comparatifs diesel-GNV entre les entreprises s'explique essentiellement par trois facteurs :

- la consommation moyenne de gazole par véhicule urbain chez MARNE-ET-MORIN est nettement plus faible qu'à la RATP (-46%) alors que la consommation GNV est plus faible mais dans une moindre proportion (-19%),
- l'entreprise MARNE-ET-MORIN paie beaucoup plus cher son GNV (de l'ordre de +50%) du fait de sa consommation moindre que la RATP.
- les coûts de maintenance annuels des bus diesel RATP sont trois fois plus élevés que ceux de l'entreprise MARNE-ET-MORIN, alors que pour les bus GNV le surcoût RATP est de seulement 70%.

Les entreprises ont également fait part des contraintes plus importantes des bus GNV par rapport aux bus diesel.

Outre la sécurité³⁵ la RATP a mentionné oralement les surcoûts de maintenance et une perte de place de garage (de l'ordre de 10 à 20%).

MARNE-ET-MORIN, dans sa réponse écrite au questionnaire, a relevé les points suivants en matière de maintenance des bus GNV :

- obligation pour toute intervention sur circuit gaz de définir une zone de sécurité,
- entretien périodique plus spécifique,
- exigence d'une formation spécifique pour le personnel de maintenance,
- vieillissement prématuré de certains organes environnementaux moteur (organes de transmission) lié à l'érosion produite par le gaz,
- consommation plus importante d'huile moteur entre deux opérations de vidange.

³⁵ Pour la sécurité on renvoie le lecteur au « rapport d'enquête technique sur les incendies d'autobus fonctionnant au GNV notamment les incendies survenus en août 2005 à Montbéliard et à Nancy » (BEA-TT, mars 2006)

10. LES EVOLUTIONS POSSIBLES DES MOTORISATIONS THERMIQUES DIESEL ET GNV

Au vu des résultats précédents on se rend compte que la concurrence sur les motorisations thermiques bus se fera entre le diesel et le GNV avec probablement une hybridation électrique (le cas du bus hybride est examiné plus en détail dans le chapitre 11). Ces 10 dernières années le bus diesel a quasiment rejoint le bus GNV pour la qualité de ses émissions polluantes tout en étant meilleur pour les émissions de gaz à effet de serre « du puits à la roue » et en étant sensiblement moins onéreux tant en investissement qu'en fonctionnement.

Cependant, les moteurs de bus actuels ne sont aucunement conçus selon le fonctionnement de ces véhicules pour la raison simple que le marché bus est limité. Le moteur bus diesel est un moteur conçu pour des camions essentiellement destinés à faire de longs trajets en interurbain ; le moteur bus GNV, lui, est un moteur diesel « bricolé » pour le transformer en moteur à allumage commandé.

On ne sait pas si un jour on réalisera des moteurs spécifiques bus. Dans l'immédiat les études prospectives concernant les voitures particulières ; deux viennent d'être publiées en 2006 et 2007 :

- une étude française de l'AFGNV (Association Française du Gaz Naturel Véhicule) « Le Gaz naturel Véhicules : quel potentiel ? » (novembre 2006), cofinancée par l'AFGNV, l'ADEME, la DGEMP et l'IFP.
- une étude européenne très complète et très documentée : JOINT RESEARCH CENTRE (European Commission)-CONCAWE-EUCAR³⁶ « Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context » (mars 2007).

On les examinera successivement ci-après. Comme ces deux études montrent que les grands enjeux du futur sont les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre on se limitera à ces éléments.

10.1 L'ETUDE AFGNV

Cette étude présente, aux horizons 2003, 2010 et 2020, des bilans comparatifs « du puits à la roue », d'une part pour la situation française, d'autre part pour la situation européenne. Les bilans sont peu différents. On ne présente ici que les bilans France qui font l'objet des figures 10.1 (Bilan énergétique) et 10.2 (Emissions de gaz à effet de serre).

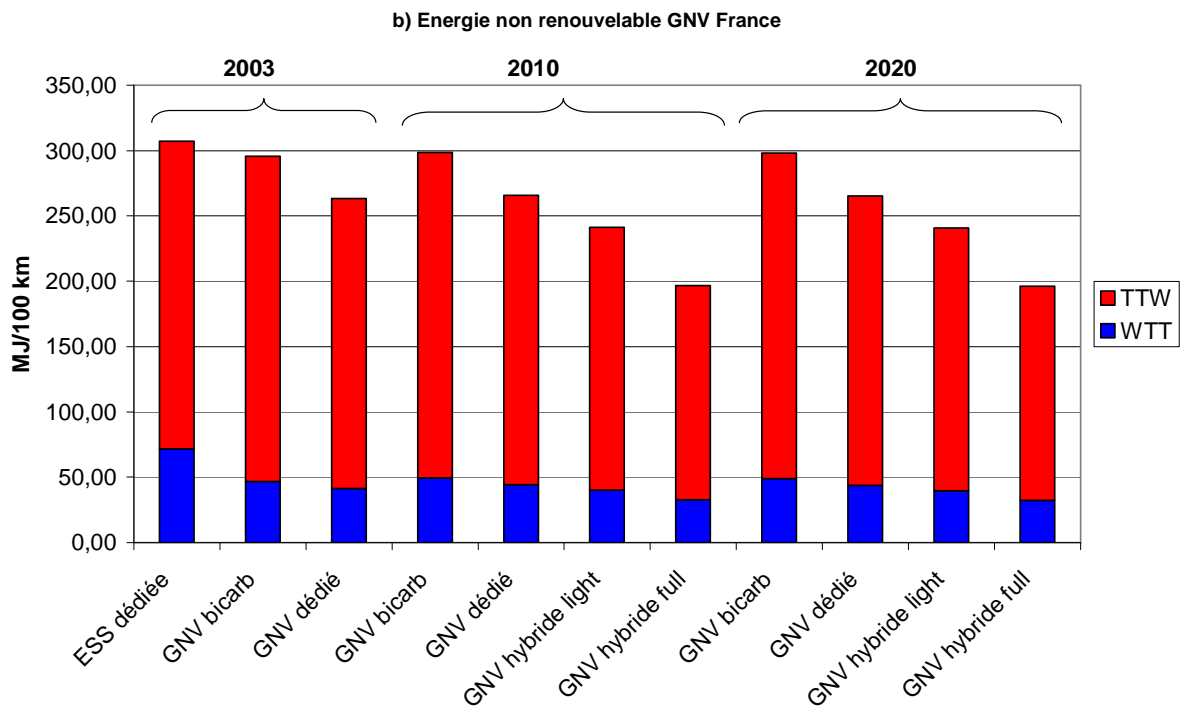
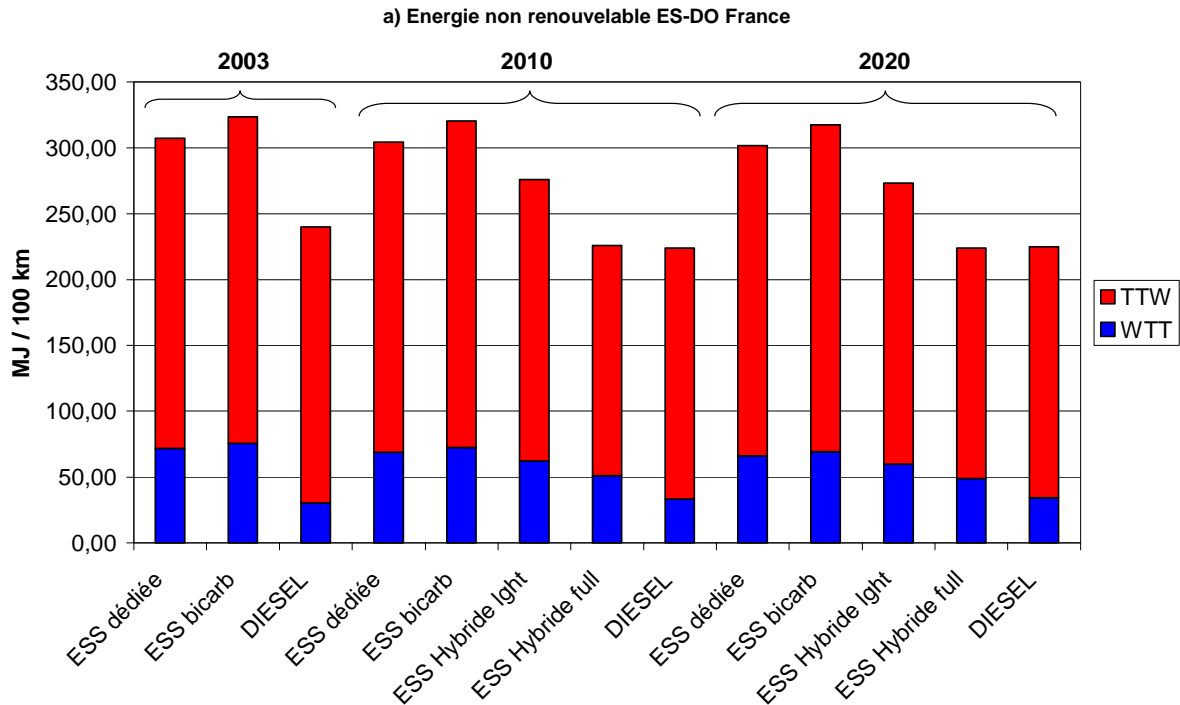
Comme les figures 10.1 et 10.2 ne comparent pas directement le diesel et le GNV (la comparaison directe est essence-GNV) on a repris les données du rapport pour la restituer. Comme les données chiffrées ne sont pas explicitées dans le document on les a reconstituées à partir des graphiques des figures 10.1 et 10.2.

Les résultats sont présentés dans le tableau 10.1 et la figure 10.3 pour le bilan énergétique puis dans le tableau 10.2 et la figure 10.4 pour les émissions de gaz à effet de serre.

³⁶ Pour l'explicitation des sigles voir l'annexe 3.

Figure 10.1 Voitures particulières. Bilan des consommations d'énergie non renouvelable du puits à la roue pour la France
 (Source : AFGNV, nov. 2006)

a) Essence vs. Gazole et b) Essence vs. GNV.

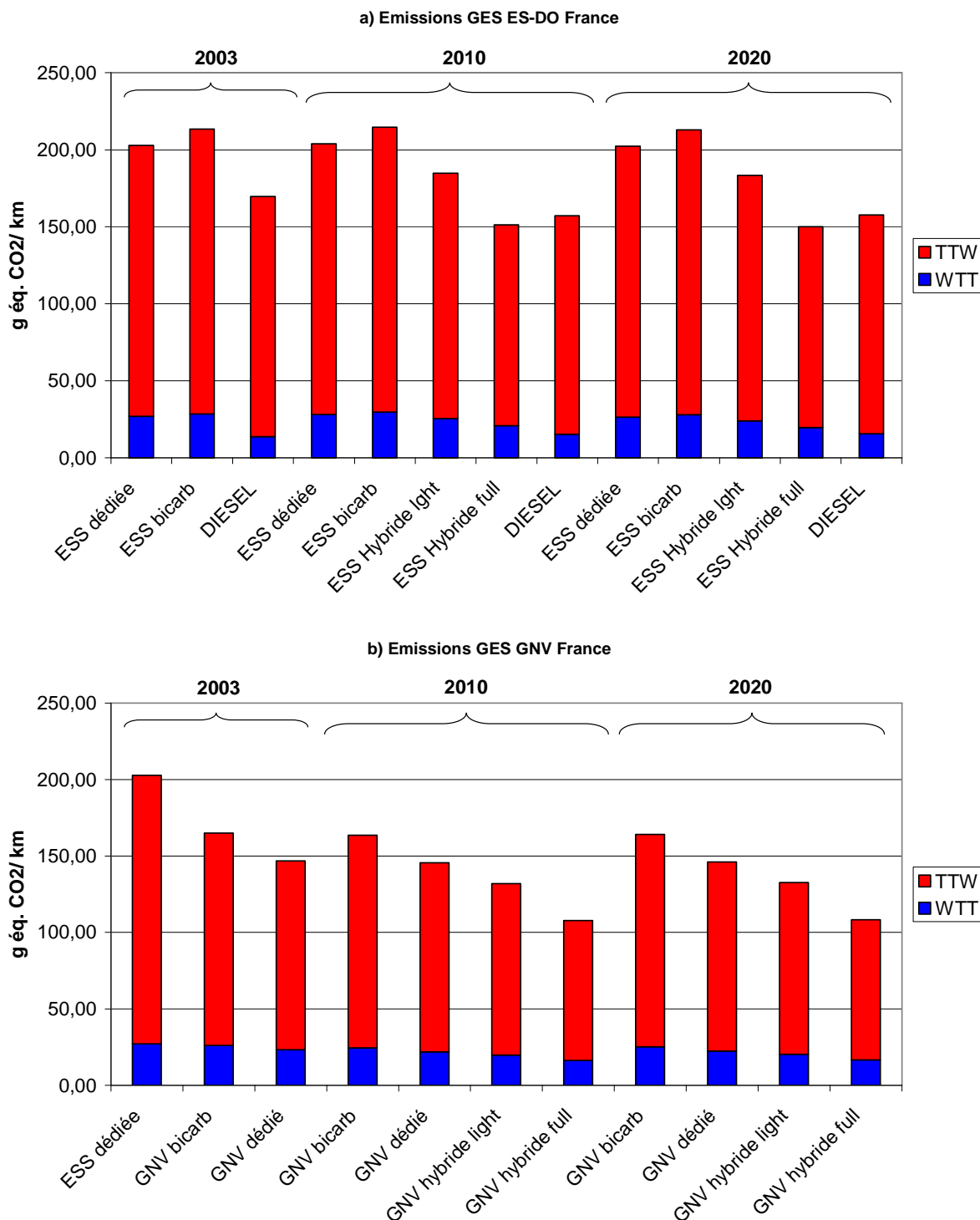


TTW : Tank-To-Wheels (du réservoir à la roue)

WTT : Well-To-Tank (du puits au réservoir)

Figure 10.2 Voitures particulières. Bilan des émissions de gaz à effet de serre (GES) pour la France
 (Source : AFGNV, nov. 2006)

a) Essence vs. Gazole et b) Essence vs. GNV.



TTW : Tank-To-Wheels (du réservoir à la roue)

WTT : Well-To-Tank (du puits au réservoir)

Tableau 10.1 Voitures particulières. Comparaison GNV et diesel.
Consommation d'énergie du puits à la roue. Horizon 2020.
(Source : AFGNV, novembre 2006)

Technologie	Consommation (MJ/100km)	Indice (base 100 CNG bi-carburant 2003)
Diesel 2003	242	82
Diesel 2010	225	76
Diesel 2020	225	76
GNV bi-carburant 2003	295	100
GNV dédié 2003	262	89
GNV dédié 2010	262	89
GNV dédié 2020	262	89
GNV hybride (2010-2020)	195	66

Figure 10.3 Voitures particulières. Comparaison GNV et diesel.
Consommation d'énergie du puits à la roue. Horizon 2020.
(Source : AFGNV, novembre 2006)

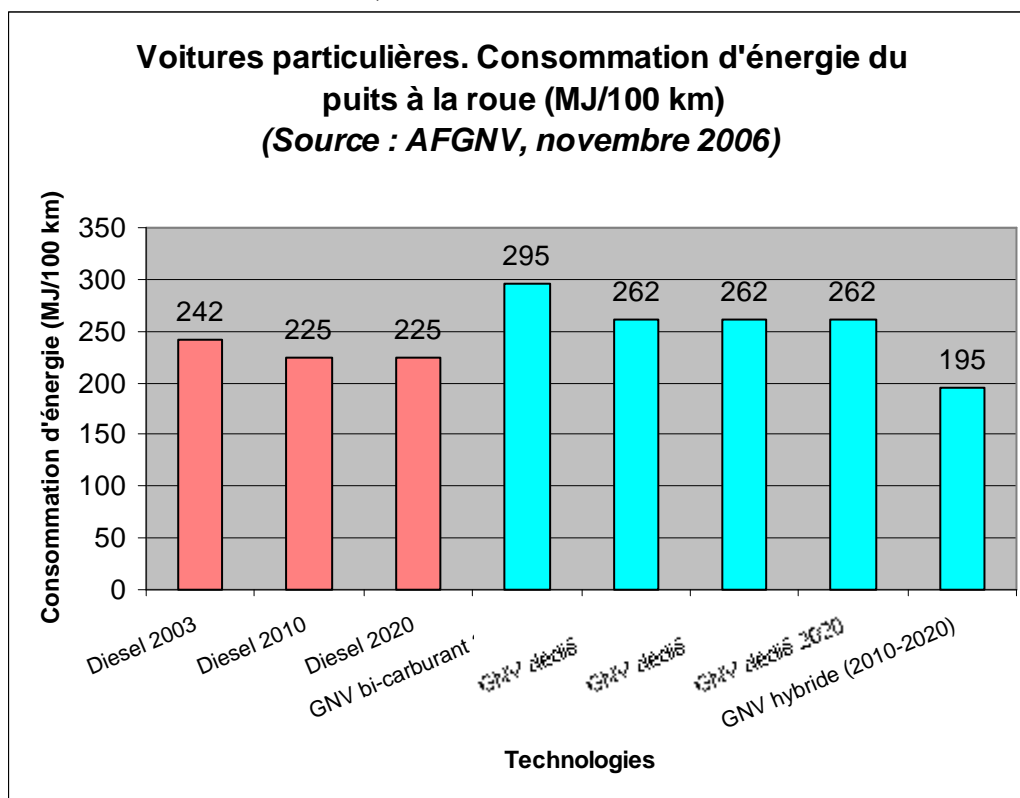
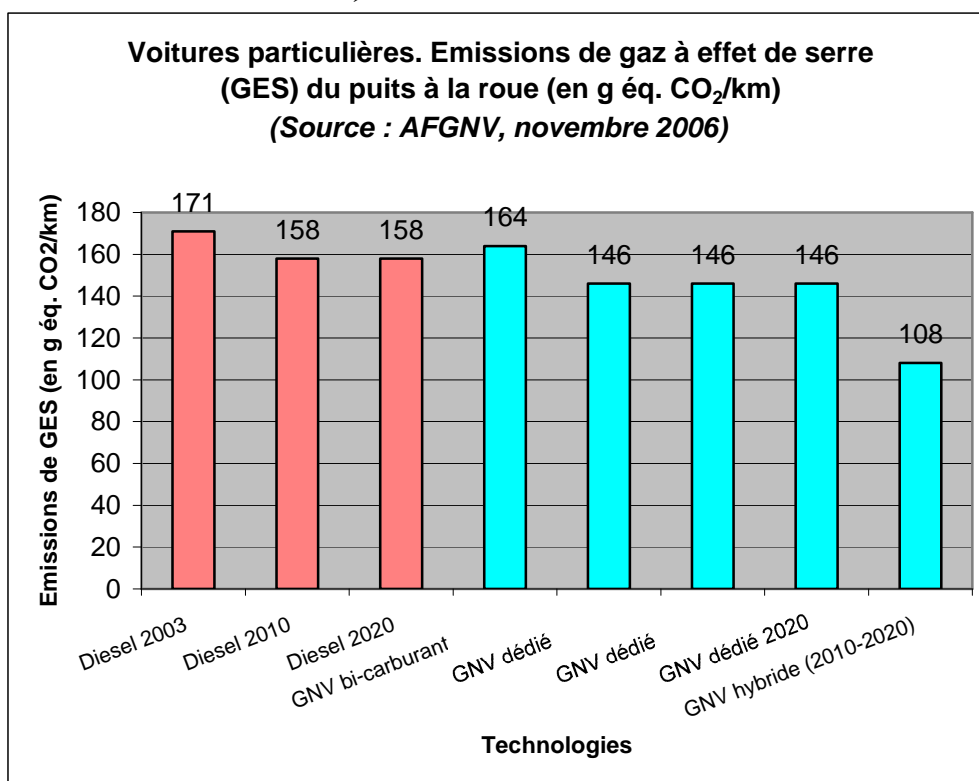


Tableau 10.2 Voitures particulières. Comparaison GNV et diesel.
Emissions de gaz à effet de serre du puits à la roue. Horizon 2020.
(Source : AFGNV, novembre 2006)

Technologie	Emissions GES (en g éq. CO ₂ /km)	Indice (base 100 CNG bi-carburant 2003)
Diesel 2003	171	104
Diesel 2010	158	96
Diesel 2020	158	96
GNV bi-carburant 2003	164	100
GNV dédié 2003	146	89
GNV dédié 2010	146	89
GNV dédié 2020	146	89
GNV hybride (2010-2020)	108	66

Figure 10.4 Voitures particulières. Comparaison GNV et diesel.
Emissions de gaz à effet de serre du puits à la roue. Horizon 2020.
(Source : AFGNV, novembre 2006)



Actuellement (2003), du puits à la roue, le GNV consomme 22% de plus d'énergie que son homologue diesel mais émet 14% de moins de gaz à effet de serre³⁷. En 2020 le GNV dédié consommerait 17% de plus d'énergie que le diesel 2020 mais émettrait 7% de moins de gaz à effet de serre. Seul le GNV hybride 2020 est indubitablement meilleur que le diesel 2020 : - 13% de consommation énergétique et - 31% d'émissions de gaz à effet de serre.

Le rapport conclut que sur le cycle de vie :

- la filière gazole consomme moins d'énergie que la filière GNV
- la filière GNV peut émettre environ 15% de gaz à effet de serre en moins que la filière gazole mais il note que dans beaucoup d'études le diesel et le GNV sont équivalents de ce point de vue

Il reconnaît que son positionnement est plus optimiste que l'étude JRC-CONCAWE-EUCAR en ce qui concerne le GNV.

Leurs auteurs expliquent ce résultat par le fait qu'ils n'ont pas adopté les mêmes hypothèses à la fois pour la modélisation des véhicules et pour les bilans énergie et émissions de gaz à effet de serre (GES) « du puits au réservoir ».

On remarque cependant que dans l'étude AFGNV le diesel est pénalisé par la non prise en compte, d'une part du diesel hybride, d'autre part des biocarburants et carburants de synthèse à partir de la biomasse. Ces éléments sont examinés dans l'étude JRC-CONCAWE-EUCAR.

10.2 L'ETUDE JRC-CONCAWE-EUCAR

Cette étude est l'actualisation d'une première version publiée en 2003.

Son horizon est 2010 et au-delà (pas de précision sur les dates au-delà de 2010).

Elle se veut exhaustive, objective, consensuelle et être une référence pour les parties prenantes dans le domaine de l'énergie et des transports routiers.

A la différence de l'étude AFGNV elle aborde les aspects économiques.

Cette étude est volumineuse et compare de nombreuses technologies. On se limitera à la comparaison diesel-GNV.

Dans la suite de ce document, sauf mention contraire, on retiendra pour le GNV une situation moyenne correspondant à un acheminement par pipeline sur 4 000 km.

10.2.1 La comparaison GNV et diesel hors biocarburants et carburants de synthèse.

Comme la précédente, cette comparaison porte sur les véhicules particuliers.

Les données chiffrées étant disponibles en annexe 1 du rapport principal (WTW appendix 1) on a pu établir les bilans énergétiques dans le tableau 10.3 et la figure 10.5, puis les émissions de gaz à effet de serre dans le tableau 10.4 et la figure 10.6 pour les technologies diesel et GNV, sans tenir compte dans un premier temps des biocarburants de première génération et des carburants de synthèse.

³⁷ Cette comparaison, faite sur les véhicules particuliers, diffère des résultats obtenus pour les bus urbains en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre : la filière bus GNV Euro 3 émet 7% de plus de ces gaz que le diesel Euro 3 (voir § 8.2)

Tableau 10.3 Voitures particulières. Comparaison GNV et diesel.
Consommation d'énergie du puits à la roue. Horizon 2010 et au-delà (2010+)
(Source : JOINT RESEARCH CENTRE-CONCAWE-EUCAR, mai 2006)

Technologie	Consommation (MJ/100km)	Indice base 100 GNV bi-carburant 2002)
Diesel 2002	212	79
Diesel 2010 sans FAP	200	74
Diesel 2010 avec FAP	205	76
Diesel (2010+) hybride sans FAP	164	61
Diesel (2010+) hybride avec FAP	169	63
Diesel (2010+) avec reformeur et PAC	188	70
GNV bi-carburant 2002	270	100
GNV dédié 2002	265	98
GNV bi-carburant 2010	224	83
GNV dédié 2010	223	83
GNV (2010+) hybride	166	61

FAP : Filtre à Particules

PAC : Pile à Combustible

GNV dédié : le GNV est le seul carburant utilisable

Hybride : véhicule ayant un moteur thermique et un (ou deux) moteur(s) électrique(s)

Figure 10.5 Voitures particulières. Comparaison GNV et diesel.
Consommation d'énergie du puits à la roue. Horizon 2010 et au-delà (2010+)
(Source : JOINT RESEARCH CENTRE-CONCAWE-EUCAR, mai 2006)

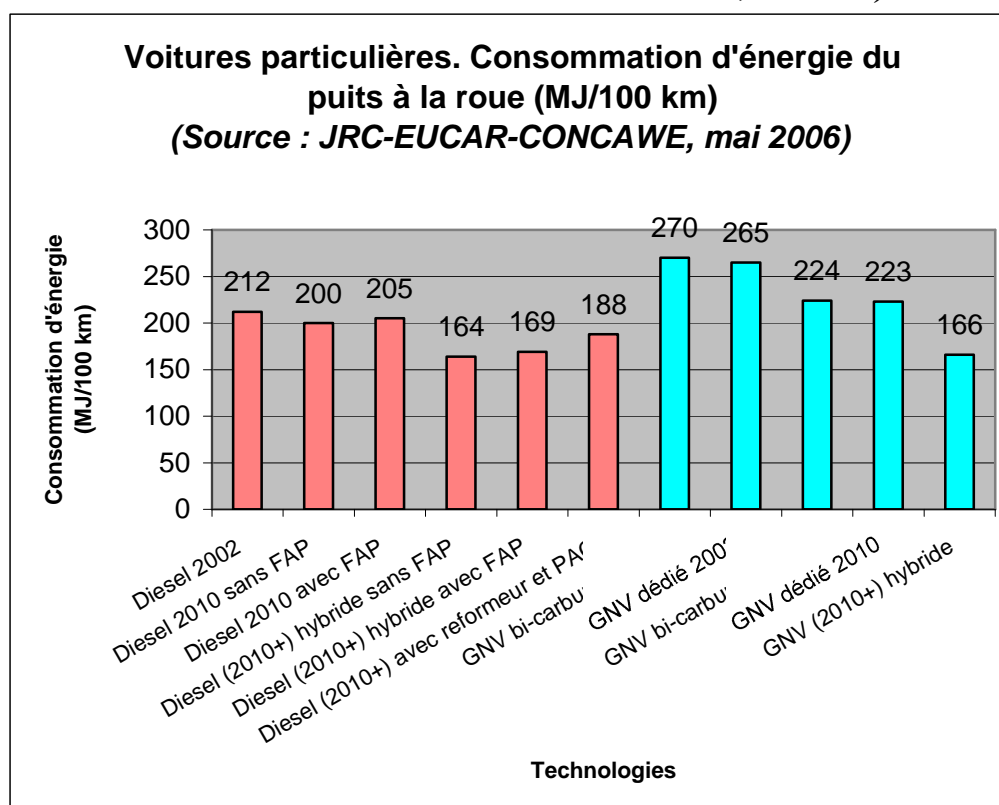


Tableau 10.4 Voitures particulières. Comparaison GNV et diesel.
Emissions de gaz à effet de serre du puits à la roue. Horizon 2010 et au-delà (2010+)
(Source : JOINT RESEARCH CENTRE-CONCAWE-EUCAR, mai 2006)

Technologie	Emissions GES (en g éq. CO ₂ /km)	Indice (base 100 GNV bi-carburant 2002)
Diesel 2002	164	100
Diesel 2010 sans FAP	152	93
Diesel 2010 avec FAP	156	95
Diesel (2010+) hybride sans FAP	125	76
Diesel (2010+) hybride avec FAP	129	79
Diesel (2010+) avec reformeur et PAC	144	88
GNV bi-carburant 2002	164	100
GNV dédié 2002	161	98
GNV bi-carburant 2010	135	82
GNV dédié 2010	134	82
GNV (2010+) hybride	100	61

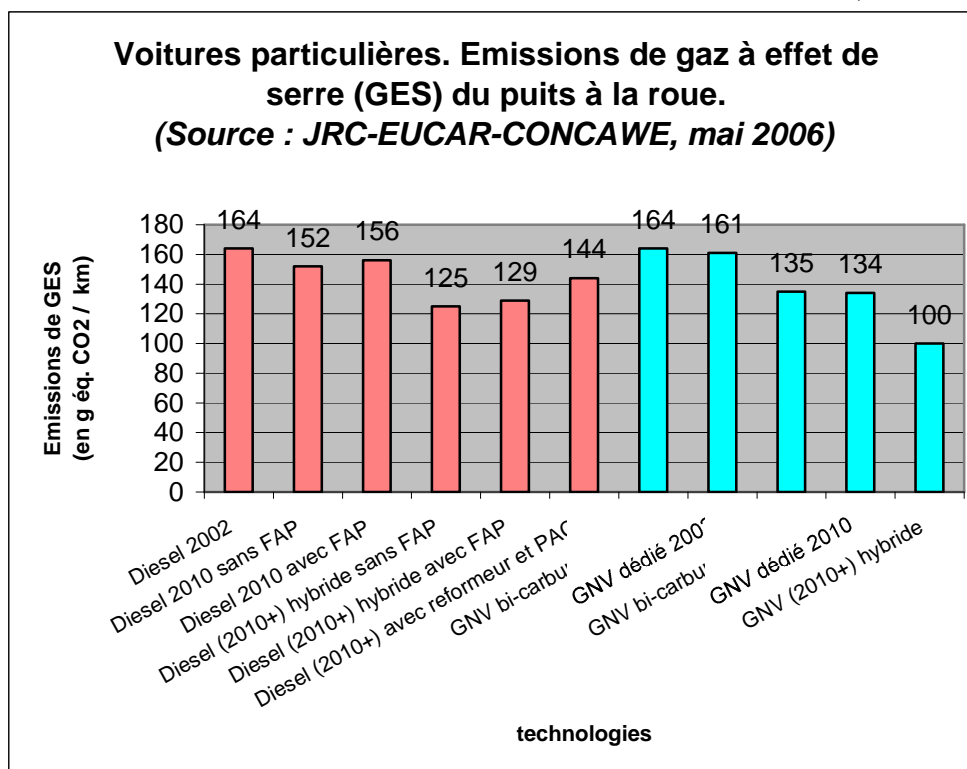
FAP : Filtre à Particules

PAC : Pile à Combustible

GNV dédié : le GNV est le seul carburant utilisable

Hybride : véhicule ayant un moteur thermique et un (ou deux) moteur(s) électrique(s)

Figure 10.6 Voitures particulières. Comparaison GNV et diesel.
Emissions de gaz à effet de serre du puits à la roue. Horizon 2010 et au-delà (2010+)
(Source : JOINT RESEARCH CENTRE-CONCAWE-EUCAR, mai 2006)



Comme annoncé dans l'étude AFGNV on vérifie que l'étude JRC-CONCAWE-EUCAR est plus pessimiste en ce qui concerne le GNV ou plutôt plus optimiste sur le diesel. Ainsi la consommation d'énergie du puits à la roue pour le diesel est 12% moindre en 2002 et 11% moindre en 2010 que dans l'étude AFGNV ; les émissions de gaz à effet de serre sont 4% moindres pour ces deux horizons.

La grande différence est la prise en compte du diesel hybride et de la pile à combustible dans l'étude JRC-CONCAWE-EUCAR

Hors prise en compte des biocarburants la comparaison du diesel et du GNV aboutit plutôt à l'avantage de ce dernier : à l'horizon 2010 le diesel est moins consommateur d'énergie (-25%) du puits à la roue mais émet 13% de plus de gaz à effet de serre. Si on compare les technologies hybrides diesel et GNV, l'avantage GNV se réduit très sensiblement : leur consommation d'énergie du puits à la roue est la même mais le GNV hybride émet 20% de moins de gaz à effet de serre.

Ses auteurs reconnaissent qu'actuellement l'avantage est au moteur diesel mais que l'évolution future (au-delà de 2010) des moteurs à allumage commandé rapprochera les performances des deux technologies ; ils concluent que l'hybridation sera particulièrement favorable au GNV. Cependant ils reconnaissent que le lieu d'origine du gaz naturel et le cheminement de sa chaîne de production-livraison sont des éléments critiques pour le bilan énergétique et environnemental du GNV. On rappelle que les données utilisées correspondent à un acheminement du gaz naturel par pipeline sur une distance de 4 000 km ; si, par exemple, cet acheminement passe à 7 000 km la consommation d'énergie du GNV hybride (du puits à la roue) croît de +9% et ses émissions de gaz à effet de serre de +11%, tandis que les performances de son concurrent - le diesel hybride - demeurent identiques.

Au passage l'étude JRC-CONCAWE-EUCAR montre, dans le cas du diesel, que la solution PAC (pile à combustible) avec reformeur³⁸ est moins intéressante que le diesel hybride tant en consommation d'énergie qu'en émissions de gaz à effet de serre.

10.2.2 L'impact des biocarburants diesel.

L'étude JRC-CONCAWE-EUCAR a également examiné les biocarburants diesel de première génération (issus des cultures agricoles) en les comparant avec le gazole.

Les résultats sont résumés dans la figure 10.7 (Horizon 2010 et au-delà)

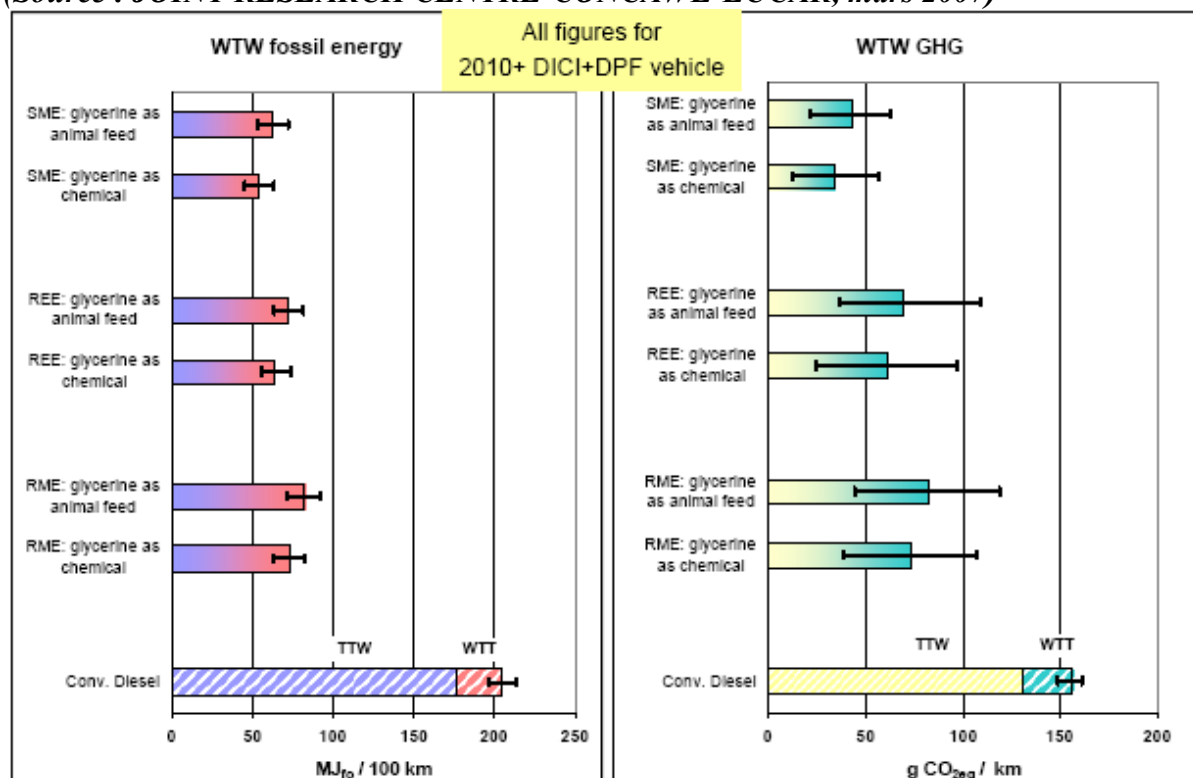
D'après la figure 10.7 les filières biocarburants sont nettement moins consommatrices d'énergie fossile et moins émettrices de gaz à effet de serre que la filière gazole (du puits à la roue). Par exemple le remplacement du gazole par de l'Ester Méthylique de Colza permet de diviser par 2,7 la consommation kilométrique d'énergie fossile et diviser par 2 les émissions de gaz à effet de serre.

L'addition de biocarburants au gazole améliore donc le bilan énergie fossile et émissions de gaz à effet de serre de la filière diesel et, par suite, sa comparaison avec le GNV.

³⁸ Reformeur : équipement embarqué permettant d'extraire à la demande l'hydrogène à partir d'un composé organique. Ce dernier est généralement du méthanol (CH_3OH) mais peut aussi être de l'éthanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), du gaz naturel, de l'essence, etc

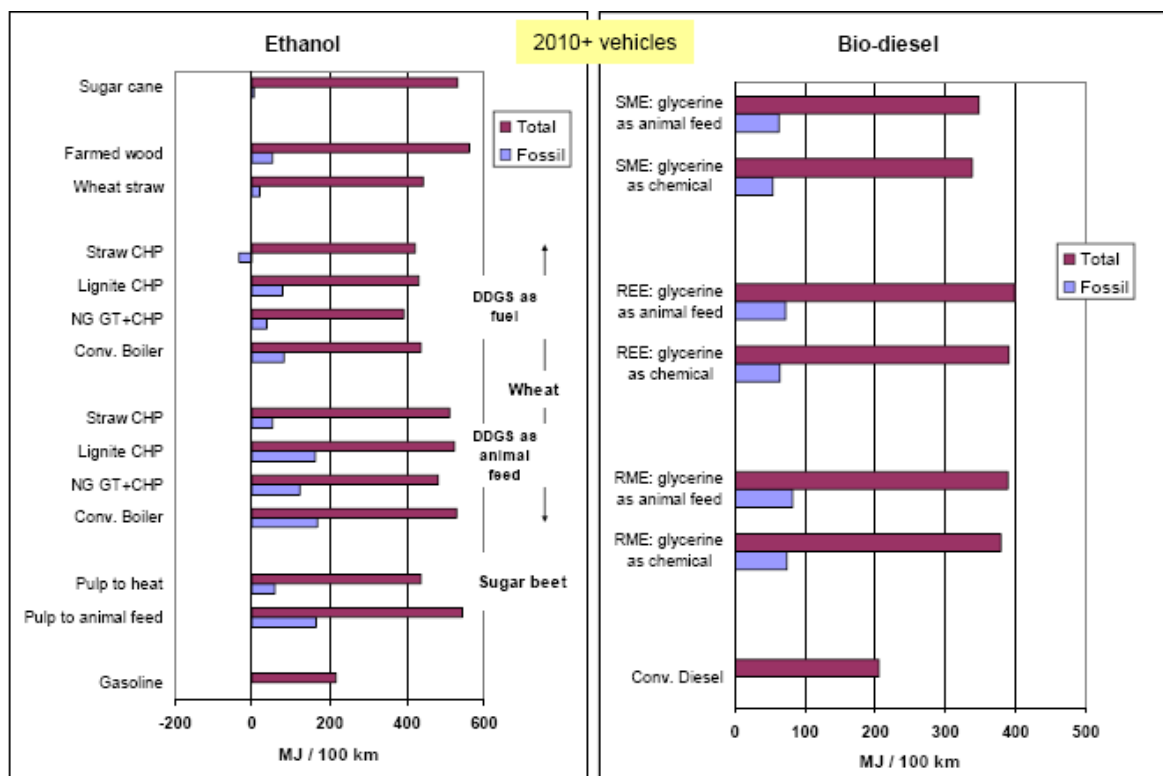
On doit cependant constater que, si les bio-diesels permettent d'économiser de l'énergie fossile, leur bilan énergétique global est inférieur à celui du gazole comme le montre la figure 10.8 (partie droite) : le bio-diesel consomme plus d'énergie biologique (renouvelable) que la quantité d'énergie fossile qu'il permet d'économiser. Pour reprendre l'exemple précédent le remplacement du gazole par de l'Ester Méthylique de Colza permet bien de diviser par 2,7 la consommation d'énergie fossile du puits à la roue mais au prix d'une multiplication par 1,9 de la consommation totale d'énergie.

Figure 10.7 Consommation d'énergie fossile et émissions de gaz à effet de serre en 2010 et au-delà par les biocarburants diesel de première génération
(Source : JOINT RESEARCH CENTRE-CONCAWE-EUCAR, mars 2007)



WTW : well to wheels (du puits à la roue)
 GHG : GreenHouse Gas (GES : Gaz à Effet de Serre)
 DIC1 : Direct Injection Compressed Ignition (Moteur diesel)
 DPF : Diesel Particulate Filter (FAP : Filtre à Particules)
 SME : Sunflower Methyl Ester (Ester Méthylique de Tournesol)
 REE : Rapeseed Ethyl Ester (Ester Ethylique de Colza)
 RME : Rapeseed Methyl Ester (Ester Méthylique de Colza)

Figure 10.8 Consommation d'énergies fossile et totale en 2010 et au-delà par les biocarburants de première génération
 (Source : JOINT RESEARCH CENTRE-CONCAWE-EUCAR, mars 2007)



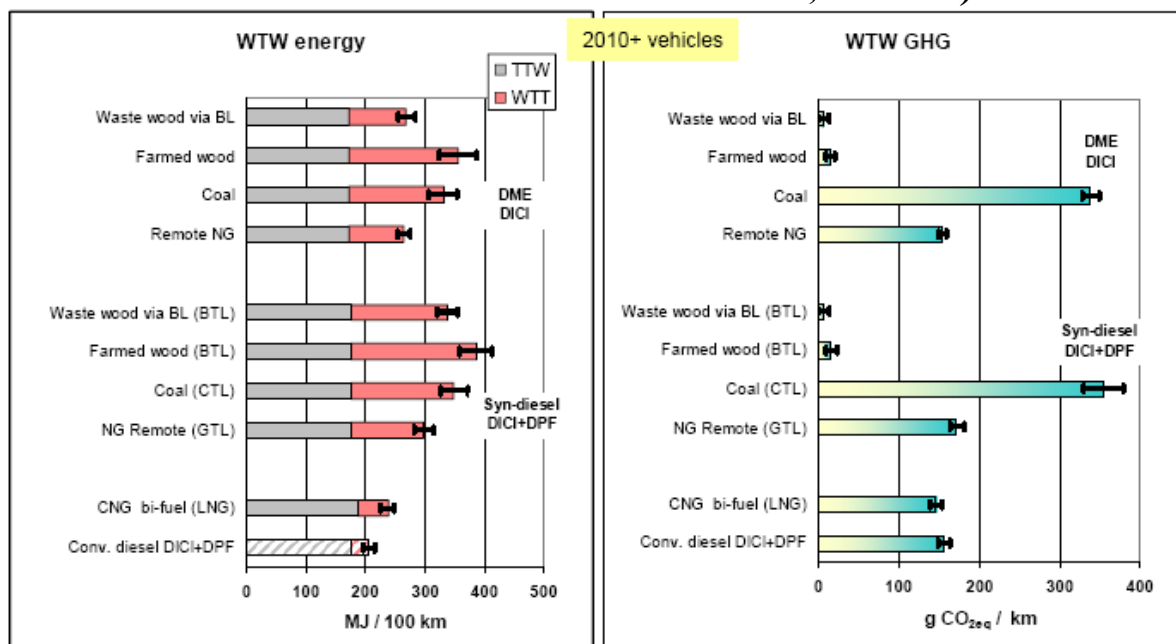
SME : Sunflower Methyl Ester (Ester Méthylique de Tournesol)
REE : Rapeseed Ethyl Ester (Ester Etylique de Colza)
RME : Rapeseed Methyl Ester (Ester Méthylique de Colza)
CHP : Combined Heat and Power (Cogénération chaleur-électricité)
NG : Natural Gas (Gaz naturel)
GT : Gas Turbine (Turbine à gaz)

10.2.3 L'impact des carburants de synthèse du diesel.

La figure 10.9 indique les bilans des carburants de synthèse comparativement au gazole pour l'horizon 2010 et au-delà.

On constate tout d'abord que tous les carburants de synthèse nécessitent plus d'énergie pour leur fabrication que le gazole ; par suite leur consommation énergétique du puits à la roue est plus élevée que ce dernier. En revanche, en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre, les carburants de synthèse fabriqués à partir de la biomasse présentent un avantage considérable par rapport au gazole [sur la figure 10.9 waste wood via BL, farmed wood, waste wood via BL (BTL), et farmed wood (BTL)]. Les carburants de synthèse diesel fabriqués à partir de la biomasse devraient apporter dans le futur un avantage décisif au gazole par rapport au GNV. Cependant il est difficile de prévoir leur succès car, pour l'instant, cette filière est au stade de la recherche-développement et ses coûts sont très élevés.

Figure 10.9 Consommation d'énergie fossile et émissions de gaz à effet de serre en 2010 et au-delà par les carburants synthétique diesel et le DME (Di-Methyl-Ether)
 (Source : JOINT RESEARCH CENTRE-CONCAWE-EUCAR, mars 2007)



WTW : well to wheels (du puits à la roue)

GHG : GreenHouse Gaz (GES : Gaz à Effet de Serre)

DME : Di-Methyl Ether

DICI : Direct Injection Compressed Ignition (Moteur diesel)

DPF : Diesel Particulate Filter (FAP : Filtre à Particules)

BL : Black Liquor (procédé de gazéification)

NG : Natural Gas

BTL : Biomass To Liquid (carburant de synthèse fabriqué à partir de la biomasse, notamment du bois)

CTL : Coal To Liquid (carburant de synthèse fabriqué à partir du charbon)

GTL : Gaz To liquid (carburant de synthèse fabriqué à partir du gaz naturel)

LNG : Liquefied Natural Gas (GNL : Gaz Naturel Liquéfié)

10.2.4 Les aspects économiques

Les aspects économiques sont le point délicat de l'étude comme le reconnaissent ses auteurs. On en a extrait les estimations prospectives concernant les technologies diesel, GPL et GNV et on les présente à titre indicatif sachant que les incertitudes sont grandes voire très grandes (cas des technologies futuristes).

On se limite par ailleurs à deux éléments : le coût du véhicule et le coût de la tonne de gaz à effet de serre évitée (exprimée en équivalent CO₂) pour chaque technologie par rapport à la situation actuelle prolongée, sachant que l'étude ne concerne que les voitures particulières.

10.2.4.1 Les coûts des véhicules

A l'horizon 2010 et au-delà les auteurs de l'étude ont estimé les surcoûts des technologies par rapport à un véhicule de base. Ce dernier est une voiture particulière à essence à injection indirecte estimée à 19 560 € à cet horizon.

Pour les technologies qui nous concernent les surcoûts sont indiqués dans le tableau 10.5 et sur la figure 10.10. Par ailleurs dans le tableau 10.5 on a mentionné les marges d'incertitudes estimées par les auteurs de l'étude JRC-CONCAWE-EUCAR. On constate que pour les véhicules futuristes hybrides l'incertitude sur les surcoûts est de +50%.

Tableau 10.5 Surcoûts des véhicules par rapport au véhicule de base.

Véhicule de base : voiture particulière à essence à injection indirecte estimée à 19.560 €.

Horizon 2010 et au-delà.

Technologie	Surcoût (€)	Incertitude	
		En moins	En plus
Diesel sans FAP	1 400	5%	5%
Diesel avec FAP	1 800	5%	5%
GNV bi-carburant	2 538	5%	5%
GNV dédié	1 953	5%	5%
GPL bi-carburant	2 200	5%	5%
Diesel hybride sans FAP	7 630	0%	50%
Diesel hybride avec FAP	8 030	0%	50%
GNV hybride	7 373	0%	50%

FAP : Filtre à Particules

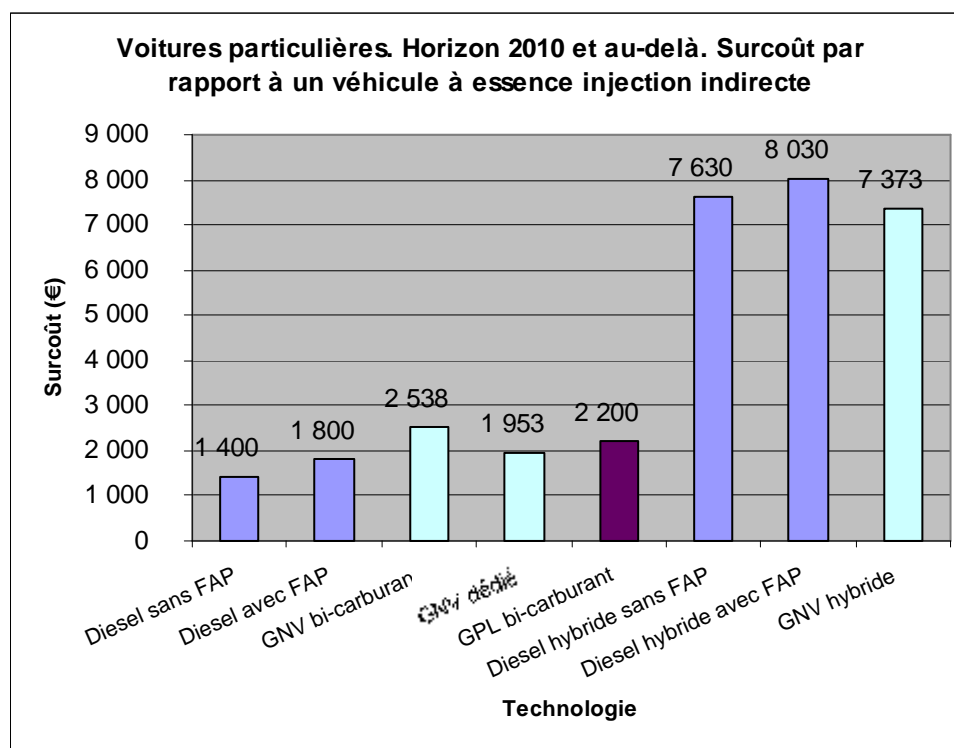
GNV : Gaz Naturel Véhicules

GNV dédié : le GNV est le seul carburant utilisable

Figure 10.10 Surcoûts des véhicules par rapport au véhicule de base.

Véhicule de base : voiture particulière à essence à injection indirecte estimée à 19.560 €.

Horizon 2010 et au-delà.



Ces résultats sur les coûts des véhicules ne permettent pas de départager le diesel du GNV. Compte tenu des incertitudes ils se situent au même niveau ; tout ce que l'on peut dire est que le surcoût (par rapport au véhicule de base) est de 3 à 4 fois plus élevé dans la version hybride de chaque technologie que dans la version non hybride.

Sachant que le coût estimé du véhicule de base est de 19 560 €, les véhicules non hybrides atteignent un coût de l'ordre de 21 500 € et les véhicules hybrides de 27 000 à 31 000 € (soit de 25 à 45% plus chers).

10.2.4.2 Les coûts unitaires des gaz à effet de serre évités

Afin d'évaluer l'impact des diverses technologies l'étude a supposé que chacune d'elle était introduite (séparément) de manière à représenter 5% du kilométrage total des voitures particulières à l'horizon 2015 (les kilométrages poids lourds ont été éliminés) Seuls les coûts directs ont été pris en compte (pas les coûts ou bénéfices indirects comme l'impact sur l'emploi ou sur le développement rural).

Pour chaque technologie introduite (au niveau de 5% des kilométrages) les auteurs ont estimé, par rapport à la technologie classique qu'elle remplace (gazole pur, essence), d'une part les quantités de gaz à effet de serre évités (exprimées en équivalent CO₂), d'autre part le surcoût. Ils en ont déduit un coût de la tonne de CO₂ équivalent évitée.

Les auteurs ont testé deux valeurs futures du prix du baril de pétrole : 25 et 50 € (30 et 60\$ au moment de l'étude). On ne présente que les résultats du scénario 50 € (à la fois le plus vraisemblable et le plus favorable aux technologies nouvelles).

Par ailleurs, en ce qui concerne les bio-diesels agricoles (EMC, EEC, EMT), on a retenu une des deux hypothèses de l'étude : celle selon laquelle la glycérine extraite du processus de fabrication serait utilisée dans l'alimentation animale³⁹.

Les valeurs retenues font l'objet du tableau 10.6 et de la figure 10.11.

D'après ces résultats, toutes les options dépassent la valeur tutélaire française issue du « rapport Boiteux » (juin 2001) égale à 100 € la tonne de carbone, soit 27,3 € la tonne de CO₂⁴⁰. On rappelle que la valeur de la tonne de CO₂ sur le marché des permis d'émissions a oscillé entre 20 et 30 € depuis son lancement en janvier 2005 jusqu'à avril 2006 avant de s'effondrer ; aujourd'hui (en 2007) la valeur de la tonne de CO₂ est comprise entre 1 et 2 €.

Les opérations les plus intéressantes sont l'introduction des bio-diesels (première génération) et des gazoles de synthèse à partir du bois (deuxième génération) : coût de la tonne de CO₂ évitée allant de 32 à 188 €. Le procédé de gazéification BL (« Black liquor ») est le plus performant : 51 € pour la synthèse du gazole ex-bois et 32 € pour le di-méthyl-éther.

A l'inverse, les versions non hybrides GPL et GNV ne sont pas intéressantes selon le critère de coût à la tonne de CO₂ évitée : de 305 à 684 €. Les versions hybrides GNV et diesel sont encore plus chères : respectivement 508 et 1062 €.

³⁹ L'autre hypothèse (utilisation chimique) donne des résultats légèrement inférieurs (de 5 à 8%)

⁴⁰ Car 1 tonne Carbone équivaut à 3,67 tonnes de CO₂.

Tableau 10.6 Coût unitaire des gaz à effet de serre évités (en € par tonne de CO₂ équivalent évitée). Horizon 2010 et au-delà. Prix du baril de pétrole : 50 €

Technologie	Coût du CO ₂ évité (€/t CO ₂ équiv.)
GNV bi-carburant	444
GNV dédié	305
GPL bi-carburant	684
Diesel hybride	1062
GNV hybride	508
Biogaz bi-carburant	104
Bio-diesel EMC	152
Bio-diesel EEC	141
Bio-diesel EMT	107
Gazole de synthèse ex-bois	188
Gazole de synthèse ex-bois via BL	51
DME ex-bois	162
DME ex-bois via BL	32

GNV : Gaz Naturel Véhicules

GNV dédié : le GNV est le seul carburant utilisable

EMC : Ester Méthylique de Colza

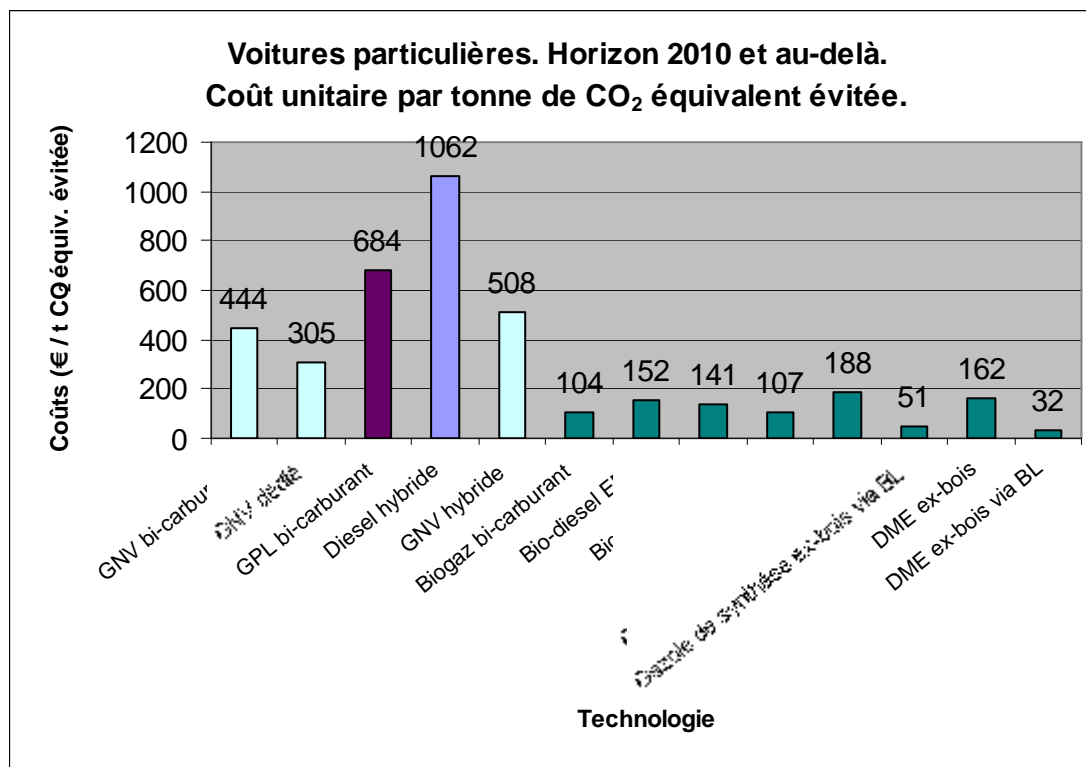
EEC : Ester Etylique de Colza

EMT : Ester Méthylique de Tournesol

BL : "Black Liquor" (procédé de fabrication)

DME : Di-Méthyl-Ether

Figure 10.11 Coût unitaire des gaz à effet de serre évités (en € par tonne de CO₂ équivalent évitée). Horizon 2010 et au-delà. Prix du baril de pétrole : 50 €



10.3 CONCLUSION

On rappelle que les études AFGNV et JRC-CONCAWE-EUCAR ne concernent que les véhicules particuliers.

Le rapport de l'AFGNV conclut sur l'avantage potentiel du GNV sur le gazole pour les émissions de gaz à effet de serre (de l'ordre de 15% en moins à l'horizon 2020). Mais cette étude est incomplète : du point de vue du gazole, elle a omis de prendre en compte le véhicule diesel hybride (alors que le véhicule GNV hybride est envisagé) ainsi que les biodiesels et les gazoles de synthèse à partir de la biomasse (bois notamment).

Ces éléments ont été examinés dans l'étude européenne JRC-CONCAWE-EUCAR, beaucoup plus complète et documentée. Hors prise en compte des biocarburants la comparaison du diesel et du GNV aboutit plutôt à l'avantage du GNV : à l'horizon 2010 le diesel est moins consommateur d'énergie (-25%) du puits à la roue mais émet 13% de plus de gaz à effet de serre. Pour les versions hybrides (2010 et au-delà) le GNV aboutit à une consommation d'énergie équivalente au diesel et émet 20% de gaz à effet de serre en moins. La pile à combustible avec « reformeur »⁴¹ dégrade le bilan du diesel.

En revanche si on tient compte des biocarburants de première génération et des carburants de synthèse à partir de la biomasse, le bilan gaz à effet de serre du diesel s'améliore : ses émissions du puits à la roue baissent en proportion du taux d'introduction de ces carburants alternatifs. A partir d'un taux d'incorporation variable selon le carburant alternatif retenu, la comparaison pour les émissions de gaz à effet de serre s'inverse. On note que le remplacement du gazole par ces carburants alternatifs permet d'économiser de l'énergie fossile en cycle de vie (du puits à la roue) et par suite de réduire d'autant les émissions de gaz à effet de serre, mais au prix d'une consommation totale d'énergie plus élevée ; l'avantage est que la majorité de cette énergie provient de la biomasse, énergie renouvelable ayant un bien meilleur bilan gaz à effet de serre (CO₂) que le gazole, énergie fossile non renouvelable. Par exemple le remplacement du gazole par de l'Ester Méthylique de Colza permet de diviser par 2,7 la consommation kilométrique d'énergie fossile et diviser par 2 les émissions de gaz à effet de serre au prix d'une multiplication par 1,9 de la consommation totale d'énergie (calculs effectués du puits à la roue)

L'étude JRC-CONCAWE-EUCAR a également estimé les coûts économiques des diverses technologies en mettant bien en garde le lecteur sur la très grande difficulté de l'exercice et sur les incertitudes d'autant plus importantes que la technologie étudiée est futuriste (Par exemple incertitude de +50% pour l'estimation du surcoût des véhicules hybrides par rapport au véhicule de base retenu : une voiture particulière à essence à injection indirecte, estimée à 19 560 € à l'horizon d'étude : 2010 et au-delà).

Sous ces réserves il n'est pas possible de conclure entre le diesel et le GNV sur le coût des véhicules qui s'avèrent du même ordre de grandeur que ce soit en version non hybride ou hybride. Les véhicules non hybrides atteignent un coût de l'ordre de 21 500 € et les véhicules hybrides de 27 000 à 31 000 € (soit de 25 à 45% plus chers).

⁴¹ Reformeur : équipement embarqué permettant d'extraire à la demande l'hydrogène à partir d'un composé organique. Ce dernier est généralement du méthanol (CH₃OH) mais peut aussi être de l'éthanol (C₂H₅OH), du gaz naturel, de l'essence, etc

Afin d'évaluer l'impact des diverses technologies les auteurs ont supposé que chacune d'elle était introduite (séparément) de manière à représenter 5% du kilométrage total des voitures particulières à l'horizon 2015 (les kilométrages poids lourds ont été éliminés) Seuls les coûts directs ont été pris en compte (pas les coûts ou bénéfices indirects comme l'impact sur l'emploi ou sur le développement rural).

Pour chaque technologie introduite (au niveau de 5% des kilométrages) les auteurs ont estimé, par rapport à la technologie classique qu'elle remplace (gazole pur, essence), d'une part les quantités de gaz à effet de serre évités (exprimées en équivalent CO₂), d'autre part le surcoût. Ils en ont déduit un coût de la tonne de CO₂ équivalent évité.

On a retenu les résultats du scénario correspondant à un prix futur du baril de 50 €, à la fois le plus vraisemblable et le plus favorable aux technologies nouvelles.

D'après ces résultats toutes les options dépassent la valeur tutélaire française issue du « rapport Boiteux » (juin 2001) égale à 100 € la tonne de carbone, soit 27,3 € la tonne de CO₂⁴² alors que la valeur de la tonne de CO₂ sur le marché des permis d'émissions est actuellement (mi-2007) à son plus bas niveau (autour de 1 €) après avoir oscillé entre 20 et 30€ à ses débuts.

Les opérations les plus intéressantes sont l'introduction des bio-diesels (première génération) et des gazoles de synthèse à partir du bois (deuxième génération) tandis que les versions non hybrides GPL et GNV ne sont pas intéressantes selon le critère de coût à la tonne de CO₂ évitée et que les versions hybrides GNV et diesel sont encore plus chères.

⁴² Car 1 tonne Carbone équivaut à 3,67 tonnes de CO₂.

11 LES TECHNOLOGIES POTENTIELLES DU FUTUR A MOYEN ET LONG TERME : LE BUS ELECTRIQUE ET LE BUS HYBRIDE⁴³.

Ces deux technologies sont traitées à part pour les raisons suivantes :

- le bus électrique est actuellement très marginal en Ile-de-France (les 12 véhicules de la ligne RATP Montmartrobus) car cette technologie ne peut être à ce jour utilisée que dans certaines conditions (notamment sur de courtes lignes),
- le bus hybride (électricité/carburant fossile) y est inexistant.

Pour le futur à moyen terme ce sont des technologies potentielles à condition qu'elles améliorent à la fois leur efficacité technique et leur coût.

Dans ce qui suit on fait le point sur ces technologies et on examine leur potentiel d'évolution.

On ne traite pas ici du bus électrique dont l'énergie est produite par la pile à combustible⁴⁴ car sa production de masse n'est pas envisageable à moyen terme compte tenu de nos connaissances actuelles. Cette technologie bus est toujours en phase de recherche-démonstration : les problèmes techniques sont loin d'être résolus et les coûts sont prohibitifs.

11.1 LE BUS ELECTRIQUE

11.1.1 Pourquoi le véhicule électrique pur n'a pas obtenu le succès espéré

Le véhicule électrique possède de nombreux avantages :

- il est fiable, silencieux, agréable à conduire (pas d'embrayage)
- son rendement (85% ou plus) est très supérieur à celui du moteur thermique (25-30%)
- son couple moteur est plus important que celui du moteur thermique au démarrage et est régulier sur toute la gamme de vitesse
- son entretien est facile et peu coûteux (pas de vidange, ni bougies, ni filtre à air, ni embrayage)
- il est économe en fonctionnement (électricité moins chère au kilomètre qu'un carburant fossile)
- en circulation il n'émet ni polluant atmosphérique ni gaz à effet de serre

Cependant son développement est actuellement fortement contrecarré par un handicap majeur lié au système de stockage de l'énergie à bord sous forme de batteries : leur capacité de stockage étant faible celles-ci sont volumineuses, lourdes et chères.

En effet les meilleures batteries actuelles (technologie « Lithium-ion ») ne concentrent que 300 Wh/l (150 Wh/kg) à comparer aux 9 800 Wh/l (11 670 Wh/kg) du gazole soit 30 fois moins en volume (78 fois moins en poids).

⁴³ L'essentiel des informations provient des documents « Les bus propres en France. Les bus électriques » ADEME, EDF, CERTU (octobre 2004) et « Les technologies des moteurs de véhicules lourds et leurs carburants. Tome 1 » Gabriel PLASSAT (ADEME, janvier 2005).

⁴⁴ Une pile à combustible est un générateur (pile) qui convertit directement et en continu l'énergie d'un combustible en électricité par réactions électrochimiques. Le système le plus simple (dans son principe) est de produire l'électricité à partir de l'hydrogène et de l'oxygène de l'air (réaction inverse de l'électrolyse de l'eau).

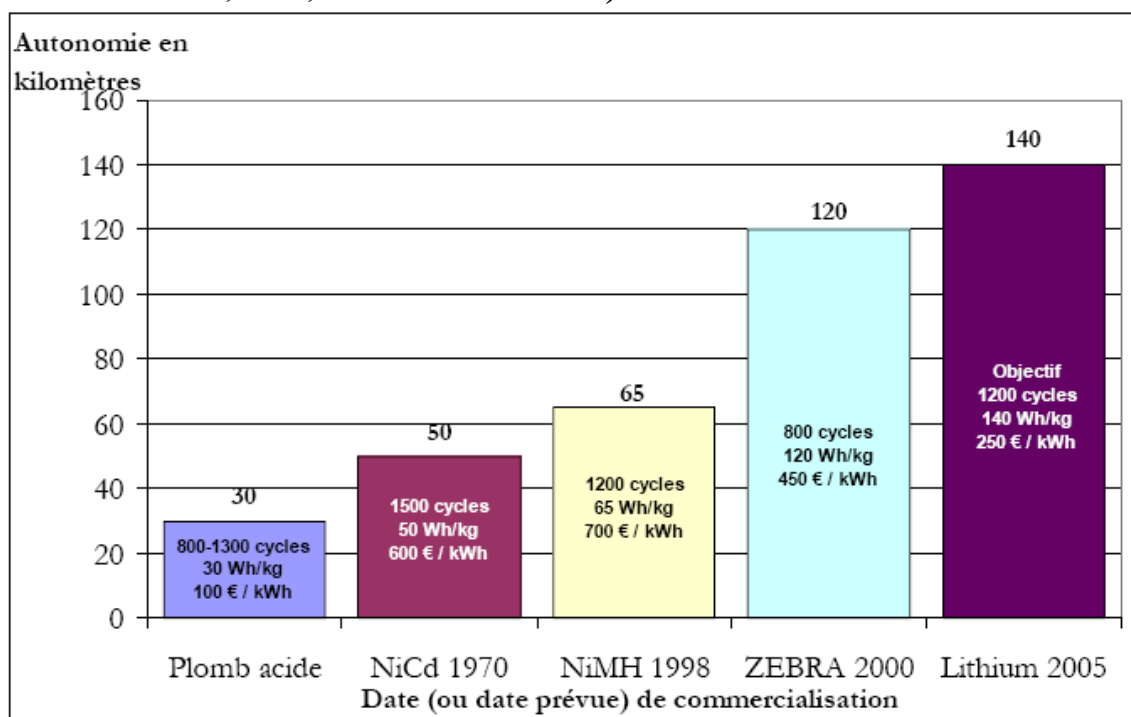
Au final pour faire 100 km avec une automobile de gamme moyenne diesel il faut 6 litres de gazole (5 kg) ou 60 litres de batterie (120 kg), soit un rapport en poids de 1 à 24 malgré un rendement énergétique trois fois supérieur du moteur électrique.

Pour le client ceci se traduit par un coût d'achat plus élevé et une autonomie réduite (de 75 à 140 km pour un bus urbain, selon le type de batteries utilisées et le relief de la ligne). En outre le temps de recharge est important (quelques heures par jour) et la durée de vie des batteries est seulement de quelques années. C'est pourquoi, malgré les aides financières publiques, la voiture électrique s'est peu développée en France.

C'est également pourquoi, à la fois pour des raisons pratiques et économiques, les bus électriques existants sont des véhicules à gabarit réduit opérant sur des lignes courtes (par exemple desserte centre-ville en Province, desserte de Montmartre à Paris). Lorsque la recharge normale seule (la nuit ; durée huit heures) ne suffit pas on a également recours à des recharges rapides pendant le service (par exemple aux terminus), communément appelées « biberonnages ». On peut même prévoir l'échange de batteries en service si cela ne perturbe pas l'exploitation.

La figure 11.1 synthétise l'évolution des technologies batteries électriques pour véhicules jusqu'à ce jour. L'autonomie indiquée sur cette figure est celle d'un véhicule dans lequel la batterie représente 20% du poids total à vide.

Figure 11.1 Evolution passée des technologies de batteries électriques pour véhicules.
(Source : ADEME, EDF, CERTU octobre 2004)



NiCd : batterie nickel cadmium

NiMH : batterie nickel métal hydrure

ZEBRA : batterie sodium soufre

Lithium : batterie lithium métal polymère

Aujourd'hui les meilleures batteries sont les « lithium ion ». Cependant elles ne sont économiquement intéressantes que pour les applications d'équipements individuels portables (téléphones mobiles, appareils photos, ordinateurs portables, ...).

Pour les véhicules lourds, on s'oriente actuellement vers la batterie « lithium métal polymère » (LMP) mise au point par EDF en partenariat avec Bolloré SA. C'est la batterie prévue sur le futur véhicule électrique « BlueCar » conçu par Bolloré SA.

A la différence de la batterie « lithium ion » où l'anode est composée d'un oxyde métallique contenant des ions lithium, la LMP possède une anode en lithium métal⁴⁵. Par ailleurs l'électrolyte est un composé polymère solide⁴⁶. Le lithium étant un métal léger (densité : 0.5) la LMP possède une énergie spécifique (densité d'énergie massique) légèrement supérieure à la batterie « lithium ion » (170 Wh/kg contre 150)⁴⁷ tout en évitant les inconvénients de l'électrolyte liquide. Son principal handicap est la contrainte de sa température de fonctionnement : entre 80 et 100°C.

Pour les bus on peut également coupler des batteries classiques et des super-capacités. Ces dernières sont décrites dans le § 11.2.2.2 à propos du bus hybride.

11.1.2 Les bus électriques du Montmartrobus

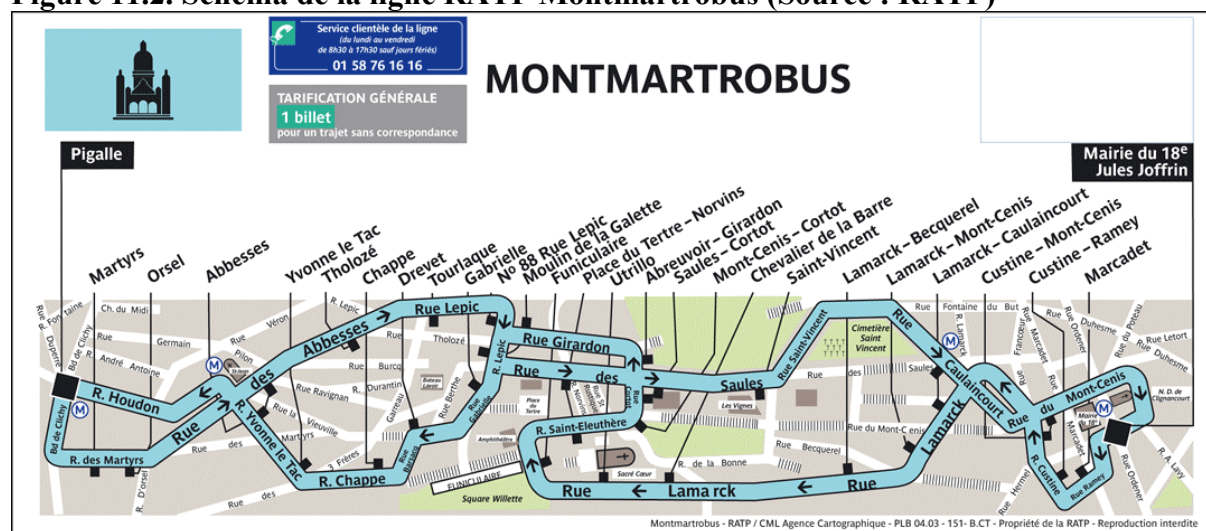
11.1.2.1 Présentation générale

Le « Montmartrobus est une ligne de desserte interne de la Butte de Montmartre dont les terminus sont « Pigalle » et « Mairie du XVIII^e » (Voir figure 11.2)

Sa longueur est de 3 kilomètres ; elle comporte 33 points d'arrêts (y compris les terminus et en tenant compte des arrêts différents sur les trajets allers et retours).

Le service opère tous les jours (y compris dimanches et fêtes) de 7h30 à 19h55. La fréquence de passage des bus varie entre 10 et 15 minutes (13 et 15 minutes les dimanches et fêtes). La vitesse commerciale est de 11,5 km/h.

Figure 11.2. Schéma de la ligne RATP Montmartrobus (Source : RATP)



Actuellement 12 bus électriques « OREOS 55 » (Constructeur PVI Division GEPEBUS) sont affectés à la ligne. Ce sont des bus surbaissés de petite taille (midibus) : longueur de 7,71 mètres, largeur hors tout de 2,22 mètres (Voir figure 11.3)

⁴⁵ La cathode est un composé d'oxyde de vanadium, de carbone et de polymère.

⁴⁶ Polyéthylène et sels de lithium

⁴⁷ Bertrand THEYS « Les batteries pour le stockage de l'électricité dans les véhicules tout électriques ou hybrides. Etat des lieux. » PREDIT février 2006.

Figure 11.3. Le bus électrique OREOS 55 (Source : RATP)



11.1.2.2 Caractéristiques des batteries de traction⁴⁸

Les batteries de traction sont de type Ni-Cd (Nickel-cadmium) ; elles se composent de 87 blocs de 6 volts et 140 Ah⁴⁹. Montés en série, ils assurent une tension de traction de 522 volts. Leur poids total est de 1.400 kg soit 15% du poids à vide du véhicule.

Le chargeur embarqué permet une charge lente la nuit (puissance maximum de 35 kW) et une charge rapide au terminus (puissance maximum de 120 kW)

11.1.2.3 Performances

La capacité maximale est de 52 passagers (13 assis et 39 debout). Le poids à vide est de 9,35 tonnes ; le P.T.A.C⁵⁰ est de 13 tonnes.

Le moteur électrique possède une puissance maximale de 120 kW (à un régime de 2.500 tours/minute) et un couple maximum de 500 N.m (newton.mètres) à un régime de 200 tours/minute.

La vitesse maximale est de 50 km/h ; la pente maximale gravie 19% (donnée constructeur)

Chaque véhicule effectue environ 70 km par jour. Compte tenu des fortes pentes du circuit, l'autonomie après une charge nocturne des batteries est inférieure à cette distance et il est nécessaire d'effectuer une charge rapide de 5 à 6 minutes aux terminus pour permettre une exploitation sur toute l'amplitude du service.

11.1.2.4 Données économiques

Il n'a pas été possible d'obtenir des données économiques auprès de la RATP.

Les véhicules « OREOS 55 » ne sont plus commercialisés depuis 2005.

D'après le constructeur (PVI Division GEPEBUS) les prix de base valeur 2003 étaient :

⁴⁸ Le bus électrique « OREOS 55 » possède également deux batteries au plomb de 12 V (volts) destinées aux servitudes (éclairage, signalisation, assistance de direction, ventilation forcée, compresseur d'air)

⁴⁹ Ah : ampère-heure. Cette unité correspond à la quantité d'électricité transportée en une heure par un courant de un ampère. L'énergie correspondante dépend de la tension sous laquelle peut être délivrée l'électricité. Pour une tension de 6 V (volts), un ampère-heure représente 21,6 kJ (6 Wh)

⁵⁰ P.T.A.C : poids total autorisé en charge.

- coût du véhicule hors batteries : 340 000 € HT,
- coût des batteries : 40 000 à 45 000 € HT, soit 12 à 13% du prix du véhicule (durée de vie : 3 ans).

Le coût du véhicule « OREOS 55 » était de l'ordre de 2,5 fois celui de son équivalent diesel. La société PVI Division GEPEBUS devrait commercialiser en 2008 un nouveau véhicule électrique nettement moins coûteux : l'« OREOS 40 ».

Ce véhicule sera de plus faible capacité (40 passagers : 17 assis, 23 debout) et sa source d'énergie électrique proviendra d'un couplage batteries au plomb/super-capacités. Il sera adaptable aux évolutions des technologies de batteries. Son autonomie serait de 100 km en terrain non accidenté. Il devrait être commercialisé au prix d'environ 180 000 € HT, batteries comprises soit un surcoût de l'ordre de 20% par rapport à son équivalent diesel.

11.1.3 Le bilan du bus électrique.

Le tableau 11.1 ci-dessous synthétise les conclusions du rapport ADEME-EDF-CERTU « Les bus propres en France. Les bus électriques » (octobre 2004).

On rappelle que ce sont les limites, liées au stockage de l'énergie à bord par des batteries, qui restreignent le développement du bus électrique.

Tableau 11.1 Les limites et les avantages du bus électrique actuel.
(Source : ADEME, EDF, CERTU octobre 2004)

Les limites	Les avantages		
	pour l'exploitant	pour le chauffeur	pour la société
1- Autonomie restreinte 2- Longue recharge des batteries (à faire la nuit) 3- Coût d'investissement plus élevé que le bus diesel	1-Economie sur le coût du carburant 2- Equipements de recharge peu onéreux 3- Faibles coûts de fonctionnement (prix de revient kilométrique se rapprochant du bus diesel en tenant compte de l'amortissement) 4- Pas d'équipements de dépollution et de silencieux d'échappement 5- Améliore l'image environnementale du bus (pollution, bruit, effet de serre)	1- Agrément de conduite 2- Manœuvre simple, propre et quasi instantanée pour la recharge 3- Il participe au bien-être des usagers et à l'amélioration de l'environnement urbain.	1- Pas d'émissions de gaz polluants et à effet de serre. 2- Moteur quasiment silencieux et ne fonctionnant pas à l'arrêt

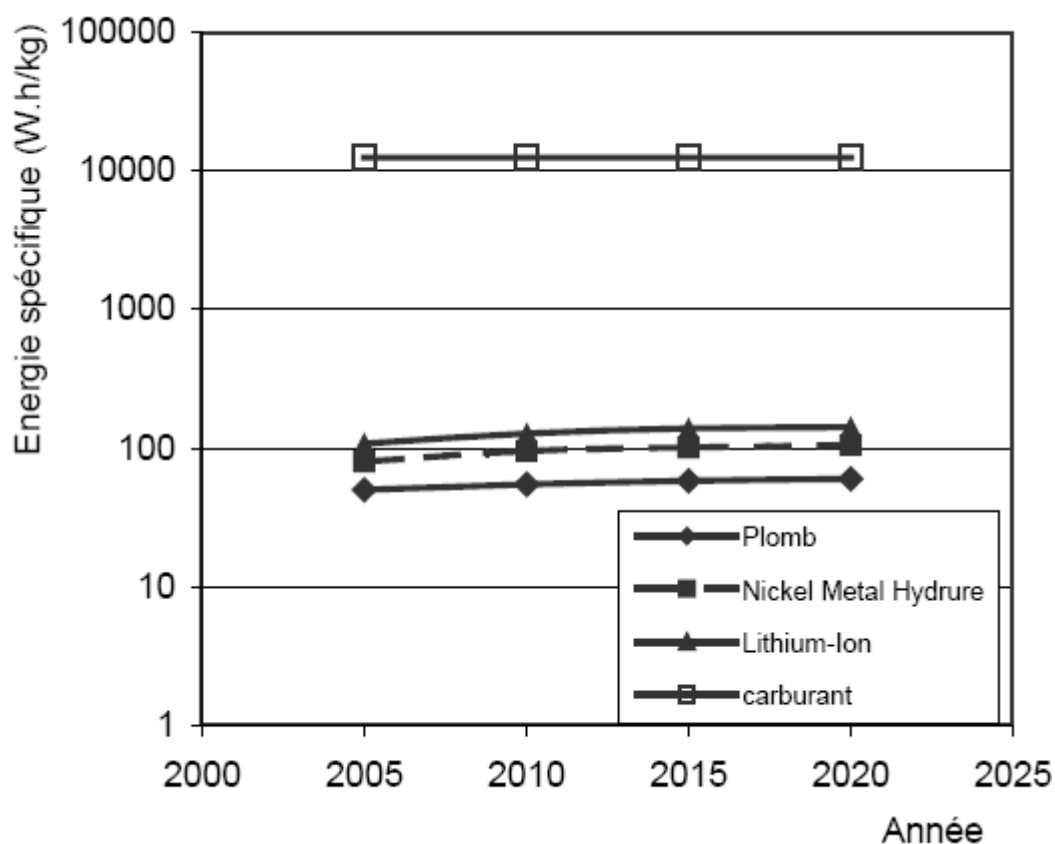
11.1.4 Quelles sont les perspectives futures en l'état actuel des connaissances ?

La figure 11.4 issue d'un document prospectif de l'IFP⁵¹ montre l'évolution prévisible de l'énergie spécifique (en Wh/kg) des batteries électriques pour véhicules jusqu'à l'horizon 2020 en l'état des connaissances actuelles.

Sur cette figure est également représentée l'énergie spécifique d'un carburant fossile classique (essence, gazole).

Figure 11.4 Evolution prévisible de l'énergie spécifique des batteries électriques pour véhicules. Comparaison avec un carburant fossile classique (essence, gazole)

(Source : Philippe PINCHON, IFP 2004)



Attention ! L'échelle des ordonnées est logarithmique : la longueur graphique correspond au logarithme décimal de la valeur représentée.

Manifestement, en l'absence d'une rupture technologique non encore prévisible, l'énergie spécifique des futures batteries restera très largement inférieure à celle des carburants fossiles actuels (d'un facteur au moins égal à 50). Même si on tient compte du fait que le moteur électrique a un rendement trois fois meilleur que celui du moteur thermique en termes d'autonomie, le rapport restera de l'ordre de 15 en faveur du moteur thermique.

⁵¹ « Futures évolutions des motorisations dans l'automobile » (Philippe PINCHON, IFP 6 mai 2004)

Par suite les handicaps d'autonomie et de poids liés au stockage à bord de l'énergie électrique dans des batteries demeurent. Le développement massif du bus électrique semble peu probable à moyen terme (15 ans) sauf à trouver un système de stockage à bord de l'énergie électrique beaucoup plus performant que les batteries électriques actuelles à un coût compétitif avec la filière diesel.

D'où l'idée de développer une technologie intermédiaire : le bus hybride que l'on examine dans le § 11.2 suivant.

11.2 LE BUS HYBRIDE

11.2.1 Le concept de bus hybride.

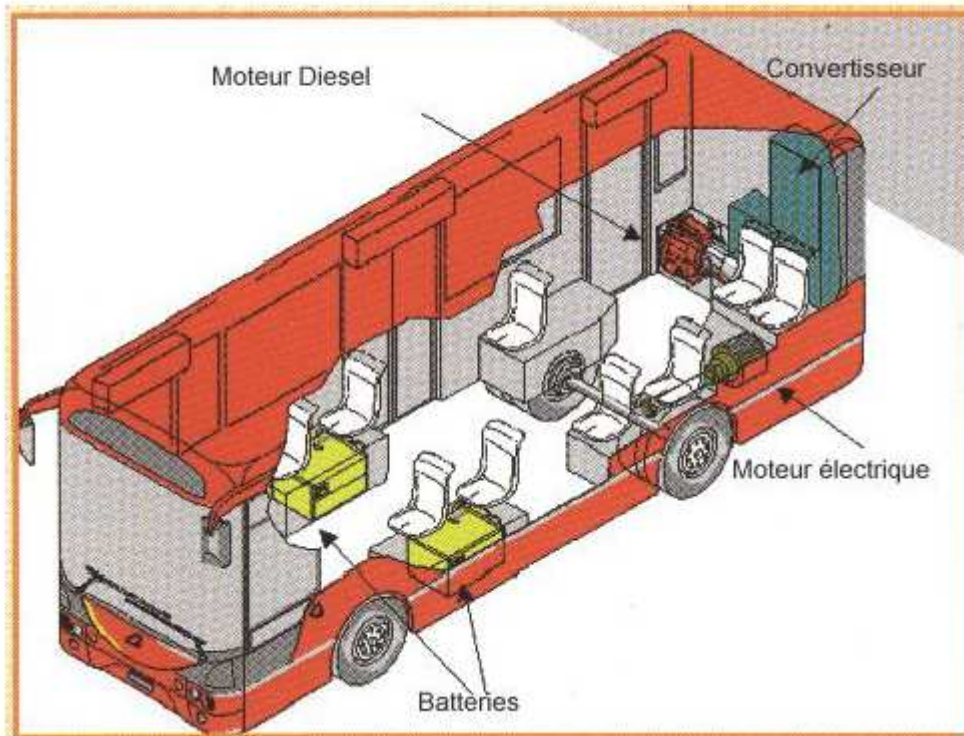
A l'instar du véhicule particulier (par exemple la TOYOTA Prius) le bus hybride associe un moteur électrique et un moteur thermique dans le but de combiner les avantages de chacun d'eux. Le stockage de l'énergie à bord est également double : une batterie pour l'énergie électrique et un réservoir de carburant pour l'énergie thermique. Cependant, les bus hybrides existants ne sont alimentés que par le gazole, la batterie n'étant pas rechargeable à partir d'une source extérieure au véhicule : c'est donc un véhicule à moteur thermique dont le rendement est amélioré par le biais du moteur électrique.

Le grand avantage du véhicule hybride réside dans son usage en urbain où les ralentissements, arrêts et re-démarrage sont fréquents car il est possible de récupérer une partie de l'énergie de freinage pour recharger la batterie électrique. Or le bus de transports en commun urbain est amené, de par son type d'exploitation, à s'arrêter et re-démarrer souvent, même quand la circulation est fluide : c'est un cas quasi idéal pour la motorisation hybride. Théoriquement on pourrait espérer un gain de consommation de carburant de 15 à 25%.

Bien entendu le moteur thermique peut être équipé de tous les systèmes de dépollution existants (filtre à particules, DeNO_x pour le gazole), utiliser du biocarburant, fonctionner au gaz, etc.

La figure 11.5 montre un exemple d'équipements de bus hybride.

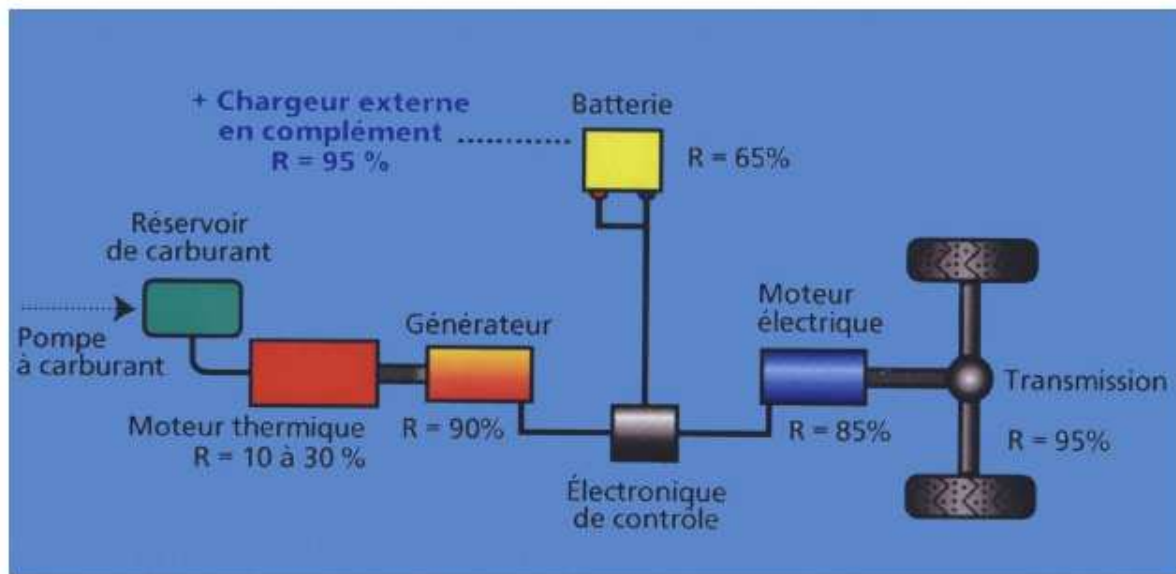
Figure 11.5 Vue éclatée d'un bus hybride avec ses composants.
(Source : ADEME, EDF, CERTU octobre 2004)



Il existe deux types d'architecture d'hybridation : la traction hybride série et la traction hybride parallèle.

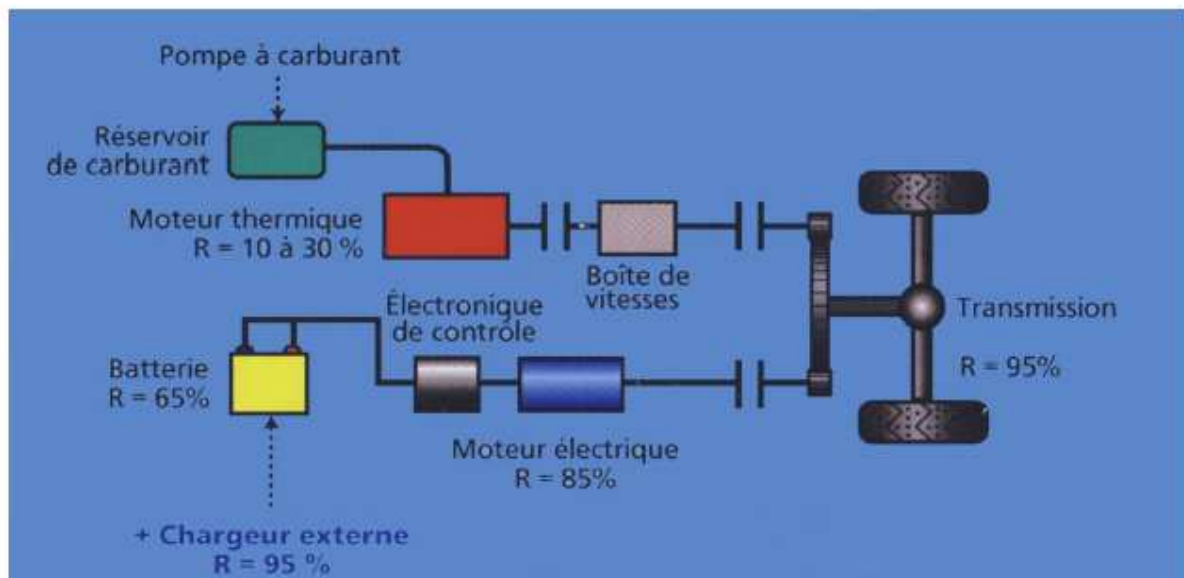
La traction hybride série (Figure 11.6) se rapproche du véhicule électrique : un moteur thermique entraîne un générateur électrique fournissant l'électricité à un moteur électrique. L'électricité produite peut également être stockée dans une batterie et le moteur électrique peut être directement alimenté par la batterie.

Figure 11.6 Traction hybride série. Schéma de principe.
 (Source : ADEME, EDF, CERTU octobre 2004)



La traction hybride parallèle (Figure 11.7) se rapproche du véhicule thermique : le moteur thermique assure la traction du véhicule avec un apport de couple supplémentaire (si nécessaire) par le moteur électrique. Le moteur électrique peut également fonctionner seul.

Figure 11.7 Traction hybride parallèle. Schéma de principe.
 (Source : ADEME, EDF, CERTU octobre 2004)



Le choix entre traction hybride série ou parallèle dépend des conditions d'utilisation dominantes du véhicule.

Afin de regrouper les avantages des deux types on peut, à l'instar de Toyota pour ses modèles récents, concevoir un type mixte avec deux moteurs électriques (l'un en mode série, l'autre en mode parallèle). Ceci nécessite une transmission nouvelle (train épicycloïdal) mise au point par Toyota pour permettre aux trois moteurs d'additionner leurs couples sans imposer un rapport fixe entre leurs régimes.

11.2.2 Les technologies de stockage à bord de l'énergie électrique pour l'hybridation.

Outre la batterie électrique, les technologies de stockage possibles sur des bus hybrides sont : le super-condensateur, le volant d'inertie et l'accumulateur hydraulique.

11.2.2.1 La batterie

Bien entendu le bus hybride utilise les batteries décrites précédemment à propos du bus électrique pur.

Cependant les spécifications des batteries pour bus hybrides sont différentes de celles pour bus électriques. En particulier elles doivent posséder de très bonnes performances de puissance tant en décharge (fourniture rapide de puissance à l'accélération) qu'en charge (récupération rapide de puissance au freinage). Ces performances sont recherchées dans le super-condensateur décrit ci-après.

11.2.2.2 Le super-condensateur (ou sur-capacité)

le super-condensateur est un condensateur particulier permettant d'obtenir une puissance spécifique (W/kg) et une énergie spécifiques (Wh/kg) intermédiaires entre les batteries et les condensateurs classiques.

Alors que le condensateur classique est composé de deux feuilles conductrices (électrodes) séparées par un isolant (le diélectrique), le super-condensateur se rapproche de la technologie batterie en utilisant des électrodes spéciales et un électrolyte. Mais à la différence des batteries il n'y a pas de réaction chimique d'oxydo-réduction⁵².

Son principe est voisin de celui du condensateur classique mais l'isolant est remplacé par un électrolyte conducteur ionique (figure 11.8). Les électrodes ont une très grande surface spécifique⁵³ de sorte que l'on obtient une capacité de stockage (énergie spécifique) supérieure à celle d'un condensateur classique.

Le tableau 11.2 compare les caractéristiques du super-condensateur et de la batterie.

On constate que les avantages du super-condensateur par rapport à la batterie sont : sa puissance spécifique, sa durée de vie et ses durées de charge et décharge. En revanche la batterie a une bien meilleure énergie spécifique.

Dans les transports ces deux équipements sont complémentaires : la batterie est un réservoir d'énergie tandis que le super-condensateur est un réservoir de puissance mieux adapté qu'elle à la récupération de l'énergie de freinage.

Nissan diesel fut le premier constructeur à commercialiser un poids lourd hybride parallèle doté de super-condensateurs.

⁵² Transfert d'électrons entre deux réactifs.

⁵³ Grains de carbone percolants ou polymères conducteurs micro-fibreux permettant d'atteindre 1200m² de surface spécifique par gramme.

Figure 11.8 Coupe schématique et vue de super-condensateurs
(Source : ECRIN 2004)

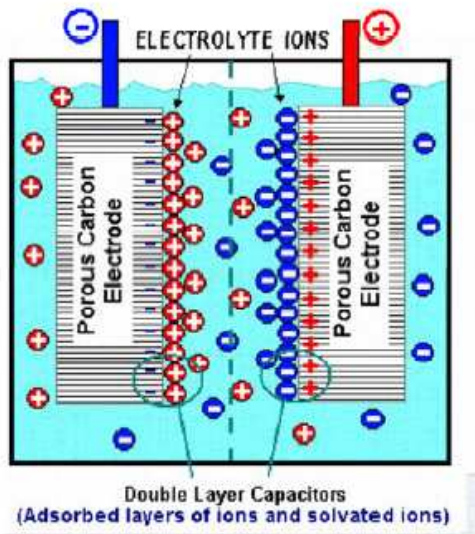


Tableau 11.2 Comparaison des caractéristiques du super-condensateur et de la batterie électrique.
(Source : Gabriel PLASSAT, ADEME 2005)

Caractéristiques	Supercondensateur	Batterie
Énergie spécifique (Wh/kg)	1 à 10	20 à 100
Puissance spécifique (kW/kg)	0,5 à 10	0,05 à 0,2
Durée de vie (cycles)	> 100 000	500 à 2000
Durée de décharge nominale	1 à 30 sec	0,3 à 3 heures
Durée de charge nominale	1 à 30 sec	1 à 5 heures

Source Etat de l'art sur les supercondensateurs, INRETS/VALEO

11.2.2.3 Le volant d'inertie.

Dans le volant d'inertie l'énergie est stockée sous forme d'énergie cinétique sur une masse lourde en rotation. Il est couplé à un convertisseur électromagnétique permettant la transformation d'énergie cinétique en énergie mécanique (et réciproquement).

Des bus urbains ont fonctionné avec un volant d'inertie (disposé à plat sous le plancher) il y a plusieurs décennies. Le volant d'inertie fut abandonné sur les bus à cause de ses inconvénients : taille, poids, complexité d'utilisation, déséquilibre du bus, coût.

Actuellement il est testé sur le tramway moderne (par exemple le Citadis ALSTOM de Rotterdam, figure 11.9).

Il y a peu d'application sur les bus hybrides ; des recherches sont en cours principalement aux Etats-Unis.

Figure 11.9 Volant d'inertie du tramway Citadis ALSTOM de Rotterdam
(Source : ALSTOM)



11.2.2.4 L'accumulateur hydraulique.

Cet appareil permet de stocker de l'énergie sous forme de gaz comprimé (air ou autre gaz). Quand le véhicule ralentit une pompe comprime le gaz dans un réservoir (jusqu'à 300 bars) via un compresseur électrique. Ce dernier peut se transformer en générateur pour fournir de l'électricité à partir de l'énergie de détente du gaz.

L'accumulateur stocke surtout de la puissance et peu d'énergie (énergie spécifique faible). A cause de ses inconvénients (poids, durée de vie limitée du réservoir, sécurité, temps de réponse, ...) il n'équipe que quelques véhicules dans le Monde, principalement aux Etats-Unis où des recherches sont en cours.

11.3 L'ÉVALUATION DES BUS HYBRIDES DE NEW-YORK

Le bus hybride n'a pas encore percé en Europe. En revanche aux Etats-Unis il connaît un certain succès, en particulier dans la ville de New-York dont le parc comportait 550 véhicules hybrides fin 2006.

Les données de ce paragraphe sont issues du rapport d'évaluation « New York city transit hybrid and CNG transit buses : interim results » NREL (National Renewable Energy Laboratory), janvier 2006, complétées par des recherches sur Internet.

11.3.1 Bref historique.

New York City Transit (NYCT), entreprise de transports en commun de la ville de New York, s'est intéressée au bus hybride diesel à la fin des années 1990.

Elle a d'abord testé 10 prototypes entre 1998 et 2001.

Après évaluation, elle a décidé de passer commande de 325 bus hybrides en deux phases : 125 bus mis en circulation entre mars et décembre 2004 ; 200 autres livrés en 2005 et début 2006.

Une nouvelle commande de plus de 200 unités fut passée en 2006. Fin 2006 le nombre de bus hybrides diesel en exploitation s'élevait à 550.

NYCT possède le parc le plus important de bus hybrides diesel aux Etats-Unis.

11.3.2 Le cadre de l'évaluation par NREL.

L'évaluation porte sur 10 bus hybrides diesel faisant partie de la première commande de 125 unités. Ils sont comparés à 9 bus diesel pur affectés au même dépôt qu'eux de manière à obtenir des conditions d'exploitation identiques (dépôt de Mother Clara Hale).

Le rapport intermédiaire NREL de janvier 2006 couvre la période d'octobre 2004 à mai 2005.

Le rapport final couvrira une année entière (octobre 2004 à septembre 2005 inclus.)

L'évaluation se poursuivra également sur les livraisons plus récentes.

Le tableau 11.3 ci-dessous présente les principales caractéristiques des véhicules testés.

La figure 11.10 montre le schéma et une photo du bus hybride ORION VII.

Les données du rapport sont exprimées en unités américaines et on les a traduites en unités internationales.

Tableau 11.3. Principales caractéristiques des véhicules testés.
 (Source : NREL, janvier 2006)

	Bus hybride	Bus diesel
Constructeur et modèle	Orion VII, plancher bas	Orion V, plancher haut
Année du modèle	2002	1999
Longueur / largeur/ hauteur (m)	12,20 / 2,59 / 3,35	12,20 / 2,59 / 3,07
Poids : en charge / à vide (tonnes)	19,3 / 14,4	18,1 / 12,9
Passagers : assis/debout	38 / 32	39 / 36
Constructeur du moteur et modèle	Cummins ISB	Detroit Diesel Corporation
Puissance : cheval vapeur USA / kW	270 / 201	275 / 205
Capacité du réservoir (litres)	378	473
Prix d'achat (\$)	\$385 000	\$290 000
Prix d'achat (€)	308 000 €	232 000 €

1 \$ = 0,8 €

A titre indicatif le bus standard RATP AGORA EURO 3 (diesel) mesure 12 mètres de long, 2,5 mètres de large et 3,1 mètres de haut (climatisation comprise). Il permet d'accueillir 29 passagers assis et 66 debout. Son poids maximum autorisé en charge est de 19 tonnes (à vide 11,64 tonnes.) Sa puissance est de 245 chevaux-vapeur (norme internationale) soit 180 kW⁵⁴. On a donc des caractéristiques proches du bus diesel new-yorkais sauf sur les normes de confort (passagers assis et debout.)

⁵⁴ 1 cheval-vapeur égale 0,736 kW (au lieu de 0,746 kW pour la norme US)

Figure 11.10. Schéma du bus hybride ORION VII et photo du véhicule.
(Source : ORION BUS, mars 2006)

Orion VII Hybrid Bus System Overview



- A The smaller (6 liter) diesel *engine* runs at controlled speed and is connected to *generator* to produce electrical power for drive motor & batteries
- B The *electric motor* drives the vehicle & regenerates energy during braking
- C The *batteries* supply power during acceleration and hill climbing as well as store energy recovered during regenerative braking
- D The *propulsion control system* manages the entire system and optimizes performance for emissions, fuel economy and power



11.3.3 Les principaux résultats.

La comparaison porte essentiellement sur l'efficacité énergétique et les frais d'exploitation hors salaires des conducteurs.

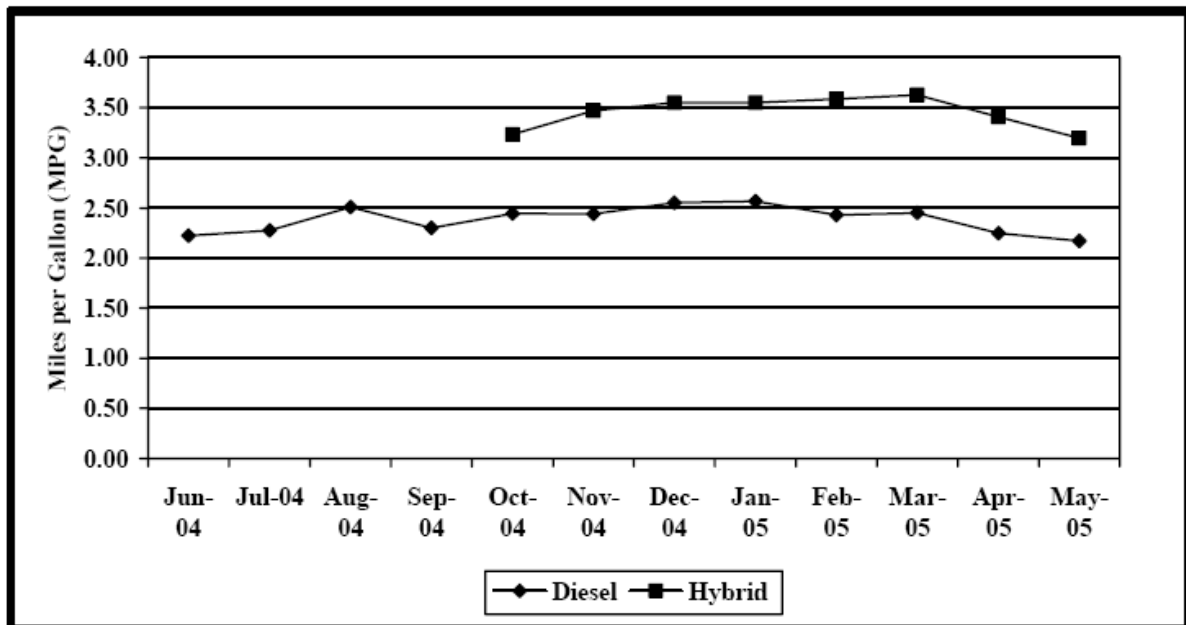
Le tableau 11.4 ci-après résume les principaux résultats. Là encore on a traduit les valeurs originelles américaines en unités internationales.

La figure 11.11 indique les mesures d'efficacité énergétique.

Tableau 11.4. Comparaison des performances des véhicules en exploitation
(Source : NREL, janvier 2006)

	Bus hybride	Bus diesel	Hybride Diesel
Kilométrage mensuel moyen (km)	3 911	3 838	2%
Efficacité énergétique (kilomètres parcourus / litre de gazole)	1,46	1,01	45%
Consommation (litres de gazole / 100 kilomètres)	68,4	98,8	-31%
Coût du gazole (\$ / litre)	0,45	0,45	
Frais de carburant (\$ / km)	0,31	0,44	-31%
Frais d'entretien (\$ / km)	0,74	1,09	-32%
Total frais d'exploitation hors salaires des conducteurs (\$ / km)	1,05	1,53	-32%
Prix d'achat du véhicule (\$)	385 000	290 000	33%
Frais d'exploitation sur un an hors salaires des conducteurs (\$)	49 111	70 528	-30%

Figure 11.11. Efficacité énergétique des bus hybrides et diesel pur.
(Source : NREL, janvier 2006)



On constate tout d'abord une grande différence de performance entre le matériel diesel new-yorkais et RATP : alors que la consommation moyenne du bus diesel américain est de 98,8 litres aux 100 km celle du bus RATP diesel Euro 3 (dont on a vu que les caractéristiques techniques sont proches) est de 60,3 litres aux 100 km (64,2 avec le diester à 30% et le filtre à particules), soit 39% de moins ! (35% si on compare au bus RATP avec le diester à 30% et le filtre à particules.)

Le remplacement du bus diesel pur new-yorkais par un bus hybride permet d'économiser 31% de carburant ce qui ramène la consommation kilométrique à un niveau voisin du bus RATP.

En bref le bus hybride new-yorkais coûte 33% plus cher à l'achat (+ 95.000 \$) que son homologue diesel mais génère une économie annuelle de 30% de frais d'exploitation hors salaires des conducteurs

Si on considère qu'il n'y a pas d'emprunt réalisé pour l'achat du matériel et que son amortissement est linéaire, le surcoût du bus hybride est amorti en 4,4 ans.

REM.1. Les nouveaux bus hybrides en cours de livraison ont un surcoût de + 150.000 \$ par rapport à son homologue diesel.

Si on suppose que le gain annuel est le même (- 21.417 \$ / an) la durée d'amortissement de son surcoût passe à 7 ans.

REM. 2. D'après plusieurs personnes auditionnées la comparaison de l'étude NREL serait biaisée car les bus diesel non hybrides seraient d'anciens modèles dont le moteur diesel n'est aucunement comparable à celui des véhicules hybrides, ce qui fausserait les résultats en faveur du bus hybride. Ceci expliquerait au demeurant la surconsommation aberrante du bus diesel non hybride new-yorkais par rapport à son homologue de la RATP (+39%).

11.4 CONCLUSIONS SUR LES POTENTIALITES DES BUS ELECTRIQUES ET HYBRIDES

Malgré ses nombreux avantages d'utilisation (fiable, silencieux, agréable à conduire, très bon rendement du moteur, couple moteur plus important que le diesel au démarrage, entretien relativement facile et peu coûteux, économe en fonctionnement, pas d'émissions polluantes ou de gaz à effet de serre) le bus électrique risque de se limiter pendant encore assez longtemps à l'exploitation de lignes urbaines courtes par des véhicules de gabarit réduit.

En effet son développement est actuellement fortement contrecarré par le poids et le coût des batteries de stockage de l'énergie électrique ainsi que par le coût du véhicule lui-même.

On a vu que pour le Montmartrobus (véhicule électrique « OREOS 55 » d'une capacité de 50 places dont 39 debout) le prix du seul véhicule (hors batteries) atteignait 2,5 fois celui de son homologue diesel. Les batteries (type nickel-cadmium) représentent 15% du poids du véhicule à vide et un surcoût égal à 12-13% du prix de ce dernier pour une durée de vie de seulement 3 ans et une autonomie de 70 km sur le site de Montmartre à condition d'effectuer des recharges rapides aux terminus (130 km sur terrain plat annoncé par le constructeur également avec recharges rapides)

Or, en l'état actuel des connaissances, la capacité massique des batteries pour véhicules automobiles n'est pas appelée à croître rapidement (disons un doublement d'ici 2020) de sorte que, pour une même autonomie, le poids des batteries nécessaires demeurera environ 15 fois plus important que celui du gazole (ce calcul tient compte du rendement 3 fois plus élevé du moteur électrique par rapport au moteur thermique)

Il devrait toutefois être possible d'améliorer les performances en exploitation, notamment l'autonomie, en couplant des batteries (réservoir d'énergie) et des supercapacités (réservoir de puissance), avec récupération de l'énergie de freinage et recharges rapides en ligne (aux arrêts), ce qui permettrait l'usage du bus électrique autrement que sur des lignes urbaines courtes. Reste à savoir si le bilan économique sera attractif.

Dans l'immédiat les constructeurs cherchent à réduire le coût des véhicules. Ainsi GEPEBUS, constructeur de l'« OREOS 55 » circulant à Montmartre (Paris), prévoit de lancer en 2008 l'« OREOS 40 », véhicule plus petit (40 places) mais deux fois moins cher (batteries et supercapacités comprises) de sorte que son surcoût par rapport à son équivalent diesel sera seulement de 20%.

Dans l'attente, soit d'une rupture technologique dans le domaine des batteries, soit d'une technologie de remplacement du moteur diesel (la pile à combustible ?), la solution intermédiaire qu'est le bus hybride diesel/électrique devrait se développer. Le bus hybride actuel, non rechargeable, est en fait mû par un moteur thermique (diesel) auquel on accouple un moteur électrique afin d'une part de pouvoir récupérer de l'énergie (sous forme électrique) pendant les variations de régime de fonctionnement et le freinage (énergie perdue avec le moteur diesel classique), d'autre part d'améliorer le rendement du moteur diesel (utilisation de celui-ci à des régimes où son rendement est le meilleur). L'hybridation peut également se faire avec un moteur GNV.

Le bus hybride n'a pas encore percé en Europe. En revanche il se développe aux Etats-Unis, plus particulièrement dans la ville de New-York où le parc atteignait 550 bus hybrides fin 2006. L'étude du NREL (National Renewable Energy Laboratory) publiée en janvier 2006 montre que, sur le cas new-yorkais, le remplacement de bus diesel par des bus hybrides est rentable malgré un surcoût important : le bus hybride new-yorkais coûte 33% plus cher à l'achat (+95.000 \$) que son homologue diesel mais génère une économie annuelle de 30% de frais d'exploitation hors salaires des conducteurs ; le surcoût est amorti en 4,4 ans. Les derniers modèles sont encore plus onéreux (+150.000 \$) et devrait être amortis en 7 ans en supposant que l'économie annuelle demeure de 30%.

Plusieurs personnalités auditionnées pensent cependant que l'étude NREL est biaisée en faveur des bus hybrides car les bus diesel avec lesquels ils ont été comparés sont d'anciens modèles dont le moteur diesel n'est aucunement comparable à celui des véhicules hybrides. Ceci expliquerait au demeurant la surconsommation aberrante du bus diesel non hybride new-yorkais par rapport à son homologue de la RATP (+39%).

Cependant les progrès possibles dans les technologies batteries et supercapacités laissent espérer une introduction de tels bus à moyen terme en Europe. A long terme on peut même envisager des bus hybrides rechargeables (c'est-à-dire des véhicules utilisant vraiment deux énergies : le gazole et l'électricité) permettant une bien plus longue utilisation en mode électrique pur. Cela implique, outre les progrès techniques, des réductions importantes sur les coûts des batteries et supercapacités.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

Gabriel PLASSAT « Les technologies des moteurs de véhicules lourds et leurs carburants. Tome 1 » ADEME, janvier 2005.

Gabriel PLASSAT « Bus propres : quels carburants, quels moteurs ? Les évaluations de l'ADEME ; Tome 2 » ADEME, janvier 2005.

Gabriel PLASSAT « Pollutants Emissions, global warming potential effect, comparison using external costs on urban buses. » Congrès AEA. Poitiers (5-6 avril 2006).

ADEME-EDF-CERTU « Les bus propres en France : les bus électriques » Octobre 2004.

AFGNV « Guide pour une bonne exploitation des bus GNV » juin 2004.

AFGNV « Le gaz naturel véhicules : quel potentiel ? » novembre 2006

JOINT RESEARCH CENTRE (European Commission)-CONCAWE-EUCAR « Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context » (mars 2007).

Olivier APPERT, Philippe PINCHON « Quelles énergies dans les transports de demain ? Les réponses de l'IFP » Diaporama et note de synthèse présentés à la conférence de presse IFP du 21 novembre 2006

BEA-TT « Rapport d'enquête technique sur les incendies d'autobus fonctionnant au GNV, notamment les incendies survenus en août 2005 à Montbéliard et à Nancy » (Mars 2006)

GPL PROP'BUS. Dossier de presse du 16 septembre 2005.

CFBP « Le GPL carburant : un carburant propre d'aujourd'hui et pour demain ». dossier de presse du 6 avril 2004.

François BADIN « Les véhicules à motorisation hybride » Diaporama (14 mars 2006)

Bertrand THEYS « Les batteries pour le stockage de l'électricité dans les véhicules électriques ou hybrides » PREDIT, février 2006.

Bernard MULTON, Jacques RUER « Stocker l'électricité : oui c'est indispensable, et c'est possible ! Pourquoi, où, comment » ECRIN Club énergies alternatives (2004).

Louis SERVANT, Amélie SEBEK « La pollution atmosphérique et les transports franciliens » IAURIF, octobre 2004.

OPTILE « Note d'information des adhérents : véhicules propres ». Mai 2004.

Union européenne. Alternative fuels contact group « Market development of alternative fuels » Décembre 2003.

K. CHANDLER, E. EBERTS, L. EUDY “New-York Transit Hybrid and CNG Transit Buses : Interim Evaluation Results” NREL, janvier 2006.

QUELQUES SITES INTERNET.

www.ademe.fr : site de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)

www.inrets.fr : site de l'INRETS (Institut National de REcherche sur les Transports et leur Sécurité)

www.ifp.fr : site de l'IFP (Institut Français du Pétrole)

www.cdpd.org : site du CPDP (Comité Professionnel du Pétrole)

www.edf.fr : site d'EDF (Electricité de France)

www.gazdefrance.com : site de GDF (Gaz de France)

www.afgnv.info : site de l'AFGNV (Association Française du Gaz Naturel pour Véhicules)

www.cfbp.fr : site du CFBP (Comité Français du Butane et du Propane)

www.villesdiester.asso.fr : Club des villes Diester (Leurs transports en commun utilisent du Diester)

www.ratp.fr : site de la RATP (régie Autonome des Transports Parisiens)

www.optile.com : site de l'OPTILE (Organisation Professionnelle des Transports d'Ile-de-France)

www.stif-idf.fr : site du STIF (Syndicat des Transports d'Ile-de-France)

www.ccfa.fr : site du CCFA (Comité des Constructeurs Français d'Automobiles)

www.irisbus.com : site du constructeur IRISBUS IVECO

www.man-mn.fr : site du constructeur MAN

www.evobus.com : site du constructeur EVOBUS (MERCEDES-BENZ ; SETRA)

www.scania.com : site du constructeur SCANIA

www.orionbus.com : site du constructeur ORION BUS (bus hybrides ORION VII de New-York)

www.nrel.gov : site de NREL (National Renewable Energy Laboratory, USA)

www.concawe.org : site du CONCAWE (CONservation of Clean Air and Water in Europe)

www.jrc.cec.eu.int : site du JRC (Joint Research Centre), organisme de recherche de la Commission européenne

<http://ies.jrc.ec.europa.eu/wtw.html> : adresse où sont disponibles tous les rapports de l'étude JOINT RESEARCH CENTRE (European Commission)-CONCAWE-EUCAR « Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context »

www.externe.info : site du programme européen externe

ANNEXE 1. PERSONNALITES AUDITIONNEES OU CONTACTEES

ADEME ANGERS

Dominique WEITZ

ADEME IdF

Jean-Yves MARIE-ROSE

ADEME VALBONNE

Gabriel PLASSAT

AFGNV

Vincent TISSOT-FAVRE,

CCFA

André DOUAUD

Conseil Régional d'Ile-de-France

Bruno LOUIS

DGEMP. Observatoire de l'énergie

Véronique PAQUEL

EVOBUS France

François HEULIEZ, responsable commercial bus

GDF

Claude MANGIN

Serge TERRISSE

GNVert

Stéphane BODET

Fabrice VERNAY

INRETS

Jean DELSEY

François BADIN

IRISBUS IVECO

Valéry CERVANTÈS

MARNE ET MORIN

Daniel MAISON, directeur général

Annie MAITRET, responsable Qualité Environnement

OPTILE

Jean-Pierre FRIEDERICH, directeur général

Nadia TRARI

RATP

Emmanuel TRAMOND, directeur Département MRB (Matériel Roulant Bus)
Henri BORDENAVE, responsable d'unité Département MRB
Philippe LE NY, Département MRB
Philippe JOUETTE, Département MRB
Fabrice BLANC, Département MRB

RENAULT

Daniel AUGELLO

VALOR CONSULTANTS

Guy DARRICAU

VEOLIA ENVIRONNEMENT

Pierre HUNOLD, directeur achats
Jean-Loup GAUDUCHEAU

VOLVO RENAULT TRUCKS

Bernard FAVRE, directeur de recherche
Jean-Paul FAYOLLE
Jean-Claude GIRAUD bus
James ROLLAND produits et planification

ANNEXE 2. CALCUL DE LA PART DES BUS RATP ET OPTILE DANS LA CONSOMMATION REGIONALE DE CARBURANTS ROUTIERS. ANNEE 2003.

Consommation d'énergie dans les transports en commun (TC) routiers franciliens en 2003

(Source : RATP, OPTILE)

	Consommation totale en m ³	Emissions de CO ₂ en tonnes
RATP	79 532,3	206 784
OPTILE	57 030,0	148 278
Total	136 562,3	355 062

Rappel : 1 m³ de gazole produit 2,6 tonnes de CO₂

Vente de carburants en IDF en 2003 et émissions de CO₂ associées

(Source : CPDP)

	Gazole	Supercarburant	Total
En volume (m ³)	3 825 904	2 468 921	6 294 825
En énergie (tep)	3 232 889	1 952 917	5 185 805
Emission de CO ₂ (t)	9 957 298	6 014 983	15 972 281

Rappel : 1 m³ de gazole équivaut à 0,845 tep et produit 2,6 tonnes de CO₂
 1 m³ d'essence équivaut à 0,791 tep et produit 2,44 tonnes de CO₂
 (tep : tonne équivalent pétrole)

Part des TC routiers franciliens dans la consommation régionale de carburants en 2003

Carburants	Part des TC routiers franciliens	
	En consommation (%)	En CO ₂ émis (%)
gazole	3,6%	3,6%
essence+gazole	2,2%	2,2%

ANNEXE 3. SIGLES UTILISES

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

AFGNV : Association Française du Gaz Naturel pour Véhicules

AIRPARIF : organisme chargé de la surveillance de la qualité de l'air en Ile-de-France

ARENE : Agence Régionale de l'Environnement et des Nouvelles Energies

B 30% : biodiesel contenant 30% de biocarburant

BL : Black Liquor (procédé de gazéification)

BTL : Biomass To Liquid (technique de fabrication de carburants de synthèse à partir de la biomasse, notamment du bois)

C₂H₅OH : éthanol (« alcool éthylique »)

C₃H₈ : propane

C₄H₁₀ : butane

C₆H₆ : benzène

CCFA : Comité des Constructeurs Français d'Automobiles

CERTU : Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques

CH₃OH : méthanol

CH₄ : méthane

CHP : Combined Heat and Power (Cogénération chaleur-électricité)

CO : monoxyde de carbone

CO₂ : dioxyde de carbone (gaz carbonique)

CON₂H₄ : urée

CONCAWE : CONservation of Clean Air and Water in Europe

COVNM : Composés Organiques Volatils Non Méthaniques

CPDP : Comité Professionnel du Pétrole

CRT : Continuous Regenerating Trap (Filtre à particules à régénération continue)

CTL : Coal To Liquid (technique de fabrication de carburants de synthèse à partir du charbon)

DeNO_x : équipement de post-combustion destiné à réduire les émissions d'oxydes d'azote (NO_x)

DGEMP : Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières

DICI : Direct Injection Compressed Ignition (Moteur diesel)

DME : Di-Méthyl-Ether

DPF : Diesel Particulate Filter (FAP : Filtre à Particules)

DRE : Direction Régionale de l'Equipement

DRIRE : Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement

EDF : Electricité de France

EEC : Ester Ethylique de Colza

EEV : Enhanced Environmentally friendly Vehicle (véhicule de qualité environnementale bonifiée)

EGR : Exhaust Gas Recirculation (recyclage des gaz d'échappement)

EMC : Ester Méthylique de Colza

EMHV : Ester Méthylique d'Huile Végétale

EMT : Ester Méthylique de Tournesol

ERPURS (étude) : Evaluation des Risques de la Pollution URbaine sur la Santé

ETBE : Ethyl Tertio Butyl Ether (produit oxygéné dérivé de l'éthanol)
EUCAR : EUropean Council for Automotive Research and development

FAP : filtre à particules
FN : Fumée Noire

GHG : GreenHouse Gas (GES : gaz à effet de serre)
GNV : Gaz Naturel Véhicule
GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié
GT : Gas Turbine (Turbine à gaz)
GTL : Gas To Liquid (technique de fabrication de carburants de synthèse à partir du gaz naturel)

H₂ : hydrogène
H₂SO₄ : acide sulfurique
HC : Hydrocarbures
HNO₃ : acide nitrique

IAURIF : Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Ile-de-France
IFP : Institut Français du Pétrole
INRETS : Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité

JRC : Joint Research Centre (Centre de recherche de la Commission Européenne)

KWh : kiloWatt-heure (mille Watt-heures)

LAURE : Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie
Li-Ion : (batterie) Lithium-Ion
LMP : (batteries au) Lithium Métal Polymère
LNG : Liquefied Natural Gas (GNL : Gaz Naturel Liquéfié)

MJ : mégaJoules (million de Joules)

NG : Natural Gas (Gaz naturel)
NiCd : (batterie au) nickel cadmium
NiMH : (batterie au) nickel métal hydrure
Nm³ : Normo-m³ ; quantité de gaz occupant 1 m³ pour une pression de 1013 bars et une température de 0°C (l'énergie contenue est voisine de celle d'un litre de gazole)
NO : monoxyde d'azote
NO₂ : dioxyde d'azote
NO_x : oxydes d'azote (NO et NO₂)
NREL : National Renewable Energy Laboratory (USA)
NYCT : New-York City Transit

O₃ : ozone
OPTILE : Organisation Professionnelle des Transports d'Ile-de-France
ORS : Observatoire Régional de la Santé

Ppm : partie par million (peut être mesuré en poids ou en volume)
PAC : Pile à Combustible
PM : Particulate Matters (particules)

PM₁₀ : micro-particules dont le diamètre est inférieur à 10 micromètres

PREDIT : Programme pour la Recherche, le Développement et l'Innovation dans les Transports terrestres

RATP : Régie Autonome des Transports Parisiens

REE : Rapeseed Ethyl Ester (Ester Ethylique de Colza)

RER : Réseau Express Régional

RME : Rapeseed Methyl Ester (Ester Méthylique de Colza)

SME : Sunflower Methyl Ester (Ester Méthylique de Tournesol)

SO₂ : dioxyde de soufre

STIF : Syndicat des Transports d'Ile-de-France

TC : Transports en Commun

TIPP : Taxe Intérieure sur les Produits Pétroliers

TTW : Tank-To-Wheels (du réservoir à la roue)

UAD : Unité Aménagement Durable (Conseil régional d'Ile-de-France)

Véhicule hybride : Véhicule ayant un moteur thermique et un (ou deux) moteur(s) électrique(s)

VP : Voiture Particulière

Wh : Watt-heure

WTT : Well-To-Tank (du puits au réservoir)

WTW : Well-To-Wheels (du puits à la roue)

ZEBRA : batterie sodium soufre