

Convention réalisée pour le compte de l'IBGE-BIM



dans le cadre de la réalisation d'une campagne de sensibilisation
sur une meilleure utilisation de l'air conditionné automobile

« Coûts financiers directs et indirects engendrés par l'installation de systèmes d'air climatisé dans les voitures particulières »



Vrije Universiteit Brussel
Vakgroep Elektrotechniek en
Energietechniek (ETEC)

Aude Guignard, CESE-ULB
sous la direction du Dr. Walter Hecq

Jean-Marc Timmermans, ETEC-VUB
sous la direction du Pr. Ir. Joeri Van Mierlo

Février 2005

TABLE DES MATIERES

I.	INTRODUCTION	5
II.	OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	7
A.	PARTENARIAT	7
B.	PLAN DE TRAVAIL.....	7
III.	MÉTHODOLOGIE	8
IV.	DESCRIPTION TECHNIQUE DES SYSTEMES D'AIR CLIMATISE	10
A.	INTRODUCTION	10
B.	COMPOSITION D'UN SYSTEME D'AIR CLIMATISE	10
C.	DESCRIPTION DU CYCLE THERMODYNAMIQUE DES SYSTEMES D'AIR CLIMATISE DANS LES VEHICULES ...	12
D.	OPERATION MANUELLE ET AUTOMATIQUE DU SYSTEME D'AIR CLIMATISE	14
1.	<i>Le conditionnement de l'air.....</i>	<i>15</i>
2.	<i>Le recyclage de l'air.....</i>	<i>15</i>
3.	<i>Le courant d'air et la diffusion de l'air.....</i>	<i>15</i>
E.	COMPRESSEURS POUR SYSTEMES D'AIR CLIMATISE	15
1.	<i>Compresseur à course fixe.....</i>	<i>15</i>
2.	<i>Compresseur à course variable.....</i>	<i>15</i>
3.	<i>Compresseur électrique.....</i>	<i>16</i>
F.	REFRIGÉRANTS POTENTIELS	16
1.	<i>Système actuel d'air climatisé au R-134a.....</i>	<i>17</i>
2.	<i>Système d'air climatisé au R-152a.....</i>	<i>17</i>
3.	<i>Système d'air climatisé aux hydrocarbures.....</i>	<i>18</i>
4.	<i>Système d'air climatisé au R-744.....</i>	<i>19</i>
V.	AMÉLIORATIONS POTENTIELLES DES SYSTÈMES EXISTANTS	21
A.	SYSTEMES R-134A AMELIORES	21
VI.	DE NOUVEAUX LIQUIDES RÉFRIGÉRANTS POUR L'AVENIR.....	22
VII.	BILAN DES AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'AIR CONDITIONNÉ AUTOMOBILE (SANTÉ, CONFORT).....	24
A.	AVANTAGES DE LA CLIMATISATION AUTOMOBILE.....	24
1.	<i>Sécurité routière et confort de conduite.....</i>	<i>24</i>
B.	EFFETS NÉGATIFS DE L'AIR CONDITIONNÉ SUR LA SANTÉ.....	25
1.	<i>Effets directs.....</i>	<i>25</i>
2.	<i>Effets sanitaires indirects.....</i>	<i>30</i>
3.	<i>Synthèse et recommandations.....</i>	<i>38</i>
VIII.	LE TAUX D'ÉQUIPEMENT DU PARC AUTOMOBILE BELGE	40
A.	LE TAUX D'ÉQUIPEMENT RÉEL DU PARC ACTUEL	40
B.	LE TAUX D'ÉQUIPEMENT DES VOITURES NEUVES	40
C.	TENDANCES FUTURES POUR L'ÉQUIPEMENT DES VOITURES NEUVES	42
D.	ÉVOLUTION ET PROJECTIONS DU PARC AUTOMOBILE ÉQUIPÉ CLIMATISÉ	43
IX.	ÉMISSIONS DIRECTES DES SYSTEMES D'AIR CLIMATISE.....	45
A.	ÉMISSIONS PROVENANT DE LA PRODUCTION ET DU TRANSPORT DU REFRIGÉRANT ET DU REMPLISSAGE DU SYSTEME	45
B.	ÉMISSIONS HABITUELLES.....	45
C.	ÉMISSIONS INHABITUELLES	46
D.	ÉMISSIONS DURANT L'ENTRETIEN DU SYSTEME	46
E.	ÉMISSIONS EN FIN DE VIE.....	46
F.	TOTAL DES ÉMISSIONS DIRECTES.....	46
X.	ÉMISSIONS INDIRECTES DES SYSTEMES D'AIR CLIMATISE	48
A.	INTRODUCTION	48
B.	ANALYSE DE LA SURCONSOMMATION DES SYSTEMES INDIVIDUELS	49
1.	<i>Evaluation de la surconsommation à l'aide d'une étude bibliographique.....</i>	<i>49</i>

2.	<i>Evaluation de la surconsommation à l'aide de simulations</i>	52
3.	<i>Simulation de la surconsommation due à l'accroissement de la masse</i>	57
C.	COMPARAISON ESSENCE - DIESEL.....	57
D.	SURCONSOMMATION DUE AUX CONDITIONS CLIMATIQUES (LE CAS DE LA REGION DE BRUXELLES-CAPITALE).	60
XI.	EMISSIONS TOTALES EN REGION DE BRUXELLES-CAPITALE	63
A.	TOTAL EQUIVALENT WARMING IMPACT (TEWI).....	63
B.	SURPLUS DE CONSOMMATION SUR BASE ANNUELLE.	65
XII.	LES COÛTS DIRECTS DE L'AIR CONDITIONNÉ AUTOMOBILE	68
A.	LES COÛTS FIXES	68
1.	<i>Le coût d'achat des systèmes d'air conditionné</i>	68
B.	LES COÛTS VARIABLES	71
1.	<i>L'entretien des systèmes d'air conditionné</i>	71
2.	<i>Les coûts de réparation</i>	75
3.	<i>Les coûts de surconsommation</i>	76
C.	SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS.....	78
XIII.	LES COÛTS INDIRECTS	79
A.	LES COÛTS EXTERNES OU LES EXTERNALITÉS NÉGATIVES	79
B.	LES COÛTS EXTERNES UNITAIRES RETENUS POUR L'ANALYSE.....	80
C.	LES ÉMISSIONS DIRECTES EN ÉQUIVALENTS CO ₂	81
D.	LES SURÉMISSIONS DE POLLUANTS.....	85
E.	LES ÉMISSIONS À LA PRODUCTION ET À L'ACHEMINEMENT DU CARBURANT SURCONSOMMÉ	87
F.	SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS.....	89
XIV.	COÛTS TOTAUX ANNUELS DE L'AIR CONDITIONNÉ AUTOMOBILE : ÉTUDE SELON TROIS SCÉNARIOS D'UTILISATION D'UN VÉHICULE ET ANALYSE DE SENSIBILITÉ	92
A.	LES HYPOTHÈSES COMMUNES AUX TROIS SCÉNARIOS D'UTILISATION.....	92
1.	<i>Le coût d'achat</i>	92
2.	<i>Le capital immobilisé</i>	92
3.	<i>La dépréciation</i>	93
4.	<i>L'entretien</i>	93
5.	<i>Le cycle de roulage et de la durée de fonctionnement</i>	93
6.	<i>Les émissions directes</i>	94
B.	LES HYPOTHÈSES POUR L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ	95
1.	<i>Fixation du prix d'achat à 1€</i>	95
2.	<i>Imposition d'une taxe</i>	95
3.	<i>Redevance de type « Récupel »</i>	95
4.	<i>Hausse du prix du carburant de 10% et 20%</i>	95
5.	<i>Hausse de l'utilisation moyenne annuelle (150 et 200 heures)</i>	95
6.	<i>Scénario optimiste des émissions directes</i>	96
C.	SCÉNARIO D'UTILISATION INTENSE (5 ANNÉES AVEC 20.000 KM/AN)	96
1.	<i>Durée d'utilisation annuelle</i>	96
2.	<i>L'entretien</i>	96
D.	SCÉNARIO D'UTILISATION NORMALE (7 ANNÉES AVEC 15.000 KM/AN).....	99
1.	<i>Durée d'utilisation annuelle</i>	99
2.	<i>L'entretien</i>	99
E.	SCÉNARIO D'UTILISATION FAIBLE (10 ANNÉES AVEC 10.000 KM/AN)	101
1.	<i>Durée d'utilisation annuelle</i>	101
2.	<i>L'entretien</i>	101
F.	SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS.....	104
XV.	CONCLUSIONS	107
XVI.	RECOMMANDATIONS	112
XVII.	BIBLIOGRAPHIE	116
XVIII.	ANNEXES	

TABLE DES ILLUSTRATIONS

TABLEAU 1 : RÉDUCTIONS D'ÉMISSIONS ET SURCÔÛTS DES GAZ ALTERNATIFS AU R134A.....	23
TABLEAU 2 : ÉMISSIONS MOYENNES DE POLLUANTS MESURÉES EN G/KM - ÉCART EN % ENTRE ESSAIS CLIMATISATION EN MARCHÉ ET SANS CLIMATISATION	31
TABLEAU 3 : VALEURS GUIDES DE L'OMS ET DES DIRECTIVES EUROPÉENNES POUR LE CO	32
TABLEAU 4 : VALEURS GUIDES DÉFINIES PAR LES DIRECTIVES EUROPÉENNES POUR LE NO ₂	33
TABLEAU 5 : VALEURS GUIDES DE L'OMS ET DES DIRECTIVES EUROPÉENNES POUR L'O ₃	34
TABLEAU 6 : VALEURS GUIDES DÉFINIES PAR LES DIRECTIVES EUROPÉENNES POUR LES PM10.....	35
TABLEAU 7 : VALEURS GUIDES DE L'OMS ET DES DIRECTIVES EUROPÉENNES POUR LE SO ₂	36
TABLEAU 8 : TROUBLES OCCASIONNÉS PAR LES COV	37
TABLEAU 9 : SYNTHÈSE DES EFFETS SANITAIRES NÉFASTES INDUITS PAR L'AIR CONDITIONNÉ AUTOMOBILE....	38
TABLEAU 10 : APERÇU DE L'ÉQUIPEMENT DES VOITURES NEUVES PAR MARQUES AUTOMOBILES	41
TABLEAU 11 : QUANTITÉS D'ÉMISSIONS DIRECTES DE R-134A D'UN SYSTÈME D'AIR CLIMATISÉ	47
TABLEAU 12 : SURCONSOMMATION RELATIVE (%) [24].....	50
TABLEAU 13 : SYSTÈMES D'AIR CLIMATISÉ [2]	50
TABLEAU 14 : CONDITIONS D'UTILISATION.....	50
TABLEAU 15 : SURCONSOMMATION POUR UNE JOURNÉE ESTIVALE MOYENNE EUROPÉENNE.....	51
TABLEAU 16 : SURCONSOMMATION POUR UNE JOURNÉE ESTIVALE CHAUDE EUROPÉENNE	51
TABLEAU 17 : FACTEURS DE CORRECTION D'ÉMISSIONS POUR VÉHICULES LORS D'UNE UTILISATION DU SYSTÈME D'AIR CLIMATISÉ À PLEIN RÉGIME. (1 = PAS D'ÉMISSIONS SUPPLÉMENTAIRES) [25]	52
TABLEAU 18 : SURCHARGE DU MOTEUR EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE EXTÉRIEURE ET DE LA VITESSE DU MOTEUR AINSI QUE LORS D'UN FONCTIONNEMENT À VIDE [26].	54
TABLEAU 19 : HYPOTHÈSE D'UTILISATION DE LA CLIMATISATION EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE EXTÉRIEURE [26].	54
TABLEAU 20 : RÉSULTATS SIMULATIONS – SURCONSOMMATION (PAR RAPPORT L/100KM).....	56
TABLEAU 21 : RÉSULTATS SIMULATIONS – ÉMISSIONS (PAR RAPPORT G/KM)	57
TABLEAU 22 : SURCONSOMMATION LORS D'UN ACCROISSEMENT DU POIDS DE 10KG.	57
TABLEAU 23 : RENDEMENT ET CONTENU ÉNERGÉTIQUE.....	60
TABLEAU 24:POIDS SUPPLÉMENTAIRE	60
TABLEAU 25 : UTILISATION DU SYSTÈME D'AIR CLIMATISÉ	61
TABLEAU 26 : PUISSANCE SUPPLÉMENTAIRE REQUISE PAR LE SYSTÈME D'AIR CLIMATISÉ (EN kW).....	61
TABLEAU 27 : RÉPARTITION DES TEMPÉRATURES À BRUXELLES	62
TABLEAU 28 : INFLUENCE DE L'UTILISATION DE SYSTÈME D'AIR CLIMATISÉ SUR LA CONSOMMATION DE CARBURANT ET SUR LES ÉMISSIONS DE CO ₂ EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE.	62
TABLEAU 29 : ÉMISSIONS DIRECTES ET INDIRECTES	63
TABLEAU 30 : PRÉSENCE DE SYSTÈMES D'AIR CLIMATISÉ DANS LES VÉHICULES (POURCENTAGE DES VENTES ANNUELLES DE VÉHICULES NEUFS VENDUS AUX PAYS-BAS).....	65
TABLEAU 31 : HYPOTHÈSES D'UTILISATION DES SYSTÈMES D'AIR CLIMATISÉ [30].....	66
TABLEAU 32 : EFFETS GLOBAUX AU NIVEAU DE LA FLANDRE.....	66
TABLEAU 33 : INFLUENCE DE L'UTILISATION DE CLIMATISATION SUR LES ÉMISSIONS GLOBALES DU PARC AUTOMOBILE FLAMAND 1998.....	67
TABLEAU 34 : FOURCHETTE DE PRIX DES INSTALLATIONS DE DEUXIÈME MONTE	70
TABLEAU 35 : LISTE DE DIVERS OPÉRATEURS ET FOURCHETTES DE PRIX POUR L'ENTRETIEN DE LA CLIMATISATION	73
TABLEAU 36 : COÛTS ANNUELS DE SURCONSOMMATION DE L'AIR CONDITIONNÉ	77
TABLEAU 37 : COÛTS EXTERNES RETENUS SELON LES IMPACTS	80
TABLEAU 38: HYPOTHÈSE DE CALCULS DES ÉMISSIONS DIRECTES POUR LES DIVERS SCÉNARIOS.....	82
TABLEAU 39: ESTIMATIONS DES ÉMISSIONS DIRECTES DE HFC 134A SUR LA DURÉE DE VIE D'UN SYSTÈME D'AIR CONDITIONNÉ AUTOMOBILE.....	83

TABLEAU 40 : EMISSIONS DIRECTES ET COÛTS EXTERNES ANNUELS POUR LES 8 VOITURES ANALYSÉES.....	84
TABLEAU 41 : SURÉMISSIONS ANNUELLES EN (G) DE POLLUANTS LIÉS À L'AIR CONDITIONNÉ AUTOMOBILE ET SUIVANT UNE UTILISATION ANNUELLE DE 100 HEURES.....	86
TABLEAU 42 : EMISSIONS (MG/KWH) INDIRECTES DE POLLUANTS LORS DE LA PRODUCTION ET LA DISTRIBUTION DE CARBURANTS.....	87
TABLEAU 43 : COÛTS EXTERNES ANNUELS RÉSULTANT DE LA PRODUCTION ET DE LA DISTRIBUTION DU CARBURANT.....	88
TABLEAU 44 : COÛTS EXTERNES NÉGATIFS TOTAUX DE L'AIR CONDITIONNÉ AUTOMOBILE.....	89
TABLEAU 45 : COÛTS EXTERNES TOTAUX DE L'AIR CONDITIONNÉ AUTOMOBILE EN RBC POUR L'ANNÉE 2003.....	90
TABLEAU 46 : COÛTS ANNUELS TOTAUX POUR LE SCÉNARIO D'UTILISATION DE LA VOITURE SUR 5 ANS AVEC 20.000 KM PARCOURUS/AN.....	96
TABLEAU 47 : RÉSULTATS DE L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ POUR LE SCÉNARIO 5 ANS D'UTILISATION AVEC 20.000 KM PARCOURUS/AN.....	97
TABLEAU 48 : COÛTS ANNUELS TOTAUX POUR LE SCÉNARIO D'UTILISATION DE LA VOITURE SUR 7 ANS AVEC 15.000 KM PARCOURUS/AN.....	99
TABLEAU 49 : RÉSULTATS DE L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ POUR LE SCÉNARIO 7 ANS D'UTILISATION AVEC 15.000 KM PARCOURUS/AN.....	100
TABLEAU 50 : COÛTS ANNUELS TOTAUX POUR LE SCÉNARIO D'UTILISATION DE LA VOITURE SUR 10 ANS AVEC 10.000 KM PARCOURUS/AN.....	102
TABLEAU 51 : RÉSULTATS DE L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ POUR LE SCÉNARIO 10 ANS D'UTILISATION AVEC 10.000 KM PARCOURUS/AN.....	103
TABLEAU 52 : HYPOTHÈSES DES SCÉNARIOS DE RÉFÉRENCE.....	105
TABLEAU 53 : HYPOTHÈSES DE L'ANALYSE DE SENSIBILITÉ.....	105
FIGURE 1 : COMPOSITION D'UN SYSTÈME D'AIR CLIMATISÉ ET POINTS SENSIBLES EN CE QUI CONCERNE LES FUITES.....	10
FIGURE 2 : CYCLE THERMODYNAMIQUE DU SYSTÈME R134A.....	12
FIGURE 3 : SCHEMA PRINCIPAL DU FONCTIONNEMENT DES SYSTÈMES D'AIR CLIMATISÉ DANS LES VEHICULES.....	13
FIGURE 4 : SYSTÈME D'AIR CLIMATISÉ AVEC REGLAGE AUTOMATIQUE.....	14
FIGURE 5 : SCHÉMA PRINCIPAL DU FONCTIONNEMENT DES SYSTÈMES À BOUCLE DOUBLE.....	18
FIGURE 6 : CYCLE TRANSCRITIQUE DU R-744 ET SUBCRITIQUE DU R-134A.....	20
FIGURE 7 : ÉVOLUTION DU TAUX D'ÉQUIPEMENT DES VÉHICULES NEUFS.....	43
FIGURE 8 : PERSPECTIVES DE PÉNÉTRATION DES VÉHICULES CLIMATISÉS.....	44
FIGURE 9 : INTERFACE D'UTILISATION DE VSP.....	53
FIGURE 10 : MODÈLE DE SIMULATION D'UN VÉHICULE À ESSENCE EN VSP.....	54
FIGURE 11 : INTERFACE UTILISATEUR DU SYSTÈME D'AIR CLIMATISÉ VSP.....	55
FIGURE 12 : MODÈLE DE SIMULATION DU SYSTÈME D'AIR CLIMATISÉ VSP.....	55
FIGURE 13 : EXEMPLE DE CYCLE SIMULÉ NEDC.....	55
FIGURE 14 : EXEMPLE DE PUISSANCE DE MOTEUR SIMULÉE LORS DU NEDC.....	56
FIGURE 15 : INFLUENCE DE λ SUR L'EFFICIENCE DE CONVERSION D'UN CATALYSEUR DE MOTEUR À ESSENCE.....	58
FIGURE 16 : CARTE DES TEMPERATURES A BRUXELLES.....	61
FIGURE 17 : TEWI POUR LA REGION BRUXELLOISE.....	64
FIGURE 18 : REPARTITION DU TEWI ET DU « WELL-TO-WHEEL ».....	64
FIGURE 19 : PRIX DES OPTIONS CLIMATISATION SUR BASE DES CATALOGUES 2004.....	69

I. Introduction

Les changements climatiques se posent comme l'un des principaux défis de nos sociétés pour les décennies à venir. La solution à ce problème passera nécessairement par une maîtrise de nos consommations énergétiques majoritairement basées sur les ressources fossiles.

Au niveau mondial, la lutte contre les changements climatiques s'est traduite par l'adoption du Protocole de Kyoto qui entrera en vigueur le 16 février prochain.

A l'échelle de la Région Bruxelles-Capitale, cette volonté s'est exprimée au travers du *Plan d'amélioration structurelle de la qualité de l'air et de lutte contre le réchauffement climatique*, dénommé aussi *Plan Air Climat*.

Il consiste à répondre à l'objectif bruxellois de +3,475% des émissions de gaz à effet de serre entre 2008 et 2012, par rapport à leur niveau de 1990. Cet objectif représente une diminution de -20% des émissions par rapport à un scénario en *business as usual*. Etant donné qu'en Région bruxelloise les activités industrielles et agricoles sont fortement limitées, une stratégie de réduction des émissions s'axera nécessairement sur la limitation des consommations énergétiques au niveau des bâtiments et du transport. Ce dernier représente plus de 18% des émissions de GES à l'échelle de la Région. Une large partie des ces émissions est produite par les navetteurs quotidiens en provenance des deux régions limitrophes.

Malgré, les efforts considérables entrepris depuis une dizaine d'années par l'industrie automobile dans la conception de voitures plus propres, l'accroissement des performances dynamiques, des prestations de sécurité routière ou de confort ont largement contrebalancé ces progrès. Ainsi, les constructeurs automobiles (ACEA¹, JAMA², KAMA³) ont conclu un accord important, avec la Commission Européenne, pour la réduction volontaire des émissions de CO₂ de leurs véhicules fixée à 140g/km d'ici 2008. Mais les mesures de consommation retenues par cet accord (cycles de tests européens MVEG, ECE, etc.) ignorent l'équipement des véhicules et le fonctionnement des auxiliaires, ce qui suscite de multiples interrogations quant aux réels progrès qui pourront être réalisés.

De plus, dans un souci de stratégie commerciale, les constructeurs proposent des voitures suréquipées, dans lesquelles l'air conditionné commence à être considéré comme un accessoire standard.

Pourtant, la généralisation progressive de la climatisation automobile pose des difficultés à deux niveaux⁴ en terme de réchauffement climatique :

- Surconsommation de carburants et surémissions indirectes de polluants (dont le CO₂);
- Emissions directes dans l'atmosphère de gaz à effet de serre fluorés à fort potentiel de réchauffement suite aux fuites des circuits de froid (PRP⁵>1300).

¹ Association des Constructeurs Automobile Européens.

² Japan Automobile Manufacturers Association.

³ Korean Automobile Manufacturers Association.

⁴ Voir Annexe I: Émissions annuelles totales de GES dues aux systèmes de conditionnement d'air automobile, UE-15, 2010 et 2020.

⁵ « Potentiel de réchauffement planétaire » : le potentiel de réchauffement du climat d'un gaz à effet de serre par comparaison à celui du dioxyde de carbone. Le PRP standard est calculé en fonction du potentiel de réchauffement sur 100 ans d'un kilogramme d'un gaz donné par rapport à un kilogramme de CO₂(Art. 2., Proposition de règlement du Parlement Européen et du Conseil relatif à certains gaz à effet de serre fluorés, 1363/04).

La réponse technologique formulée par les textes législatifs européens à venir concernant les GES fluorés ainsi que les émissions provenant des systèmes de climatisation des véhicules à moteur, n'apportera qu'une solution partielle au problème.

En effet, les répercussions de solutions technologiques seules sont souvent limitées si elles ne prennent pas en considération les aspects comportementaux des consommateurs. Ainsi, il importe de sensibiliser le citoyen quant à l'impact de l'utilisation de la climatisation automobile en termes économiques, environnementaux et sanitaires ainsi que de l'informer quant à d'éventuelles alternatives lui garantissant le même confort.

II. Objectifs de l'étude

Le but premier de cette étude est de fournir aux autorités bruxelloises concernées par le *Plan d'amélioration structurelle de la qualité de l'air et de lutte contre le réchauffement climatique* des éléments leur permettant de développer une campagne de sensibilisation effective auprès des consommateurs concernant la contribution aux émissions de GES des systèmes d'air climatisé dans les véhicules particuliers.

Le levier financier constituant souvent un argument efficace pour induire un changement de comportement allant dans le sens d'une utilisation énergétique plus rationnelle, nous axerons un des principaux volets de l'étude sur cet aspect. Les effets sanitaires néfastes constituent un deuxième levier. Ceux-ci peuvent découler de l'utilisation des systèmes de climatisation dans les voitures et seront également présentés dans l'argumentaire. Nous évoquerons également les aspects environnementaux au travers de l'analyse des coûts externes.

Au final, l'étude se basera sur l'estimation des coûts financiers directs et indirects découlant, pour le consommateur, du fonctionnement d'un système de climatisation automobile. Elle portera également sur l'estimation des coûts externes (effets environnementaux). Ces coûts seront estimés en tenant compte des spécificités du cycle de conduite induites par la situation urbaine de Bruxelles.

A. Partenariat

La partie technique relative à la description du fonctionnement d'un système d'air conditionné automobile, l'estimation des surconsommations et des taux de fuites, ont été traitées par l'équipe d'ingénieurs du département ETEC de la Vrije Universiteit Brussel.

Les aspects socio-économiques et environnementaux de l'étude ainsi que la coordination du projet ont été assurés par le CEESE de l'Université Libre de Bruxelles.

B. Plan de travail

Pour mener à bien cette étude, les aspects suivants seront repris dans l'analyse des systèmes d'air conditionné automobile :

- description de la méthodologie utilisée et de la mission prise en charge;
- description technique du fonctionnement des systèmes d'air climatisé dans les véhicules et analyse des problèmes de santé ;
- consommation des véhicules dont celle relative à l'air conditionné ;
- impacts négatifs de la climatisation sur la santé ;
- coûts directs ;
- coûts indirects ;
- conclusions et recommandations.

III. Méthodologie

Quatre démarches méthodologiques sous-tendent aux tâches accomplies par le CEESE-ULB et la Vrije Universiteit Brussel, département ETEC.

Une première étape a consisté en l'étude bibliographique en utilisant comme support les bibliothèques universitaires, la banque de données électronique de revues internationales, les divers outils de recherche offerts par Internet ainsi que plusieurs bases de données et périodiques scientifiques (cf. bibliographie en fin de rapport).

La description des systèmes mobiles d'air climatisé a été effectuée en se référant à des sources bibliographiques générales, des syllabi, des descriptions techniques et des publications scientifiques. Cela a permis d'établir un état des lieux de la situation actuelle de la technologie des systèmes d'air climatisé dans le secteur automobile. Les émissions directes et indirectes dues à l'utilisation de systèmes d'air climatisé pour véhicules ont été analysées à l'aide de diverses études européennes et nord-américaines. Tout au long de l'étude, une attention particulière a été portée au contexte urbain, spécifique à la Région de Bruxelles-Capitale.

La recherche de références bibliographiques a également conduit à la lecture et à l'analyse de diverses études européennes concernant les effets environnementaux des systèmes d'air conditionné automobile et des liquides réfrigérants, ainsi que la législation européenne en vigueur et celle en cours d'adoption. Il en a été de même pour la recherche bibliographique concernant les effets sanitaires et les coûts externes liés à l'air conditionné.

Un deuxième volet méthodologique a porté sur la recherche et la récolte de données sur le terrain. Cette campagne de collecte d'informations a démarré par l'envoi de questionnaires à plus d'une trentaine d'importateurs automobiles en Belgique. Les noms ainsi que les résultats de cette campagne de collecte de données ont été insérés en annexe. L'envoi des questionnaires a été suivi par une série de contacts téléphoniques auprès des responsables « après-vente » ou « service technique » des divers importateurs.

Nous avons, par la suite, entrepris diverses visites auprès des garages spécialisés dans l'entretien et la réparation de l'air conditionné (Arwac, Mockel, Radia Express, Avo Car, etc), des garages de réparation rapide (Speedy et Midas) ainsi que trois garages de concessionnaires (BMW, D'Ieteren, Renault).

La recherche d'informations concernant les impacts sanitaires de l'air conditionné nous a mené à entretenir de nombreux contacts par courrier électronique et téléphoniques avec quelques spécialistes de la médecine de l'environnement et de la biocontamination (Prof. J. Kummer (ULB), Prof. M. Devleeschouwer (ULB), Prof. C. Chasseur (IPH/IHE) et Prof. N. Nolart (IPH/IHE)). Nous avons également pris contact avec le service de médecine de l'environnement du Grand-duché de Luxembourg, de même qu'avec des allergologues et des oto-rhino-laryngologistes. Les données concernant les coûts externes des divers polluants furent obtenues à partir du projet de recherche EcoScore.

La troisième phase a consisté à effectuer des modélisations à l'aide du programme de simulation de véhicules VSP, développé à la Vrije Universiteit Brussel. Des modèles pour les systèmes d'air climatisé furent ajoutés aux modèles de véhicules existants afin d'analyser leur impact sur la consommation et les émissions du véhicule.

La dernière étape méthodologique a consisté à traiter les données et à procéder à l'élaboration de scénarios d'utilisation du véhicule et de l'air conditionné. La situation particulière de la Région de Bruxelles-Capitale a été étudiée en effectuant des calculs et en analysant des données provenant d'études bibliographiques. Divers calculs ont été effectués, pour différents liquides réfrigérants, en tenant compte des caractéristiques spécifiques à la Région de Bruxelles-Capitale (cycle de vitesse urbain, conditions climatiques), des émissions annuelles d'équivalents CO₂, de l'utilisation d'un véhicule diesel ou essence, etc.

Sur base des références et des données recueillies, nous avons établi trois scénarios représentant des comportements types des consommateurs.

Ces scénarios ont été soumis à une analyse de sensibilité afin d'identifier les hypothèses susceptibles d'influencer les coûts liés à l'équipement et au fonctionnement de l'air conditionné automobile.

La présente étude débutera par une description technique détaillée du fonctionnement des systèmes d'air conditionné automobile. Nous poursuivrons ensuite par un bilan des avantages et inconvénients posés en termes de santé et de confort par ces systèmes. Afin de mieux illustrer les enjeux de la problématique, nous donnerons un aperçu du marché de l'air conditionné automobile ainsi que de ses perspectives de croissance pour les années à venir.

Les parties relatives aux émissions directes de gaz réfrigérant et des émissions indirectes de polluants permettront d'illustrer l'impact environnemental de ce type d'équipement.

Nous terminerons par une analyse économique des coûts financiers directs et indirects liés à l'équipement et au fonctionnement de l'air conditionné automobile.

IV. Description technique des systèmes d'air climatisé

A. Introduction

La première partie consiste en une description technique des différents systèmes d'air climatisé disponibles pour les véhicules. Une attention toute particulière sera prêtée aux liquides de refroidissement utilisés.

Les systèmes d'air climatisé pour voitures particulières contribuent à l'effet de serre par les émissions de liquide réfrigérant (émissions directes) et par l'augmentation de la consommation de carburant du véhicule (émissions indirectes).

Le taux de pénétration du marché des systèmes d'air climatisé pour véhicules étant en pleine croissance en Europe, cela a pour effet d'augmenter les émissions du parc automobile malgré les efforts consentis notamment sur le plan de la consommation énergétique hors équipement.

Afin d'obtenir une meilleure compréhension des différents systèmes de climatisation du point de vue technologique et du point de vue des émissions liées à leur utilisation, une description technique est fournie ci-dessous.

B. Composition d'un système d'air climatisé

La composition type d'un système d'air climatisé (avec soupape d'expansion) pour véhicules est illustrée à la **Figure 1**. Sont représentés dans ce schéma : l'évaporateur (1), le compresseur (2), le condenseur (3), le déshydrateur (4) et le vase d'expansion (5).

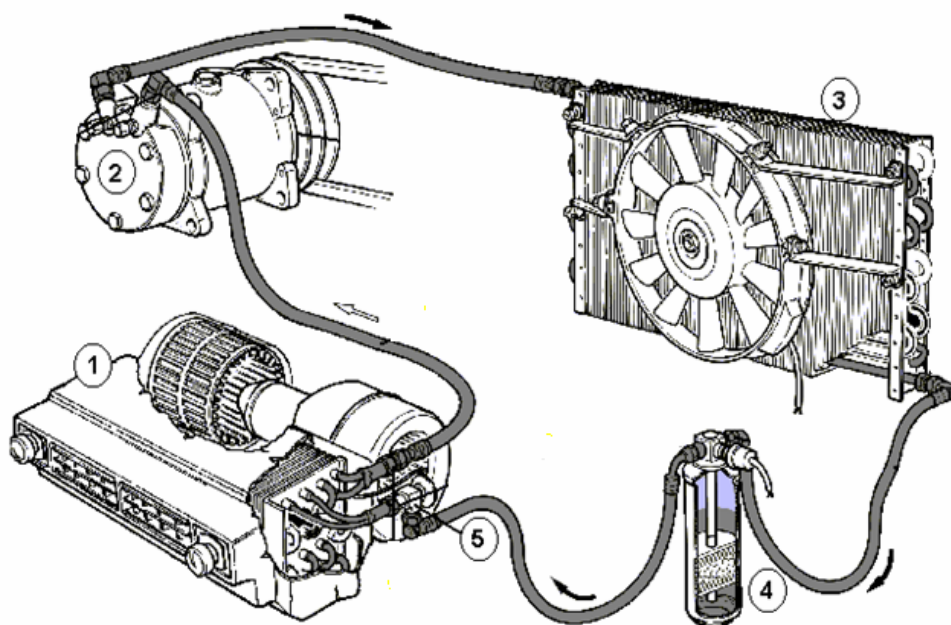


Figure 1 : Composition d'un système d'air climatisé et points sensibles en ce qui concerne les fuites [1].

Les compresseurs des systèmes de climatisation les plus récents sont montés sur le moteur et sont actionnés par le vilebrequin via une courroie de transmission. Le bloc-compresseur est équipé de joints afin de réduire au maximum les fuites de liquide réfrigérant. L'axe d'entraînement du compresseur est pourvu d'un joint pour les mêmes raisons. Les forces, agissant par la transmission à courroie, font en sorte que l'axe d'entraînement et les roulements du compresseur sont soumis à des tensions latérales, menant à ce que le système présente des fuites, plus particulièrement quand les joints commencent à vieillir.

Le condenseur est monté derrière la grille du capot de la voiture et devant le radiateur du système de refroidissement du moteur. Cette situation permet d'obtenir une bonne circulation de l'air, essentielle pour évacuer la chaleur venant de l'habitacle et de la compression du réfrigérant.

Le séparateur/déshydrateur, n'a pas de fonction thermodynamique directe dans le cycle de refroidissement de la vapeur. Il a cependant pour but de séparer les phases liquide et gazeuse pour que la soupape d'expansion ne contienne que du réfrigérant liquide. Il fait aussi office de filtre pour les impuretés qui se trouvent dans le réfrigérant. Souvent, le séparateur/déshydrateur est monté à proximité de l'évaporateur.

L'évaporateur est volontairement placé dans l'habitacle, à proximité de l'élément de chauffage qui y souffle de l'air extérieur ou de l'air recyclé dans le véhicule à l'aide d'un ventilateur.

Ces composants sont connectés entre eux par des conduites flexibles, souvent en matériaux synthétiques et caoutchouteux. Les connecteurs sont hermétiques mais jamais complètement imperméables et présentent donc généralement de petites fuites vers l'atmosphère.

C. Description du cycle thermodynamique des systèmes d'air climatisé dans les véhicules

La **Figure 2** décrit le cycle thermodynamique d'un système classique d'air climatisé pour véhicule [3].

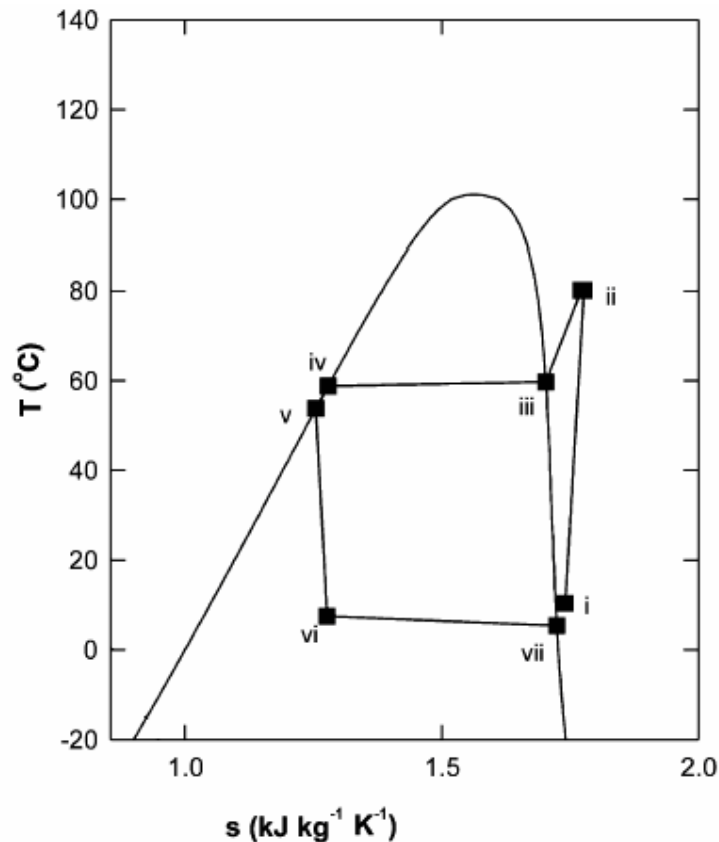


Figure 2 : Cycle thermodynamique du système R134a[2]

Les principes de base d'un système d'air climatisé sont décrits à l'aide du processus thermodynamique suivant :

- le compresseur de gaz comprime le réfrigérant (en condition de gaz saturé) ce qui a pour conséquence de faire monter la pression et la température du réfrigérant ;
- le réfrigérant surchauffé est condensé dans le condenseur où la chaleur qu'il contient est transférée vers l'environnement (à pression constante) ;
- alors que le réfrigérant refroidit dans le condenseur, il passe à l'état liquide et coule vers la soupape d'expansion ;
- lorsque le réfrigérant coule à travers la soupape d'expansion, il peut passer d'une zone de haute pression à une zone de basse pression (chute de pression isenthalpique due à une perte de charge dans la soupape d'expansion). L'entropie augmente durant l'expansion. Dans le domaine de coexistence, on voit que la température baisse alors qu'une évaporation partielle se produit ;

- dans l'évaporateur (zone de basse pression), le réfrigérant va à nouveau s'évaporer en absorbant de la chaleur et refroidir ainsi son environnement;
- pour finir, le réfrigérant coule vers l'entrée du compresseur afin que le cycle décrit ci-dessus puisse se répéter.

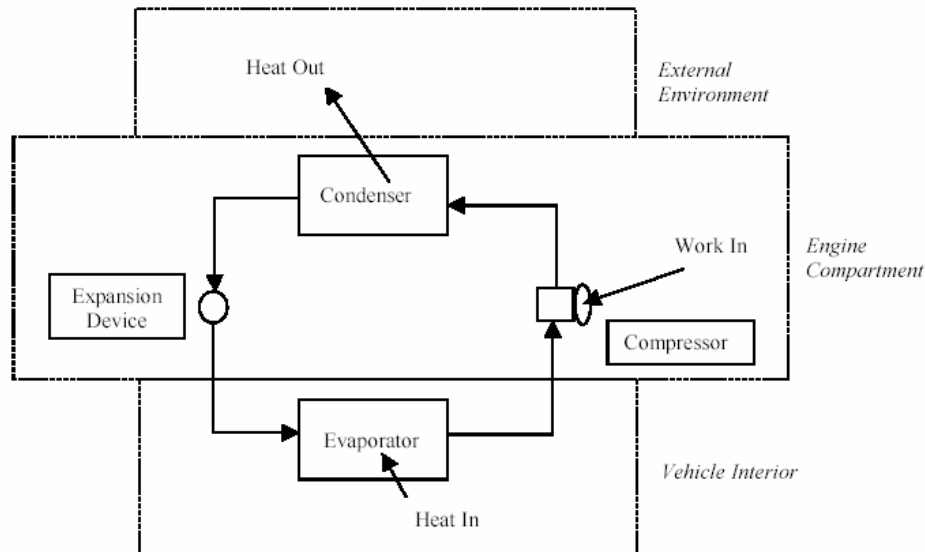


Figure 3 : Schéma principal du fonctionnement des systèmes d'air climatisé dans les véhicules [3]

Une pompe, actionnée par le moteur, compresse le liquide réfrigérant (vapeur), ce qui génère de la chaleur. Le réfrigérant est alors amené vers le condenseur où il est refroidi et est ramené à l'état liquide. A ce moment, le liquide réfrigérant rejette de l'énergie (qu'il a emmagasinée dans le compresseur) vers l'extérieur.

L'efficacité du cycle de refroidissement est représentée par un paramètre (Coefficient of Performance ou COP) qui est le rapport de la chaleur extraite de l'habitacle à la quantité de travail fournie par le compresseur.

Le liquide refroidi est vaporisé dans l'évaporateur, où il extrait la chaleur du flux d'air provenant de l'habitacle du véhicule. Par ailleurs, l'humidité est extraite de l'air refroidi, jusqu'au degré d'humidité souhaité.

Les évaporateurs et condenseurs consistent généralement en des échangeurs de chaleur de type "tube-and-fin". L'évaporateur se trouve dans le flux d'air entrant dans le système de chauffage. Comme le système de refroidissement ne peut pas être réglé de manière précise (en activant et désactivant le circuit de refroidissement), l'air est refroidi en dessous de la température souhaitée et est ensuite chauffé jusqu'à atteindre la température désirée.

Le système de contrôle automatique de la température est particulièrement utile dans les véhicules où il y a un système de climatisation et un système de chauffage. Ceci s'explique par le fait qu'il est parfois compliqué pour le conducteur de maintenir une température constante et adéquate [1].

D. Opération manuelle et automatique du système d'air climatisé

Ce paragraphe traite des principales différences entre les systèmes manuels et automatiques d'air climatisé automobiles. Une brève description des modes de fonctionnement de ces deux systèmes est présentée à cet effet.

Il est établi que le système d'air climatisé d'un véhicule ne peut fonctionner que lorsque le moteur du véhicule tourne.

En temps normal, le système d'air climatisé fonctionne de manière automatique. Il adaptera alors de lui-même les cinq paramètres suivants en fonction de la température souhaitée :

- le courant d'air ;
- la température de l'habitacle ;
- la répartition de l'air ;
- le conditionnement de l'air ;
- le recyclage de l'air de l'habitacle.

Lorsque le mode de fonctionnement manuel est utilisé, les paramètres mentionnés ci-dessus peuvent être réglés par l'utilisateur. Les paramètres précités seront analysés de manière plus détaillée ci-dessous.

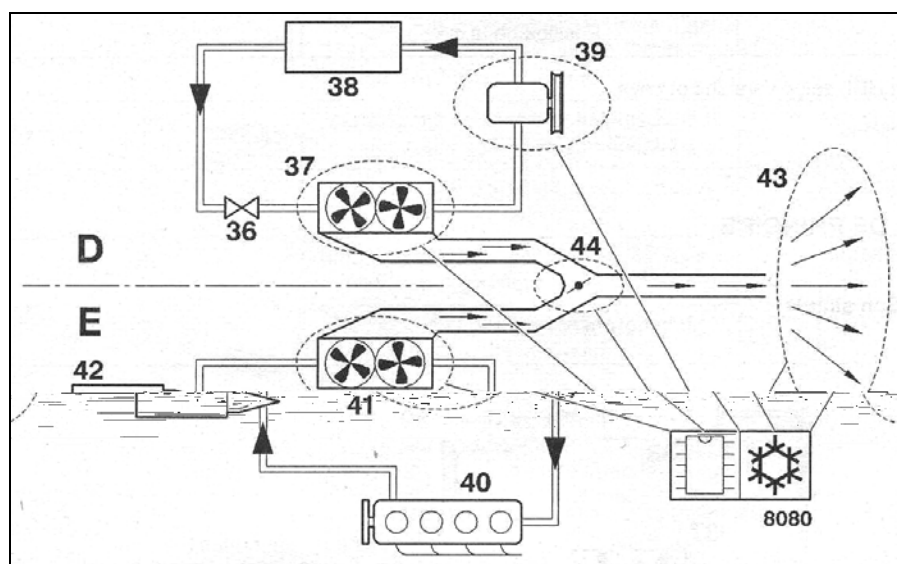


Figure 4 : Système d'air climatisé avec réglage automatique

La **Figure 4** présente un aperçu typique d'un circuit d'air chaud (E) et d'un circuit d'air froid (D) dans un véhicule [4]. La température de l'habitacle est réglée par la valve de régulation (44) du véhicule (43). En ce qui concerne les systèmes d'air climatisé automatiques, le 'controller' du système (8080) contrôle le compresseur (39), l'évaporateur (37), l'aérotherme (41) ainsi que la valve de régulation (44).

1. Le conditionnement de l'air

Selon ses préférences, le conducteur peut choisir d'enclencher le système de climatisation ou non. Dans certains modèles, le compresseur peut être découplé du moteur par un système électronique pour ne pas surcharger le moteur du véhicule.

2. Le recyclage de l'air

Selon ses préférences, le conducteur peut choisir un apport d'air extérieur ou un recyclage de l'air intérieur. Le recyclage de l'air permet d'obtenir la température souhaitée plus rapidement, mais son usage prolongé est déconseillé à cause du risque de formation de buée sur les vitres du véhicule.

3. Le courant d'air et la diffusion de l'air

La plupart du temps plusieurs directions de flux d'air sont disponibles et peuvent être choisis par le conducteur (pare-brise, jambes, milieu de tableau de bord, côté de tableau de bord, ...).

Souvent, l'apport d'air est également réglable manuellement. Le débit d'air le long de l'évaporateur peut ainsi être réglé par l'utilisateur.

E. Compresseurs pour systèmes d'air climatisé

Ce paragraphe contient un aperçu des différents types de compresseurs utilisés dans les systèmes de climatisation automobiles, ainsi que de leurs caractéristiques principales.

On distingue principalement deux types de compresseurs :

- compresseurs à course fixe ;
- compresseurs à course variable.

Il existe également des compresseurs électriques.

1. Compresseur à course fixe

Cette catégorie inclut les compresseurs dont la course n'est pas variable. Un bon équilibre entre les performances et la fiabilité fait en sorte que ces compresseurs sont utilisés pour un grand nombre d'applications.

2. Compresseur à course variable

Le mouvement des cylindres des compresseurs à course variable peut être réglé. Ceci permet une plus grande stabilité de la température ainsi qu'un plus grand confort de conduite.

La différence majeure par rapport aux compresseurs à course fixe est qu'ils contiennent un cylindre de réglage et qui ne participe pas de manière active à la compression. Ceci implique un poids plus important à puissance de compression égale.

Le contrôle de la course peut s'effectuer de manière interne ou externe.

Lorsque le contrôle du compresseur s'effectue de manière interne, la capacité optimale du compresseur est réglée par rapport à la charge thermique de ce compresseur. Ceci se fait à

l'aide d'une valve de contrôle qui mesure les variations de pression du réfrigérant entrant. Cela permet donc un fonctionnement progressif et continu ainsi qu'un réglage rapide de la température.

Lorsque le contrôle du compresseur s'effectue de manière externe, un signal électrique est envoyé vers la valve de contrôle du compresseur. Ce signal provient de l'extérieur du compresseur. Cela permet, par exemple, une communication avec le système de management du moteur, ce qui à son tour permet un contrôle précis et optimal du volume. Ce système permet de faire des économies d'énergie substantielles par rapport aux compresseurs classiques.

3. Compresseur électrique

Il existe également des compresseurs électriques. Ces compresseurs ne sont pas reliés mécaniquement au moteur thermique, mais sont actionnés par un moteur électrique. Ceci permet un fonctionnement indépendant du moteur thermique et donc un fonctionnement plus efficient. Comme ce type de compresseur contient son propre moteur électrique à bord, les problèmes d'étanchéité des axes peuvent être évités et les fuites de réfrigérant peuvent donc être également diminuées.

F. Réfrigérants potentiels

Depuis 1995, les unités de refroidissement actionnées par compresseur (type R12, un réfrigérant de type chlorofluorocarbure ou CFC) ont été bannies en faveur de liquides moins dommageables pour l'environnement (la couche d'ozone) comme le R134a. Compte tenu du pouvoir de réchauffement du R-12 (formule : CF_2Cl_2), de nouveaux liquides réfrigérants (HFC-134a, HFC-152a, hydrocarbures, R-744, ...) sont proposés comme alternatives possibles.

Dans le cadre de la réduction des gaz à effet de serre fluorés, la Commission Européenne a formulé une proposition de base pour une directive qui a pour but d'imposer l'utilisation de technologies avancées pour les systèmes de climatisation dans les véhicules neufs.

Toutes les voitures particulières et tous les véhicules utilitaires légers neufs équipés de systèmes de climatisation contenant des gaz fluorés dont le potentiel de réchauffement planétaire est supérieur à 150 (comme à l'heure actuelle, le HFC-134a) qui sont mis sur le marché doivent respecter un taux de fuite maximal. Le taux de fuite ne doit pas dépasser les 40 grammes de gaz fluorés par an pour un évaporateur « simple effet » et 60 grammes de gaz fluorés par an pour un évaporateur « double effet ». Les responsables de la mise sur le marché de ces véhicules doivent faire procéder à une vérification des taux de fuite par un organisme indépendant.

La mise sur le marché de véhicules neufs munis de systèmes de climatisation fonctionnant aux gaz fluorés, dont le potentiel de réchauffement planétaire est supérieur à 150, sera progressivement interdite⁶ entre le 1^{er} janvier 2007 et le 1^{er} janvier 2017.

⁶ Conseil de l'Union Européenne, *Proposition de directive du parlement européen et du conseil concernant les émissions provenant des systèmes de climatisation des véhicules à moteur et modifiant la directive 70/156/CEE du Conseil*, Bruxelles, 18 octobre, 11pages.
URL : http://www.euractiv.com/29/images/F-gasProposal_tcm29-130804.pdf

Il importe que les consommateurs soient informés sur le type de réfrigérant utilisé dans le système mobile de climatisation du véhicule [5].

A titre d'exemple, on peut citer les réfrigérants suivants comme alternatives au CFC-12:

- R-134a (actuellement le réfrigérant le plus utilisé pour les systèmes de climatisation automobiles ;
- R-413a (uniquement comme réfrigérant de remplacement pour les systèmes existants) ;
- R-152a ;
- Hydrocarbures (par exemple les mélanges propane/isobutane comme CARE30) ;
- R-744.

1. Système actuel d'air climatisé au R-134a

Les systèmes actuels d'air climatisé utilisent le réfrigérant R-134a (formule : $C_2H_2F_4$) et recourent à un cycle de refroidissement de vapeurs. La température critique du R-134a est de $101,1^\circ C$, ce qui est suffisant pour rendre possible un fonctionnement à une température subcritique lors de températures ambiantes normales.

La pression critique est de 40,6 bars. Lorsque le système n'est pas en fonctionnement, la pression se situe dans un intervalle allant de 3,4 à 6,8 bars, en fonction de la température. Lorsque le système est en fonctionnement, la pression de décharge du compresseur va de 13,6 à 20,4 bars. La température de l'air climatisé qui sort de l'évaporateur se situe entre $1,6$ et $4,4^\circ C$ (la température de l'évaporateur est soumise à certaines limites pour éviter la formation de glace sur les échangeurs de chaleur).

2. Système d'air climatisé au R-152a

Le R-152a (formule : $C_2H_4F_2$) est un réfrigérant aux caractéristiques thermodynamiques comparables à celles du R-134a qui est largement utilisé actuellement. Pour cette raison, il a le grand avantage que seule une légère adaptation des systèmes d'air climatisé est suffisante. Les caractéristiques thermodynamiques de ce réfrigérant sont comparables au R-134a, sinon meilleures, conservant ainsi des températures et pressions de travail similaires.

La température critique du R-152a est de $113,3^\circ C$ et la pression critique est de 45,2 bars, alors qu'ils sont de $101,5^\circ C$ et 40,7 bars respectivement pour le R-134a. Le R-152a est un réfrigérant inflammable, ce qui implique la nécessité de mesures de sécurité supplémentaires sur le plan du design, de l'utilisation et de l'entretien du système. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle un double circuit d'échange de chaleur a été installé. Afin d'éviter que le R-152a ne se retrouve à l'intérieur de l'habitacle. Le schéma d'un tel système est présenté dans la figure ci-après [2].

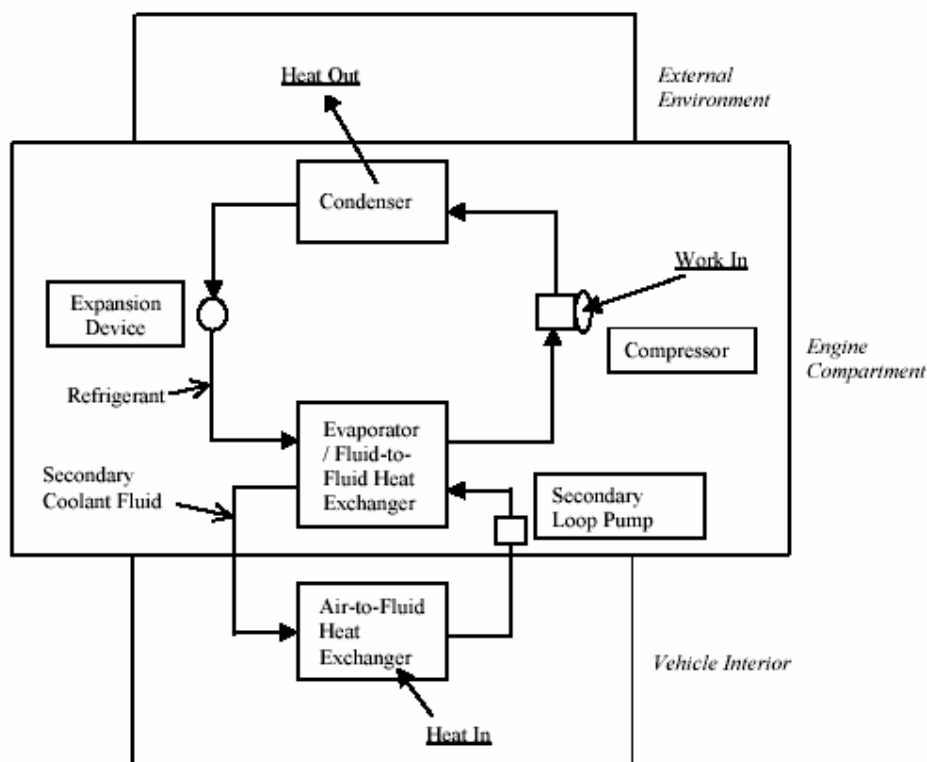


Figure 5 : Schéma principal du fonctionnement des systèmes à boucle double

Ceci a forcément des répercussions sur le poids total et le niveau de complexité du système, ce qui à son tour se répercute sur le coût et l'efficacité. Par contre, un avantage de ce système est l'inertie thermique plus élevée due à l'application d'un double circuit d'échange de chaleur, améliorant ainsi les performances du système, lorsque le véhicule se trouve dans des conditions de roulage à faible vitesse ou à l'arrêt (embouteillages, circulation urbaine, propulsion avec arrêt du moteur en cas de fonctionnement à vide).

3. Système d'air climatisé aux hydrocarbures

Les principaux avantages d'un système de climatisation aux hydrocarbures (formule : C_xH_y) sont les suivants :

- les hydrocarbures sont souvent des produits familiers dans l'industrie.

Par exemple, le propane et l'isobutane ont de bonnes caractéristiques techniques et thermodynamiques en tant que réfrigérants. Cela fait en sorte qu'une quantité de réfrigérant nettement plus limitée est requise par rapport à un système au CFC-12 ou au HFC-134a.

- l'efficacité énergétique des installations de climatisation au propane/isobutane est aussi bonne que celle des systèmes fonctionnant à l'aide de CFC ou de HFC-134a.

Un inconvénient important des hydrocarbures utilisés comme réfrigérants pour les systèmes mobiles de climatisation automobile est la sécurité. Les hydrocarbures sont des produits combustibles et très souvent inflammables.

Certains constructeurs automobiles font d'importants efforts pour améliorer la sécurité de ces réfrigérants inflammables.

Afin de réduire les risques, il est impératif d'ajouter un circuit de refroidissement secondaire avec un liquide caloporteur, comme par exemple un mélange d'eau déminéralisée et d'éther de glycol, qui transmet le froid du réfrigérant à l'habitacle. De cette manière, le réfrigérant inflammable n'entre à aucun moment dans l'habitacle. Des circuits intrinsèquement sûrs (sans étincelles) sont également requis pour pouvoir garantir la sécurité.

Pour finir, en ce qui concerne le prix de la transformation d'un système au CFC-12 vers un système fonctionnant avec un mélange propane et butane (i.e. CARE30), cette transformation est jusqu'à quatre fois moins chère que la transformation vers un système au HFC-134a. Par contre, les équipements requis en matière de sécurité engendrent un coût supplémentaire.

4. Système d'air climatisé au R-744

Les systèmes d'air climatisé au R-744 (formule: CO₂) sont basés sur un cycle de refroidissement transcritique. Le principal avantage de ce genre de système est le faible potentiel de réchauffement climatique global (GWP ou Global Warming Potential) du R-744 par rapport aux autres réfrigérants. Le R-744 peut être récupéré comme coproduit d'autres procédés et utilisé comme réfrigérant. Dans ce cas précis, les fuites ne sont pas considérées comme des émissions supplémentaires.

En ce qui concerne les composants, la plus grande différence entre le R-744 et les autres réfrigérants se situe au niveau du condenseur (pour le système classique au R-134a) qui est remplacé par un refroidisseur de gaz (cf. le système est basé sur un cycle transcritique). Ensuite, le système de refroidissement au R-744 se caractérise par des pressions de travail assez importantes, qui peuvent être jusqu'à cinq fois plus élevées que celles d'un système au R-134a. C'est la raison pour laquelle tous les composants doivent présenter une résistance plus élevée. La complexité et le poids du système s'en trouvent augmentés, ce qui se répercute sur le prix et la consommation.

Le R-744 est inodore, incolore et insipide. Dans des concentrations élevées, certains problèmes de sécurité peuvent se poser, il faut donc en tenir compte (détecteur de CO₂ dans l'habitacle, double circuit de refroidissement, etc.). Des compresseurs hermétiques au R-744 sont requis avant de passer à une application des ces systèmes à grande échelle. Il est indispensable de disposer de valves, de matériaux d'isolation et d'appareils de réglage adaptés aux pressions élevées du système.

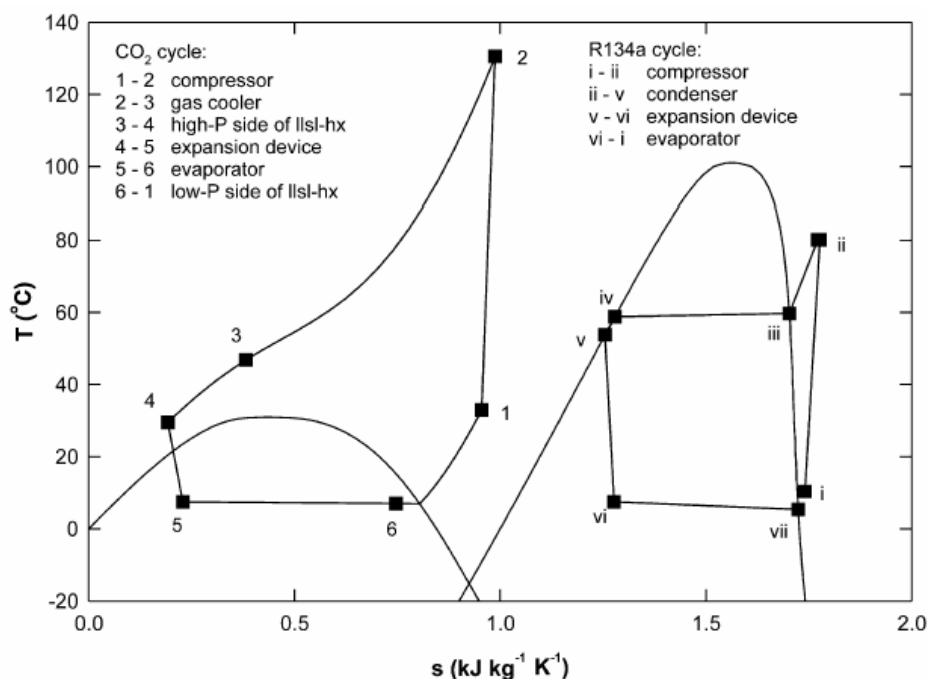


Figure 6 : Cycle transcritique du R-744 et subcritique du R-134a

La figure ci-dessus représente les cycles de refroidissement supercritiques R-744 et R-134a dans un plan température-entropie. Il apparaît clairement que la température atteinte par le système R-744 est plus élevée que la température atteinte par le système R-134a. Ce système se caractérise également par une pression de travail plus élevée et de meilleures propriétés de transport. Cela permet de concevoir ces systèmes de manière plus compacte.

La différence principale avec le cycle de compression de vapeur classique est que lorsqu'une température élevée est atteinte, un refroidissement supercritique se produit et non une condensation. Cela signifie que le changement de phase se produit à une température supérieure à la température critique (à cette température critique, on ne peut distinguer les phases gazeuse et liquide).

Le cycle supercritique R-744 ne présente pas de glissement de température lorsque le réfrigérant est soumis à des températures très basses (à l'instar de tous les liquides purs, une évaporation à lieu à température constante). A température élevée, un intervalle important de températures est parcouru (par exemple 40-93°C), de cette façon le système peut également faire office de pompe à chaleur (échange de chaleur à contre-courant avec le circuit d'eau chaude).

Ceci est un avantage important lors de l'application de ce système dans les véhicules électriques, hybrides et à pile à combustible.

Les tests de fabricants individuels ont démontré qu'un système d'air climatisé R-744 consomme moins d'énergie (donc de carburant) qu'un système traditionnel HFC-134a à des températures allant jusqu'à 30°C, dans des conditions de roulage typiques pour l'Europe.

A des températures plus élevées (surtout à faible vitesse), un système R-744 consomme plus d'énergie qu'un système HFC-134a. L'effet refroidissant (mesure pour le rendement) dans le cycle de compression de vapeur est effectivement plus faible que celui des réfrigérants synthétiques.

V. Améliorations potentielles des systèmes existants

En plus du remplacement des systèmes de climatisation actuels par des systèmes alternatifs, des améliorations peuvent également être apportées aux systèmes actuels. De plus ces améliorations peuvent aussi être utilisées pour optimiser les systèmes alternatifs.

A. Systèmes R-134a améliorés

Les systèmes R-134a améliorés sont basés sur les systèmes classiques et les plus utilisés actuellement, mais contiennent des améliorations au niveau des composants afin de minimaliser ou d'éviter les fuites de réfrigérant. Ils utilisent donc le même réfrigérant mais présentent un débit de fuites moins élevé. De plus, ils diminuent la surcharge causée par les systèmes de climatisation sur les moteurs. Les différents constructeurs ont des approches différentes pour améliorer les systèmes d'air climatisé R-134a. De manière générale, les connexions et joints sont perçus comme un moyen de diminuer le débit des fuites. Une amélioration des joints du compresseur est généralement perçue comme une amélioration indispensable (multi-layer barrier, low permeability thermoplastics). Ces améliorations technologiques devraient être reprises pour les autres systèmes ainsi que pour les systèmes utilisant d'autres réfrigérants.

Afin de poursuivre la réduction des émissions indirectes, il est nécessaire d'utiliser des compresseurs à course variable (voir la section E.2. du chapitre précédent), ainsi que des condenseurs et des évaporateurs avec de meilleures capacités et efficacités de transfert de chaleur. Les systèmes R-134a améliorés seront prêts pour la production à court terme (1 à 3 ans). L'application plus poussée du R-134a requiert une analyse et une amélioration de la récupération et du recyclage lors de l'entretien et de la fin de vie.

VI. De nouveaux liquides réfrigérants pour l'avenir

Cette partie synthétise les connaissances actuelles sur le sujet. Elle est basée sur une analyse de la littérature de même que sur les informations recueillies au travers d'une série d'interviews⁷ effectuée auprès de divers importateurs et garages automobiles.

Il ressort de notre enquête auprès des importateurs automobiles que tous les systèmes actuels de climatisation automobile fonctionnent au R134a⁸, remplaçant depuis quelques années le R12 (CFC) interdit depuis 2000 par le Protocole de Montréal (1987).

Le R134a est un gaz fluoré ayant un PRP de 1300 et dont les fuites annuelles sont estimées en UE entre 31 et 53 millions de tonnes équivalent CO₂ à l'horizon 2010 (Commission Européenne, 2003). Il constitue donc un polluant majeur de l'atmosphère pour la question du réchauffement planétaire.

C'est pourquoi deux textes juridiques européens⁹ en voie d'adoption prévoient des mesures visant la diminution des émissions de ce gaz ainsi que son élimination progressive jusqu'à sa complète interdiction pour l'année 2017.

L'entrée en vigueur de ces textes d'ici l'année 2005 va donner une impulsion au développement ainsi qu'à la commercialisation de systèmes de climatisation automobile utilisant des liquides réfrigérants alternatifs, à savoir le HFC 152a, le CO₂ (R 744) et des hydrocarbures (propane R290 et cyclopropane RC270). Le principal atout de ces fluides alternatifs réside dans la réduction ou l'élimination des émissions directes de GES dans l'atmosphère.

Une première solution, dans l'attente d'une transition définitive vers des réfrigérants alternatifs, est celle offerte par l'option du HFC 134a « amélioré ». Elle consiste, pour l'essentiel, en un ensemble d'améliorations techniques (production, station de recharge, composants du circuit) visant le confinement du gaz et donc la réduction des émissions directes. Cette voie ne permettrait pas une diminution des émissions indirectes.

Le HFC 152a et le HFC 134a sont des gaz similaires. Le HFC 152a a été retenu comme alternative au HFC 134a, d'une part, de par son PRP dix fois plus faible par rapport à ce dernier (120 contre 1300) et, d'autre part, par la similarité d'utilisation dans les systèmes actuels. De plus, le HFC 152a permet une performance de refroidissement ainsi qu'une efficacité énergétique nettement plus élevée dans le cas où une deuxième boucle (sécurité-inflammabilité) doit être installée.

Par contre, le principal désavantage de ce gaz réside dans le fait qu'il présente un risque d'inflammabilité et que donc les systèmes employant ce gaz doivent être munis d'un équipement de sécurité additionnel.

A côté des HFC, une autre option réalisable est celle du CO₂.

⁷ Voir Annexe V: collecte de données, interview et enquêtes.

⁸ Dans la littérature, on peut également le trouver sous la dénomination HFC 134a.

⁹ Proposition de règlement du Parlement Européen et du Conseil relatif à certains gaz à effet de serre fluorés et Proposition de directive du Parlement Européen et du Conseil concernant les émissions provenant des systèmes de climatisation des véhicules à moteur et modifiant la directive 70/156/CEE du Conseil.

Le principal avantage qu'offre la filière de CO₂ est l'élimination complète des émissions de HFC. De plus, comme ce réfrigérant est un coproduit dans diverses industries, sa production n'entraînerait qu'une consommation d'énergie très faible. Ce gaz est ininflammable.

Les circuits de refroidissement activés au CO₂ présentent néanmoins des problèmes de sécurité liés aux pressions élevées dans le circuit. On s'interroge également quant à l'efficacité énergétique réelle de cette technologie (efficacité réduite avec une température élevée extérieure) de même de l'éventuel surpoids de l'installation.

Enfin, il reste l'option des hydrocarbures. Bien qu'ils permettraient d'éliminer l'ensemble des émissions directes, ils induiraient une demande énergétique supplémentaire et conduiraient donc à augmenter les émissions indirectes. Cette inefficacité énergétique s'explique par l'instauration d'une deuxième boucle dans le circuit afin de garantir la sécurité des passagers face à la forte inflammabilité de ce gaz.

Vu que les circuits de froid utilisant ces trois options de réfrigérants alternatifs se trouvent encore au stade de prototype et que leur commercialisation n'est prévue au plus tôt qu'à partir de 2005, il ne nous a pas été possible de connaître avec précision les réductions d'émissions ainsi que les surcoûts associés à ces options.

Toutefois quelques estimations collectées à partir de quelques documents de la Commission Européenne fournissent une indication (voir **Tableau 1**).

Gaz réfrigérant	Réduction émissions directes	Réduction émissions indirectes	Surcoût CO ₂ évité
HFC 134a	référence	référence	référence
HFC 134a amélioré	50%	25%	20 €
HFC 152a	95%	0-10%	15 €
CO ₂	100%	<20%	65-215€
HC	100%	/	30-50€

Source : Commission Européenne 2003

Tableau 1 : Réductions d'émissions et surcoûts des gaz alternatifs au R134a

D'après les déclarations des représentants de la profession, il semble qu'en Europe ce soit la filière CO₂ qui viendra progressivement remplacer le HFC 134a. Ainsi, les constructeurs des marques Toyota, Volkswagen, Audi, Daimler Chrysler et BMW prévoient une introduction progressive par modèle de voiture à partir de 2005.

A vu de ces différents éléments, nous pouvons conclure que, sous l'impulsion de la voie législative européenne, de nouvelles options vont émerger sur le marché. Même si toutes offrent une solution en termes de réduction d'émissions directes, elles entraînent dans l'intégralité un surcoût économique et certaines souffrent encore de limites techniques.

Après cet aperçu sur le fonctionnement des systèmes d'air conditionné automobile, nous allons dresser le bilan des avantages et inconvénients qu'ils présentent en terme de bien-être et de santé.

VII. Bilan des avantages et inconvénients de l'air conditionné automobile (santé, confort)

L'objectif de ce chapitre est de faire la synthèse des connaissances sur les effets sanitaires liés à l'utilisation du conditionnement d'air sur les véhicules. Nous dressons, dans une première partie, un aperçu synthétique des avantages de la climatisation automobile.

Le bilan qui en résulte constitue également un argument de sensibilisation pour le consommateur dans son choix du véhicule le plus respectueux de l'environnement.

A. Avantages de la climatisation automobile

Le conditionnement d'air automobile a été essentiellement développé dans la finalité de fournir un confort supplémentaire aux passagers du véhicule.

En outre, il offre aussi certains avantages en termes de sécurité routière.

1. Sécurité routière et confort de conduite

D'après Jean-Philippe Brothier [6], les principaux avantages que présente la climatisation pour le conducteur se situent au niveau de la sécurité et du confort.

Ainsi, l'air conditionné apporte au conducteur :

- une meilleure visibilité : par temps froid et humide, l'air conditionné réduit la formation de buée et de givre sur les vitres. Pour éviter ces dépôts, le système assèche en effet l'air et réchauffe rapidement les surfaces.
- un maintien de la vigilance : un excès de température dans l'habitacle a tendance à endormir le conducteur. Le système permet de maintenir une température choisie constante qui peut entraîner une diminution de la fatigue au volant et une meilleure attention portée par le conducteur à la conduite.
- un confort de conduite : le conducteur n'a plus besoin de se soucier des réglages habituels de température et de ventilation nécessaires, consécutifs aux variations climatiques extérieures. Il peut mieux se concentrer sur la conduite.
- une sensation de bien-être des passagers : le système va neutraliser les effets de chaleur, de froid et d'humidité et produire une température et un degré d'humidité correspondant au sentiment de bien-être propre à chaque conducteur.

B. Effets négatifs de l'air conditionné sur la santé

Dans la perspective de sensibilisation des consommateurs aux problèmes posés par la climatisation automobile, les effets sanitaires néfastes constituent un argument significatif de sensibilisation.

Bien qu'elle offre certains avantages, la climatisation peut également poser des problèmes de santé. Ces derniers peuvent être directement ou indirectement liés à l'utilisation de la boucle du froid.

1. Effets directs

Les effets directs sanitaires de l'air conditionné peuvent être répartis en trois catégories : pathologies liées à la biocontamination des systèmes d'aération, celles liées aux chocs thermiques et les risques d'exposition au liquide réfrigérant de la boucle du froid.

Il faut savoir que les sources de données scientifiques sur les effets directs négatifs sont rares et peu accessibles du fait de la spécificité du sujet. Toutefois, une recherche approfondie a permis de réunir une série d'articles parmi les plus pertinents sur la biocontamination. En ce qui concerne les pathologies induites par les chocs thermiques, il ne nous a pas été possible de trouver de références bibliographiques sur la question.

A notre connaissance, il n'existe, à l'heure actuelle, aucune publication synthétique traitant des effets sanitaires directs de l'air conditionné automobile. L'analyse du sujet requiert l'étude séparée des divers domaines, sachant que chaque domaine représente en soi un projet de recherche sur le long terme.

Le temps imparti pour la réalisation de ce projet ne nous permettant pas de procéder à ce type de recherche, nous proposons de passer en revue les différents articles spécifiques qui traitent des aspects santé de l'air conditionné automobile.

a) Qualité de l'air : contamination par les micro-organismes

Une série d'études ([7],[8],[9],[10], [11]) de même que les déclarations des experts interrogés par nos soins (garages d'entretien, spécialiste climatisation, etc.) confirment la présence de micro-organismes induite par le circuit de conditionnement d'air.

Notons d'emblée que les publications concernant ce sujet sont peu nombreuses de même que peu récentes et qu'il conviendrait dès lors d'en approfondir l'étude pour pouvoir se prononcer davantage.

Il ressort de ces différentes sources que les principaux vecteurs de contamination sont les moisissures (champignons) et les actinomycètes (bactéries). Ces derniers sont des bactéries dont la croissance donne lieu à des colonies constituées de hyphes (similarité avec les champignons).

Deux zones particulières du système d'aération sont propices à la croissance de colonies de moisissures et de bactéries : l'évaporateur et le canal d'évacuation des résidus de condensation.

Au niveau de l'évaporateur, l'eau condensée sur ses lamelles ne s'évacue pas entièrement par le canal d'évacuation des résidus de condensation : une partie reste fixée sur les lamelles. Lorsque le cycle du froid n'est pas enclenché, la température autour de l'évaporateur se situe dans un intervalle de 10°C à 35°C propice au développement de micro-organismes. Néanmoins, dès que le système est remis en marche la température autour de l'évaporateur baisse et inhibe le développement des biocontaminants. Même si ces micro-organismes sont dès lors tués, leurs résidus subsistent dans le système et forment des poussières qui seront réinjectées dans l'air de l'habitacle et pourront causer des irritations ou allergies. De plus, certains champignons et bactéries excrètent des toxines (mycotoxines pour les champignons, endotoxines et exotoxines pour les bactéries) et peuvent ainsi, même après leur mort, contaminer les individus. En outre, certains champignons produisent des substances cancérogènes et mutagènes.

Au niveau du canal d'évacuation des résidus de condensation il faut compter avec l'obstruction provoquée par les feuilles mortes, la sédimentation de poussières et autres résidus solides entrant dans le système par la voie d'entrée de l'air extérieur. Les condensats s'accumulent fournissant ainsi un environnement favorable au développement de cultures microbiennes et fongiques.

Notons que les condensats pourraient fournir un milieu favorable au développement de la bactérie *Legionella pneumophila* responsable de la légionellose. Cependant les tests de détection de cette bactérie menés dans les quelques études épidémiologiques réalisées jusqu'à présent se sont avérés négatifs.

Les différents tests de contrôle de la contamination de l'air menés lors des diverses études mentionnées ci-dessus ont tous identifié les champignons suivants : penicillium, aspergillus, alternaria et cladosporium. Les pathologies associées à ces micro-organismes seront exposées au point suivant.

Soulignons d'emblée que lors de l'étude environnementale menée par Kumar en 1984 [8] sur les 25 voitures¹⁰ testées par rapport à la présence de micro-organismes, 22 présentaient des résultats positifs pour diverses espèces fongiques et bactériennes.

Il est à noter que d'ultérieurs tests de contamination de l'air entrepris par Kumar [9] ont révélé une contamination de l'air intérieur (en ufc¹¹) nettement inférieure à celle de l'air extérieur. On est, dès lors, porté à s'interroger sur la manifestation des réactions allergiques. Une explication à l'apparition de symptômes pourrait être fournie par la concomitance entre la projection directe des particules au niveau du visage des passagers et leur combinaison à l'air froid.

S'ajoute à cela le fait que les tests de contamination de l'air effectués avec un filtre à particule ont dénombré des ufc en quantité moindre que dans les autres conditions¹² de tests. Ainsi, l'application d'un filtre semble constituer un moyen efficace pour amoindrir la contamination particulaire de l'habitacle. Néanmoins, ces filtres, afin de conserver leur efficacité et garantir une bonne qualité de l'air dans l'habitacle, doivent être changés régulièrement (on recommande une fois par an) sous peine de ne plus rien filtrer (colmatage). Jusqu'à présent l'entretien régulier du système de climatisation ne s'est pas

¹⁰ Ces 25 voitures appartenaient à des sujets souffrant d'une aggravation des symptômes allergiques dont on n'arrivait pas à déterminer la cause.

¹¹ Unités formant Colonies. Les unités formant colonies (ufc ou cfu en anglais) sont les unités employées en microbiologie pour exprimer la quantité approximative de microorganismes dénombrés dans un milieu.

¹² Quatre conditions de test : air conditionné inactivé, air conditionné « ventilation », air conditionné « normal » et air conditionné avec filtre.

encore généralisé auprès des automobilistes. Il se peut ainsi que des systèmes encrassés injectent dans l'habitacle des particules allergisantes (poussières, micro-organismes, pollens) et autres polluants conduisant ainsi à dégrader la qualité de l'air intérieur et donc à provoquer l'effet inverse attendu.

La présence d'une contamination par les moisissures dans le système se manifeste le plus généralement par l'émanation d'odeurs provenant du système d'aération.

Pour éliminer ces moisissures, il faut procéder à une désinfection complète du système, ce qui exige un démontage complet du tableau de bord ainsi que du circuit de ventilation. Or, d'après les garagistes spécialisés dans l'air conditionné que nous avons interrogés, cette opération est très coûteuse (une journée de travail au moins) et est effectuée de façon exceptionnelle. De ce fait, des garagistes peu consciencieux se contentent de vaporiser un spray biocide au niveau de la bouche d'aération, ce qui n'élimine qu'une infime partie des contaminants.

D'autre part cette opération de nettoyage ne permet pas d'éradiquer la contamination. En effet, lors de tests de détection de champignons menés trois semaines après le nettoyage des évaporateurs de quatre voitures contaminées [9], ceux-ci indiquaient la présence de colonies de champignons en quantités inférieures toutefois à celles prévalant avant désinfection.

Ainsi, l'opération de nettoyage permet d'atténuer la contamination sans pour autant permettre son élimination intégrale.

(1) Allergies, maladies respiratoires induites par la biocontamination de l'air

La biocontamination du circuit d'aération est à l'origine de réactions allergiques ainsi que diverses maladies respiratoires. Elle peut induire l'apparition de symptômes au niveau des voies respiratoires supérieures et inférieures.

Les majeurs résultats des études entreprises par Kumar [7][8][9] et Santili [10] révèlent que la contamination fongique et bactérienne conduit à l'exacerbation des symptômes respiratoires auprès des patients sensibles. Ainsi, les personnes sujettes à des allergies sont donc plus susceptibles de réagir à cette contamination.

Les principales pathologies identifiées au travers de ces études sont les suivantes.

En 1981, un cas de pneumonite hypersensible dû à la contamination par *thermophilactinomycetes candidus* a été identifié par Kumar. La pneumonite hypersensible est une inflammation des poumons (généralement des voies respiratoires les plus fines) due à la réaction du système immunitaire à des particules d'origine aérienne (ici, bactéries et moisissures). Cette pathologie se présente sous forme aiguë ou chronique. La forme aiguë apparaît généralement de 4-12 heures après l'exposition intense aux particules et présente les symptômes suivants : fièvre, frissons, toux, souffle court, courbatures. Des radiographies peuvent mettre en évidence l'apparition de petits nodules pulmonaires.

Sous sa forme chronique, la pneumonite hypersensible provoque des marques sur les poumons (fibroses), des symptômes de souffle court et de la toux.

Les expériences menées par Kumar [9] indiquent clairement que l'exposition aux moisissures contaminant les systèmes d'aération automobile entraîne également une amplification des symptômes auprès des patients souffrant de rhinites allergiques et d'asthme.

N'étant pas parvenu à obtenir des études spécifiques portant sur le risque sanitaire associé à l'exposition aux *cladosporium*, *alternaria*, *aspergillus* et *penicillium* (identifiées par les études mentionnées plus haut) contaminant les systèmes d'aération automobile, nous avons ci-dessous présenté synthétiquement les différentes pathologies qui peuvent leur être imputées [12].

Notons d'emblée que chacun des genres de biocontaminants regroupe de multiples espèces ayant des effets divers sur la santé humaine.

- *Claudosporium*

Quelques espèces sont saprophytiques et ne sont pas importantes dans les maladies chez les humains ou dans les maladies de plantes. D'autres espèces peuvent causer des infections systémiques où l'inhalation initiale mène aux infections pulmonaires qui se propagent à d'autres organes, parfois même au cerveau. Ce processus devient plus fréquent chez les patients souffrant d'immunodéficiência. Certaines espèces peuvent causer des infections profondes de la peau et elles peuvent envahir le système nerveux central. Elles peuvent causer des sinusites, des maladies respiratoires et des mycoses sous-cutanées.

Les espèces dans les échantillons d'air sont impossibles à différencier au microscope. Il est donc impossible de séparer les espèces non pathogènes de celles potentiellement pathogènes. Cependant, le *cladosporium* peut produire des spores en nombre tellement élevé qu'il devrait probablement toujours être considéré comme une source possible d'infection, lorsqu'on soupçonne la présence de mycètes.

- *Alternaria*

Les spores sont souvent la cause de sinusites, de la fièvre des foins et de l'asthme. Elles peuvent également causer une kératomycose, des infections de peau, une ostéomyélite, des maladies pulmonaires et une infection des septums nasaux.

- *Aspergillus*

Aspergillus est un champignon filamenteux, encore appelé moisissure, rencontré dans le monde entier. Il se développe sur la matière organique en décomposition dans le sol. Lors de sa croissance saprophyte, il produit des millions de spores (ou conidies) qui sont véhiculées par l'air et sont inhalées par tous les individus. A cause de leur petite taille, les spores atteignent tous les compartiments du poumon. Ce champignon reste totalement inoffensif pour la majorité de la population. Il est normalement éliminé par les défenses naturelles de l'homme. Cependant, un petit nombre d'espèces capables de se développer à 37°C (température du corps humain) peuvent provoquer des maladies (mycoses) chez l'homme et l'animal.

Les mycoses causées par *Aspergillus* sont appelées aspergilloses. Il en existe plusieurs formes qui vont d'une maladie de type allergique à une infection généralisée gravissime, le plus souvent mortelle. La sévérité de l'aspergillose dépend de plusieurs facteurs parmi lesquels le plus important est l'état du système immunitaire de la personne infectée.

Les espèces du genre *Aspergillus* produisent quelques unes des mycotoxines les plus importantes parmi lesquelles les aflatoxines (*A. flavus*, *A. parasiticus*) ou l'ochratoxine (*A. ochraceus*). *A. fumigatus* produit aussi des substances antibiotiques plus ou moins toxiques: des polycétones (fumigatine, spinulosine), des terpénoïdes (acide helvolique, fumagilline) une épithiadiodioxopipérazine, la gliotoxine et des alcaloïdes neurotoxiques (fumigaclavines, fumitrémorgines). Parmi ces mycotoxines, seule la gliotoxine semble pouvoir jouer un rôle dans le phénomène infectieux.

- *Penicillium*

Des infections sont habituellement provoquées par l'inhalation des spores. Cela commence par une maladie pulmonaire, mais l'infection peut se propager dans les vaisseaux sanguins adjacents et se disséminer au reste du corps. L'invasion totale se produit chez les patients faibles et peut aussi se produire chez les individus immunocompétents (avec des systèmes immunitaires sains). Les espèces de *Penicillium* causent la kératomycose (inflammation de la cornée), le penicilliosis, l'otomycose (infection de l'oreille externe), l'onychomycose (infection des ongles) et les infections profondes.

(2) Chocs thermiques et sécheresse de l'air

Bien qu'ils soient fréquemment mentionnés, aucune étude portant sur les chocs thermiques et la sécheresse de l'air induits par l'air conditionné n'existe à notre connaissance.

Néanmoins, lorsqu'on interroge les personnes, nombreuses sont celles qui se plaignent de gênes telles que l'irritation des yeux, maux de gorge, maux de tête, rhumes et autres désagréments résultant d'une exposition à un milieu climatisé.

Le choc thermique correspond à la brutalité avec laquelle le corps humain passe du froid au chaud et inversement plusieurs fois dans la journée. Ces chocs ont parfois une amplitude de plus de 10° et soumettent à rude épreuve les individus.

Plus le gradient de température entre l'habitacle et le milieu extérieur est important plus le risque de contracter un refroidissement est grand.

Pour éviter les désagréments causés par les chocs thermiques et les maux de tête, il est ainsi conseillé de régler le thermostat entre 19°C et 21°C dans des zones tempérées comme la Belgique et de veiller à ne pas dépasser un écart de température de 10°C entre la température de l'habitacle et celle de l'extérieur.

(3) Risques d'exposition au gaz réfrigérant (HFC 134a)

Il y a très peu d'informations sur le sujet, dans la littérature du moins, en dehors de l'exposition professionnelle.

Le seul cas de figure pouvant mener à une exposition des passagers au HFC 134a serait l'accident. Sous l'effet du choc, le gaz pourrait s'évacuer par le circuit d'aération dans l'habitacle. Néanmoins, l'occurrence de ce risque semble être relativement réduite étant donné qu'elle exige la réalisation concomitante d'autres événements (accident, ruptures à des points spécifiques du système, fuites des gaz uniquement par une voie de sortie reliée au circuit d'aération, généralement l'évaporateur).

Le profil toxicologique du HFC 134a a été étudié dans le cadre du PAFT¹³.

Les études de toxicité aiguë et chronique, par voie d'inhalation, sur le rat ont permis d'avancer les résultats suivants : par la voie respiratoire, le HFC 134a présente une toxicité aiguë et chronique très faible. De même, il n'est ni génotoxique, ni tératogène.

L'American Industrial Hygiene Association (AIHA) recommande une limite d'exposition WEEL¹⁴ de 1000 ppm (moyenne pondérée 8 heures).

Même dans l'hypothèse où la masse totale (800g-2500g) de gaz réfrigérant s'échappe dans l'habitacle (2m³), les concentrations atteintes s'élèveraient au maximum à 2500 ppm, mais cela sur une durée inférieure à une heure et donc il est improbable de dépasser la limite d'exposition mentionnée ci-dessus.

¹³ Programme for Alternative Fluorocarbon Toxicity Testing (PAFT)

URL: <http://www.afeas.org/paft/>

¹⁴ Workplace Environmental Exposure Limit - limite d'exposition environnementale sur le lieu de travail.

A titre indicatif et sur le plan professionnel, outre les effets toxiques, l'exposition au HFC 134a peut conduire à :

- des gelures engendrées par un contact cutané ou contact des yeux avec le gaz ou le liquide réfrigérant ;
- l'asphyxie (impossible dans le cas de la climatisation automobile, car les charges initiales sont insuffisantes) ;
- inhalation de gaz nocifs résultant de la réaction du liquide réfrigérant avec une flamme nue ou à l'exposition de températures élevées (peu probable car à nouveau cela exige la concomitance de plusieurs événements).

b) Evaluation monétaire des effets directs sur la santé

Face aux nombreuses incertitudes ainsi qu'au manque de connaissances concernant la relation complexe de causalité liant utilisation de la climatisation automobile et ses effets directs sur la santé, il ne nous est pas possible de procéder à l'évaluation monétaire de ces derniers.

A titre illustratif, nous présentons brièvement les coûts économiques et sociaux engendrés par l'asthme, l'une des pathologies potentielles pouvant résulter de la climatisation automobile.

Les coûts présentés ci-après reprennent uniquement les coûts associés à la morbidité. La prise en compte des coûts de mortalité (bien que la mortalité liée à l'asthme ait considérablement régressé ces vingt dernières années) ferait considérablement augmenter le montant total de ces coûts, étant donné la valeur monétaire élevée associée à une vie¹⁵.

Les conséquences de l'asthme et leurs impacts sur la qualité de vie sont très importantes. Les seules données disponibles pour la Belgique concernant les coûts de l'asthme sont assez anciennes. Les données de 1992 montrent que 58,9 millions d'euros ont été dépensés pour le traitement (coûts directs) [13].

Les coûts indirects, constitués des frais de sécurité sociale, des coûts de l'absentéisme scolaire et au travail, des pertes d'emploi, des répercussions sur l'individu, sa famille et la société, sont très difficilement mesurables. De manière générale, on estime que l'asthme coûte environ 12,5 milliards d'euros par an [14].

Afin de pouvoir rattacher la part de ces coûts imputable à l'air conditionné automobile, il faudrait connaître les relations d'expositions/réponses, qui n'ont, à notre connaissance, pas été étudiées jusqu'à présent.

2. Effets sanitaires indirects

Pour rappel, les effets sanitaires indirects portent sur l'impact de la surconsommation de carburant induite par le fonctionnement du système de climatisation et la surémission adjacente de polluants atmosphériques (**Tableau 2**).

¹⁵ De 0,5 à 3 millions d'euros en fonction des études. Les études ExternE [33] [34] et Infrac utilisées comme références pour l'étude des coûts externes retiennent une valeur de 1,5 millions d'euros comme coût lié à la perte d'une vie.

Véhicule	CO	HC	NOx	Particules
Essence				
Urbain	17%	~0	74%	
Extra-urbain	75%	~0	51%	
Diesel				
Urbain	-30%	-24%	47%	60%
Extra-urbain	-28%	-23%	27%	32%

T° extérieure = 30°C, T consigne = 20°C, essai selon Directive 98/96

nouveau cycle MVEG

Source: ADEME

Emissions moyennes de polluants mesurés en g/km

Ecart en % entre essai climatisation en marche et sans climatisation

Tableau 2 : Émissions moyennes de polluants mesurées en g/km - Écart en % entre essais climatisation en marche et sans climatisation

Le **Tableau 2** indique clairement une hausse distincte de l'émission de polluants engendrée par l'utilisation de l'air conditionné.

Seuls les moteurs diesel présentent une diminution des émissions de CO et de HC. En effet, le fonctionnement de la climatisation entraîne une plus grande utilisation de la puissance du moteur, ce qui conduit à de meilleurs rendements de combustion.

Les résultats de ce tableau seront discutés au point B du chapitre X.

Les principaux polluants atmosphériques liés aux émissions automobiles ainsi que leurs impacts sur la santé sont connus et largement étudiés [15][16]. Nous synthétisons ci-après les principaux effets de ceux-ci.

a) CO

Origine - Le monoxyde de carbone CO est produit par toutes les combustions incomplètes de matières organiques. Il est le polluant toxique le plus abondant dans les gaz d'échappement des véhicules automobiles. Ce gaz incolore, inodore et insipide est relativement stable dans l'atmosphère. Des concentrations importantes de CO peuvent être rencontrées quand un moteur tourne au ralenti dans un espace clos ou en cas d'embouteillage dans des espaces couverts, ainsi qu'en cas de mauvais fonctionnement d'un appareil de chauffage domestique.

Effets sur la santé humaine - La voie pulmonaire constitue la seule voie de pénétration de ce polluant dans l'organisme. Le CO se fixe à la place de l'oxygène sur l'hémoglobine du sang conduisant à un manque d'oxygénation du système nerveux, du cœur et des vaisseaux sanguins. Les effets aigus de l'intoxication par le monoxyde de carbone sont bien établis, se caractérisant tout d'abord par des céphalées, une grande fatigue, des vertiges et des nausées, puis par des états pouvant atteindre la somnolence, l'impotence fonctionnelle puis le coma.

La nocivité du CO s'exprime aussi à des doses plus faibles et pour des durées d'exposition plus ou moins longues, au travers du tabagisme actif, en particulier, ou de sources fixes ou mobiles de combustion. Les effets apparaissent alors à plus ou moins longue échéance :

- à court terme, chez les sujets sains ou, surtout, présentant un risque cardio-vasculaire, notamment à l'occasion d'un exercice physique marqué ;
- à moyen terme s'agissant de l'exposition fœtale pendant la grossesse d'une femme fumeuse principalement ;

- à long terme, enfin, si l'on reconnaît au monoxyde de carbone des potentialités athérogènes. Les effets (liste non exhaustive) peuvent alors être d'ordre cardio-vasculaire, concerner le développement du fœtus, une baisse de la vigilance ou une diminution des performances physiques.

Les valeurs guides de l'OMS (1999) et celles prévues par les directives européennes (directives filles 1999/30/CE, 2000/69/CE et 2002/3/CE) pour le CO sont reprises dans le **Tableau 3**.

Directives européennes					
Polluant	Période considérée	Valeur limite	Dépassement	Entrée en vigueur	Respect
CO	8 heures	10 mg/m ³		2005	OK
OMS					
Polluant	Concentration moyenne ambiante	Valeur guide (µg/m ³)	Concentration à laquelle des effets sur la santé commencent à être observés (µg/m ³)	Durée de l'exposition	
CO	500-700	100000	sans objet	15 minutes	
		60000		30 minutes	
		30000		1 heure	
		10000		8 heures	

Source : OMS, Commission Européenne

Tableau 3 : Valeurs guides de l'OMS et des directives européennes pour le CO

b) NOx

Origine - Le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂), coexistent habituellement, le NO s'oxydant spontanément en NO₂. Les rejets en oxydes d'azote ont deux origines essentielles :

- la combinaison de l'azote et de l'oxygène de l'air à des températures supérieures à 1200 °C dans les foyers de combustion et de moteur ;
- la présence d'azote dans les combustibles. Cette teneur est faible dans les essences et les gasoils, et plus élevée dans les fiouls et les combustibles solides.

Dans l'air ambiant, le NO₂ est essentiellement issu des sources de combustion automobile, industrielle et thermique tandis que sa présence à l'intérieur des habitations est essentiellement liée à l'utilisation de chauffage au fuel, de cuisinières à gaz et à la fumée de tabac.

Effets sur la santé humaine - Le NO n'est pas toxique pour la santé humaine. C'est au gaz irritant NO₂ que l'on attribue des propriétés toxiques pour la santé humaine. Il peut entraîner une altération de la fonction respiratoire et une hyperréactivité bronchique chez l'asthmatique et, chez l'enfant, augmenter la sensibilité des bronches aux infections microbiennes. La quantification des effets propres à NO₂ lors d'études écologiques temporelles est difficile, du fait principalement de la présence dans l'air d'autres polluants avec lesquels le NO₂ est corrélé.

A forte concentration (> 1 ppm) le dioxyde d'azote est un gaz toxique et irritant pour les yeux et les voies respiratoires.

Des effets ne sont pas observables lors d'une exposition à court terme (moins de 2 heures) sur des sujets sains à des concentrations inférieures à 1 ppm (1913 µg/m³ (20°C)).

L'OMS propose comme valeur guide pour une exposition de courte durée (1 heure) la valeur de $200 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$. Cette valeur est basée sur des tests cliniques auprès de personnes asthmatiques. Des sujets dont la fonction pulmonaire est atteinte de façon chronique, peuvent présenter des réactions à partir de $0,3 \text{ ppm}$ ($574 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (20°C)) lors d'une exposition d'environ 4 heures.

Les effets à long terme (exposition d'un an à plusieurs années) montrent des augmentations de la sensibilité du poumon aux infections bactériennes notamment chez les enfants. Le domaine de concentration du NO_2 , où se manifestent des effets, se situe de 50 à $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

L'OMS propose comme valeur guide pour une exposition de longue durée (1 an) la valeur de $40 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$.

Les directives filles prévoient les valeurs limites suivantes :

Directives européennes					
Polluant	Période considérée	Valeur limite	Dépassement	Entrée en vigueur	Respect
NO_2	1 heure	$200 \mu\text{g}/\text{m}^3$		2010	OK
	24 heures	$40 \mu\text{g}/\text{m}^3$		2010	?
	1 an	$30 \mu\text{g}/\text{m}^3$		2001	?

Source : Commission Européenne

Tableau 4 : Valeurs guides définies par les directives européennes pour le NO_2

c) O_3

Origine - Dans la troposphère, la photodissociation des NO_x est à l'origine de la formation d'ozone. Le dioxyde d'azote se dissocie produisant du monoxyde d'azote (NO) et de l'oxygène atomique dans son état électronique fondamental. Celui-ci réagit avec l'oxygène moléculaire (O_2) pour donner de l'ozone (O_3), qui peut ensuite réoxyder le monoxyde d'azote (NO) en dioxyde d'azote (NO_2) (Cycle de Chapman). Ce cycle est équilibré et la production nette d'ozone est alors imputable à la présence d'autres composés organiques oxydants reformant NO_2 sans consommer d'ozone. En effet, il existe une chaîne complexe de réactions photochimiques et radicalaires qui permet la fabrication de NO_2 à partir de NO . Cette réaction est possible si des réactifs radicalaires, oxydants puissants provenant de la dégradation des COV (Composés Organiques Volatils), sont présents. Le cycle de Chapman se trouve donc perturbé.

Ces réactions photochimiques sont relativement lentes, de quelques heures à quelques jours, tandis que les réactions radicalaires sont rapides (instabilité et réactivité forte des radicaux). Elles dépendent des conditions météorologiques locales. Le taux moyen d'ozone est actuellement évalué à 30 ppb , ce taux ayant doublé dans les cent dernières années.

En zone urbaine, les émissions de précurseurs sont importantes : les hydrocarbures et les oxydes d'azote sont présents en grande quantité. Beaucoup d'ozone se forme mais, celui-ci réagit, une fois formé, avec le monoxyde d'azote dont l'apport est constant. L'ozone est donc consommé au niveau des agglomérations et généralement présent en faible quantité.

En s'éloignant des villes, mais en restant sous leur panache, la quantité de précurseurs émis diminue. L'ozone ne se détruit plus avec le monoxyde d'azote alors que l'ensemble des autres réactions poursuit lors du déplacement des masses d'air. De ce fait, la concentration en ozone augmente car l'ozone formé n'est plus détruit comme dans le cas précédent.

Effets sur la santé humaine - L'ozone est un gaz agressif, à fort pouvoir oxydant, peu soluble, qui pénètre facilement jusqu'aux voies respiratoires les plus fines. Il provoque toux,

altération pulmonaire ainsi que des irritations oculaires, surtout chez les enfants et les asthmatiques. Ses effets, majorés par l'exercice physique, sont variables selon les individus. Chez l'asthmatique, l'ozone diminue son seuil de réactivité aux allergènes auxquels il est sensibilisé et favorise ainsi, voire aggrave, l'expression clinique de sa maladie.

Les valeurs guides de l'OMS (1999) et celles prévues par les directives européennes (directives filles 1999/30/CE, 2000/69/CE et 2002/3/CE) pour l'O₃ sont reprises dans le Tableau 5

Directives européennes					
Polluant	Période considérée	Valeur limite	Dépassement	Entrée en vigueur	Respect
O ₃	8 heures max	120 µg/m ³	25*/an	2010	?
OMS					
Polluant	Concentration moyenne ambiante	Valeur guide (µg/m ³)	Concentration à laquelle des effets sur la santé commencent à être observés (µg/m ³)	Durée de l'exposition	
O ₃	10-100	120	sans objet	8 heures	

Source : OMS, Commission Européenne

Tableau 5 : Valeurs guides de l'OMS et des directives européennes pour l'O₃

d) Particules fines : PM10

Origine - Dominées dans le passé par les fumées des processus incomplets de combustion de charbon, notamment lors du chauffage domestique, les particules en suspension sont aujourd'hui principalement issues des véhicules automobiles surtout diesel (EEA 2003 : environ 27% sur l'ensemble du territoire, mais proportion sans doute beaucoup plus élevée en milieu urbain : de 50 à 80%), des usines productrices d'énergie non nucléaire ainsi que des réactions chimiques entre gaz atmosphériques et humidité de l'air.

Les particules en suspension constituent un ensemble très hétérogène, variable selon les sources d'émissions et selon la saison. On y retrouve principalement : des éléments minéraux liés à l'érosion de matériaux (sols, bâtiments) ou à la remise en suspension de particules déposées sur le sol ; des noyaux carbonés issus des processus de combustion, intimement liés à des composés organiques produits lors des combustions incomplètes ; des sulfates SO₄ ou nitrates NO₃ résultant des transformations des oxydes de soufre ou d'azote émis par différentes sources ; ou encore des sels d'ammonium produits par la neutralisation des aérosols acides par l'ammonium présent dans l'air du fait de l'activité biologique. Des ions métalliques (zinc, fer, cuivre, manganèse, vanadium, plomb, etc.) sont aussi adsorbés ou condensés à la surface de ces particules et jouent un rôle sans doute important dans la toxicité de l'aérosol.

Effets sur la santé humaine - Malgré cette hétérogénéité, les particules en suspension représentent un indicateur majeur de la qualité de l'air d'un point de vue sanitaire, tant sont nombreuses et cohérentes les études leur attribuant une responsabilité dans la survenue d'une vaste gamme d'effets biologiques et sanitaires.

Les particules issues des pots d'échappement des véhicules se caractérisent par leur très petite taille, qui leur confère une aptitude particulière à pénétrer très profondément dans les

voies aériennes d'où elles mettront beaucoup plus de temps à être éliminées. Dans la gamme des tailles de ces particules ultrafines, de l'ordre de 20 à 40% pourront se déposer au niveau alvéolo-intersticiel. D'un point de vue biologique et sanitaire, ces particules ultrafines sont donc les plus préoccupantes. Les plus grosses particules (> 10 µm) sont retenues par les voies respiratoires supérieures.

Les effets mis en évidence concernent principalement la mortalité cardio-vasculaire et respiratoire à court terme, les atteintes fonctionnelles respiratoires, l'incidence d'épisodes asthmatiques, et divers indicateurs sanitaires (consultations ambulatoires, entrées aux urgences hospitalières...). Les effets des particules fines se manifestent, surtout chez l'enfant, pour des concentrations relativement faibles (< 50 µg/m³), inférieures aux valeurs de référence actuelles de la qualité de l'air. A ces effets mécaniques des particules, on peut rajouter les effets induits par les éléments qu'elles transportent (effets cancérogènes de certains hydrocarbures transportés et émis par les véhicules diesel, effet biologique de certains virus ou moisissures).

Les valeurs guides de l'OMS (1999) fixées par les directives européennes (directives filles 1999/30/CE, 2000/69/CE et 2002/3/CE) pour les PM₁₀ sont reprises dans le tableau qui suit.

Directives européennes					
Polluant	Période considérée	Valeur limite	Dépassement	Entrée en vigueur	Respect
PM ₁₀	24 heures	50 µg/m ³	<35*/an <7*/an	2005	?
				2010	?
	1 an	40 µg/m ³		2005	OK
				2010	?
		30 µg/m ³		2010	?

Source : Commission Européenne

Tableau 6 : Valeurs guides définies par les directives européennes pour les PM10

e) SO₂

Origine - Le SO₂ est un polluant qui provient principalement de la combustion du soufre contenu dans les combustibles fossiles. Lors de la combustion, les impuretés soufrées sont oxydées en dioxyde de soufre. Ce polluant gazeux est rejeté par des sources fixes (centrales thermiques, fours industriels, chaufferies urbaines), utilisant des combustibles fossiles ou encore par de multiples petites sources (exemple de sources diffuses : véhicules à moteur diesel et essence). Les émissions de dioxyde de soufre sont en nette diminution dans toute l'Union Européenne depuis une vingtaine d'années. La baisse sensible de la consommation de combustibles fossiles et la réglementation réduisant le taux de soufre dans les combustibles ont largement contribué à cette chute des rejets polluants en SO₂.

Effets sur la santé humaine -Le SO₂ est essentiellement un gaz irritant des muqueuses qui agit en synergie avec d'autres substances, notamment les fines particules en suspension. Le mélange acido-particulaire peut, selon les concentrations des différents polluants, déclencher des effets broncho-spasmodiques chez l'asthmatique, augmenter les symptômes respiratoires aigus chez l'adulte (toux, gêne respiratoire), altérer la fonction respiratoire chez l'enfant (baisse de capacité respiratoire, excès de toux ou de crises d'asthme). Ce gaz peut également aggraver les troubles cardio-vasculaires.

Les valeurs guides de l'OMS (1999) et celles prévues par les directives européennes (directives filles 1999/30/CE, 2000/69/CE et 2002/3/CE) pour le SO₂ sont reprises dans le Tableau 7.

Directives européennes					
Polluant	Période considérée	Valeur limite	Dépassement	Entrée en vigueur	Respect
SO ₂	1heure	350 µg/m ³	<24*/an	2005	OK
	24 heures	125µg/m ³	<3*/an	2005	OK
	1 an	20 µg/m ³	éco/extra urb	2001	?
OMS					
Polluant	Concentration moyenne ambiante	Valeur guide (µg/m ³)	Concentration à laquelle des effets sur la santé commencent à être observés (µg/m ³)	Durée de l'exposition	
SO ₂	5-400	500	1000	10 minutes	
		125	250	24 heures	
		50	50	1 an	

Source : OMS, Commission Européenne

Tableau 7 : Valeurs guides de l'OMS et des directives européennes pour le SO₂

f) Composés organiques volatils

Origine - Les COV sont des composés organiques (molécules qui peuvent contenir des atomes H et C mais aussi d'autres éléments tels que O, N, Cl, F, P, S, ... des métaux et/ou des métalloïdes). La tension de vapeur est suffisamment élevée pour considérer que ces composés sont presque totalement à l'état de vapeur dans les conditions normales de température et de pression.

Les COVNM comprennent une centaine d'espèces et une dizaine de grandes familles. Les familles de composés qui participent le plus fortement aux émissions nationales totales sont les alcanes, les alcènes et les aromatiques.

A l'échelle planétaire, les sources naturelles de COV représentent 90% des rejets, mais dans les régions industrialisées, ces sources deviennent souvent minoritaires.

Les secteurs d'activités les plus fortement émetteurs de COV sont les transports routiers, l'industrie, l'agriculture, et le " tertiaire ".

Pour les transports routiers, on note l'importance de la famille des alcanes (environ 50% des émissions), mais aussi des composés aromatiques qui participent aux émissions de ce secteur pour près de 28%. Sur l'ensemble des émissions, la part attribuable aux transports routiers se chiffre à 30%¹⁶.

¹⁶ European Environment Agency, *Guidance report on preliminary assessment under EC air quality directives*, Technical report n°11, 64 pages.
URL: <http://reports.eea.eu.int/TEC11a/en/tech11.pdf>

Effets sur la santé humaine - La toxicité des COVNM est due, d'une part, à la toxicité directe de certains COV, mais également à la formation de composés secondaires. Différents troubles liés aux COV ont été identifiés. Les fréquences et délais d'apparition de ces troubles varient en fonction de la durée d'exposition, du type de polluant, de la sensibilité du sujet et de nombreux facteurs plus ou moins identifiés.

Du fait de la multiplicité des espèces chimiques appartenant aux COV, il est difficile de résumer les effets des COV sur la santé. A titre indicatif, le **Tableau 8** donne les informations suivantes.

Troubles	Certains COV responsables
Irritations cutanées	Hydrocarbures halogénés ou aromatiques
Irritation des yeux	Hydrocarbures aromatiques non substitués comme les BTEX Noyaux benzéniques substitués
Irritation des organes respiratoires	Hydrocarbures aromatiques diisocyanates
Troubles cardiaques	Toluène, chloroforme, méthylchloroforme
Troubles digestifs	Benzène, toluène, hydrocarbures halogénés (CH ₃ Cl, CCl ₄ ...)
Troubles rénaux, hépatiques	Les BTEX, cumène, hydrocarbures halogénés aliphatiques
Maux de tête	La plupart des COV
Troubles du système nerveux	Hydrocarbures aromatiques et halogénés dichlorométhane, chloroforme, toluène, benzène, 1,1,1,-trichlorométhane
Action cancérogène et mutagène	BTEX, hydrocarbures insaturés (alcènes, oléfines...) qui peuvent être transformés en composés toxiques Certains hydrocarbures halogénés aliphatiques (dérivés chlorés de l'éthylène, du butène et du butadiène) Certains composés aromatiques (styrène, benzène)

Source : ATMO Poitou-Charentes

Tableau 8 : Troubles occasionnés par les COV

g) Evaluation monétaire des effets indirects sur la santé

Les effets indirects sur la santé de la climatisation automobile trouvent leur cause dans la pollution atmosphérique.

La climatisation automobile contribue à la pollution atmosphérique de par la surconsommation de carburant engendrée par son fonctionnement.

Cette surconsommation contribue directement à la pollution atmosphérique via la surémission de polluants et indirectement par le biais des émissions de polluants lors de la production et l'acheminement des carburants surconsommés.

La valeur des coûts externes associés à ces diverses sources d'émissions vont être développés dans la partie concernant les coûts externes (cf. chapitre XIII).

3. Synthèse et recommandations

Les principaux effets néfastes, pour la santé induits par l'utilisation d'un système d'air conditionné dans les voitures, se répartissent entre :

- d'une part les effets directs dus notamment à la présence de biocontaminants dans le système (moisissures et bactéries), aux chocs thermiques et à la sécheresse de l'air dans l'habitacle, et finalement à la possible exposition aux gaz réfrigérants utilisés ;
- d'autre part les effets indirects provoqués par une surconsommation et une surémission des véhicules lorsque le système d'air conditionné est en fonctionnement.

Le tableau ci-dessous reprend les conclusions principales retirées de l'analyse de plusieurs articles sur le sujet.

Origine des effets	Source	Polluant ou élément incriminé	Cause directe de l'effet sur la santé	Effets identifiés	Solutions	
Effets directs	biocontaminant	évaporateur et canal d'évacuation résidus condensation	moisissures (cladosporium, alternaria, aspergillus, penicillium)	spores, résidus, sécrétions toxiques	Accentuation des rhinites et crises d'asthme ; effets respiratoires, cutanés et systémiques probables	faire fonctionner le système régulièrement ; faire désinfecter le système (forte atténuation des biocontaminants)
	biocontaminant	évaporateur et canal évacuation résidus condensation	bactéries actinomycètes			
	choc thermique et sécheresse de l'air	. gestion température ; . intrinsèque au fonctionnement du système	gradient température ; agent dessicatif		. refroidissement et bronchites ; . irritation yeux, nez et gorge	. gradient de maximum 10°C . humidificateur ?
	exposition au gaz réfrigérant	accidents, fuites du système, contact cutané ou oculaire avec le gaz	exposition au gaz		gelures (contact peau, yeux)	normes de sécurité
Effets indirects	surconsommation et surémission	polluants atmosphériques	CO, NO_x, PM, SO₂, COV, O₃		principalement impacts cardio-vasculaires et respiratoires principalement chez les personnes fragilisées	amélioration du système ; supprimer le système d'air conditionné

Tableau 9 : Synthèse des effets sanitaires néfastes induits par l'air conditionné automobile

Plusieurs recommandations peuvent être formulées sur base des informations recueillies dans cette partie.

En premier, vu le manque de connaissance et d'études approfondies concernant les effets directs de l'air conditionné automobile sur la santé humaine et face au développement considérable de l'équipement de ce dernier pour les années à venir, il nous semble indispensable que les autorités publiques soutiennent des projets de recherche de même que des études épidémiologiques s'intéressant à la question, afin d'accroître le domaine de connaissance sur le sujet.

Face au risque de biocontamination, il importe, dans le cadre d'une campagne de sensibilisation, d'informer le consommateur de l'existence de ce risque et de la forme de manifestation de celle-ci (émanations d'odeurs par la bouche d'aération). Lors de l'achat du véhicule, il est nécessaire de souligner l'importance des diverses opérations d'entretien (désinfection du système et changement du filtre à air) indispensables à l'atténuation d'une éventuelle contamination et à la qualité de l'air ambiant.

En dernier lieu, dans la perspective des mesures préventives des chocs thermiques, une campagne de sensibilisation du consommateur doit insister sur une utilisation précautionneuse de l'air conditionné automobile de même que sur l'attention qui doit être portée à ne pas induire un gradient de température trop important entre l'habitacle et le milieu extérieur.

Après avoir détaillé les avantages et les inconvénients que pose l'air conditionné automobile en terme de confort et de santé, nous allons au chapitre suivant présenter les spécificités et l'évolution du marché de l'équipement des systèmes d'air conditionné automobile.

VIII. Le taux d'équipement du parc automobile belge

Cette partie a pour objectif de rendre compte de l'équipement du parc automobile belge actuel ainsi que d'estimer l'évolution de ce dernier sur base des projections du marché européen et des expériences des marchés ayant déjà atteint leur maturité (Amérique du Nord, Japon).

Ces considérations permettent de mettre en évidence l'ampleur du phénomène de la climatisation automobile.

A. Le taux d'équipement réel du parc actuel

Du fait de l'inexistence de statistiques concernant le sujet, il ne nous a pas été possible de déterminer le taux d'équipement réel du parc automobile belge actuel. Ce manque de données s'explique par l'absence de distinction de l'équipement d'une voiture lors de l'enregistrement de sa vente.

Néanmoins, les informations concernant l'équipement des voitures neuves mises en circulation indiquent la tendance de ce marché pour l'avenir.

B. Le taux d'équipement des voitures neuves

Une analyse des catalogues des constructeurs, de même que les données statistiques de la FEBIAC concernant les parts de marché des différentes marques a permis de dégager les données reprises dans le **tableau 10**.

Ces données reprennent les différents taux d'équipement pour chaque marque automobile de même qu'un taux d'équipement de série moyen.

Les marques sélectionnées pour l'analyse ont été retenues sur base de l'importance de leur part de marché ([17], [18], [19])

Marque	t% d'équipement potentiel	t% d'équipement série	t% de non équipement	Part de marché 2003	t% moyen d'équipement série	Systèmes majoritairement
Alfa Romeo	100%	93%	7%	0,01	0,997	Automatiques
Audi	99%	58%	41%	0,03	2,001	Automatiques
BMW	100%	93%	7%	0,04	3,835	Automatiques
Chrysler	100%	100%	0%	0,00	0,271	Automatiques
Citroën	88%	75%	13%	0,07	5,183	Automatiques
Daewoo	83%	56%	27%	0,01	0,337	Manuels
Daihatsu	100%	8%	92%	0,00	0,031	Manuels
Fiat	98%	63%	35%	0,03	1,655	Manuels
Ford	95%	60%	35%	0,09	5,408	Manuels
Honda	87%	87%	0%	0,01	1,223	Automatiques
Hyundai	94%	59%	35%	0,01	0,483	Manuels
Lancia	100%	88%	12%	0,00	0,391	Automatiques
Mazda	92%	62%	30%	0,02	1,332	Automatiques
Mercedes	100%	94%	6%	0,06	5,217	Automatiques
Mitsubishi	94%	84%	10%	0,02	1,389	Aut/man
Nissan	94%	84%	10%	0,04	2,966	Automatiques
Opel	85%	45%	40%	0,11	4,767	Automatiques
Peugeot	100%	77%	23%	0,08	6,080	Automatiques
Renault	72%	39%	33%	0,09	3,316	Automatiques
Saab	100%	100%	0%	0,01	0,563	Automatiques
Seat	80%	56%	24%	0,02	0,957	Automatiques
Skoda	96%	43%	53%	0,01	0,323	Automatiques
Suzuki	97%	3%	94%	0,01	0,037	Manuels
Toyota	95%	67%	28%	0,06	3,820	Aut/man
Volkswagen	98%	78%	20%	0,12	12,474	Automatiques
Volvo	100%	100%	0%	0,02	1,836	Automatiques
Autres	94%	68%	26%	0,04	2,856	Aut/man
Synthèse	94%	68%	26%	1,00	69,7	Automatiques

Tableau 10 : Aperçu de l'équipement des voitures neuves par marques automobiles en Belgique (2004)

La deuxième colonne indique le taux d'équipement potentiel d'air conditionné de la gamme commercialisée par constructeur automobile. Le taux d'équipement potentiel correspond au rapport entre le nombre de versions/modèles de la gamme étant (en série) ou pouvant être (en option) équipés d'un système de conditionnement d'air et le nombre total de versions/modèles. Il ressort du tableau que le taux moyen d'équipement potentiel toutes marques confondues est de 94%. De plus, parmi les 26 constructeurs repris dans l'analyse neuf sur vingt-six, soit 34.6%, proposent une gamme de voitures intégralement équipées de systèmes de climatisation.

La troisième colonne met en évidence le taux d'équipement en série qui représente le rapport entre le nombre de versions/modèles équipés en série et le nombre total de versions/modèles.

Nous notons que sur l'ensemble des nouvelles voitures proposées par les constructeurs automobiles, 68% disposent de la climatisation en série. Remarquons que pour les marques Saab, Volvo et Chrysler, des hauts de gamme, toutes les voitures bénéficient de l'air conditionné en série.

La quatrième colonne reprend le taux d'équipement en option qui équivaut à la différence entre le taux potentiel d'équipement et le taux d'équipement en série. Il met en évidence la marge de choix restant au consommateur, quant à l'air conditionné, lors de la décision d'achat. Ainsi, nous distinguons que dans l'ensemble celui-ci s'élève à 26%, ce qui indique un choix relativement restreint pour le consommateur.

A l'avenir, nous estimons que ce choix va se réduire davantage en conséquence de la généralisation du suréquipement des voitures et donc de l'air conditionné en série.

La cinquième colonne reprend les parts de marché pour chacune des marques pour l'année 2003. Les deux leaders du marché sont Opel et Volkswagen. Remarquons que sur les quatre dernières années, les parts de marché des diverses marques ont connu une certaine stabilité. Ainsi, nous considérons que les chiffres de l'année 2003 restent valables pour donner une estimation approchée des parts de marché de 2004.

L'avant dernière colonne équivaut au produit de la part de marché et du taux d'équipement en série, dont la somme pour l'ensemble des marques correspond au **taux moyen d'équipement en série du marché** qui se situe autour de 69,7%.

Une approximation du **taux d'équipement moyen des voitures neuves** peut être dégagée en considérant que 50% à 70% des options sont levées, ce qui donnerait un taux **de 82,7-87,9%**¹⁷.

Enfin, la dernière colonne indique le mode de fonctionnement dominant des systèmes de climatisation au sein des différentes marques. Nous constatons que le mode automatique est largement majoritaire parmi les diverses marques sélectionnées.

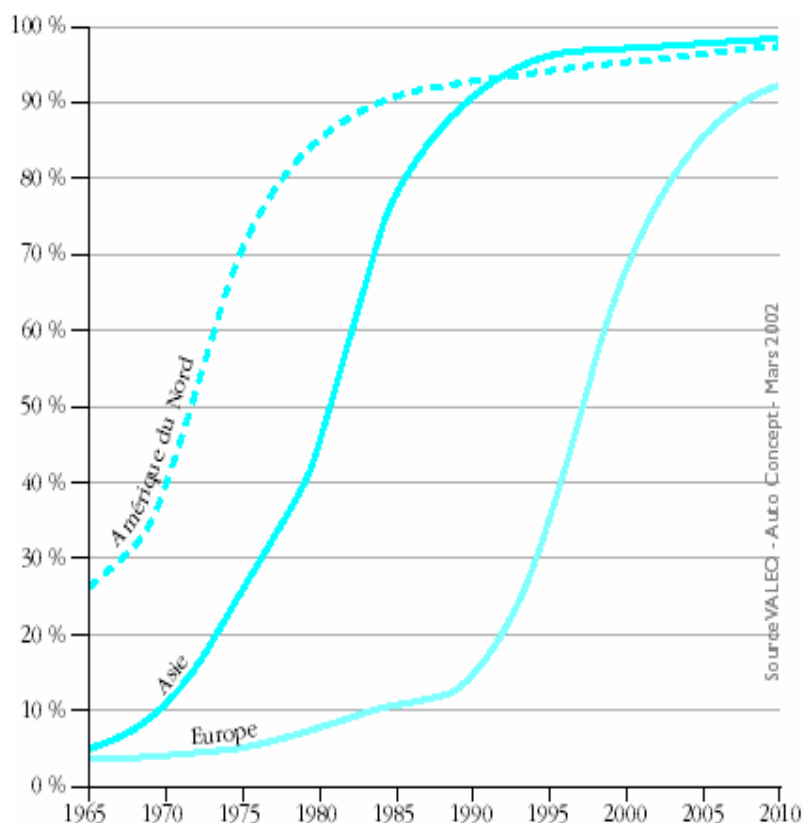
C. Tendances futures pour l'équipement des voitures neuves

Sur base de la **Figure 7** reprise à la page suivante et des approximations reprises au paragraphe précédent, il est possible de situer la position de la Belgique par rapport à l'évolution du marché européen et celle du marché nord-américain et asiatique.

La comparaison, entre les taux avancés plus haut pour le marché belge et ceux représentés par la courbe représentant l'évolution du taux d'équipement du marché européen, montre que la Belgique s'inscrit dans la moyenne européenne.

Selon cette figure, il faut s'attendre à une saturation progressive, selon une courbe sigmoïde, où pour l'année 2010 le taux européen d'équipement des voitures neuves s'élèverait à 90%, atteignant ainsi les niveaux de diffusion observés depuis quelques années au Japon et en Amérique du Nord.

¹⁷ Taux d'équipement moyen = taux d'équipement du marché (69.7%) + pourcentage (ici 50% et 70%) du taux d'équipement en option (26%).



Source : ADEME

Figure 7 : Évolution du taux d'équipement des véhicules neufs en climatisation automobile

Comme la Belgique semble suivre l'évolution du marché européen, le taux d'équipement des véhicules neufs pourrait, vers 2010, s'élever à 90% et poursuivre sa croissance jusqu'à frôler les 100% vers 2020.

D. Evolution et projections du parc automobile équipé climatisé

A partir des considérations qui précèdent, nous avons, d'une part, tenté de retracer l'évolution de l'équipement du parc jusqu'à 2003 et d'autre part, nous avons élaboré des projections quant à l'équipement du parc automobile belge pour la période 2004-2020.

Les prévisions illustrées dans la figure qui suit découlent de plusieurs hypothèses quant à la croissance du marché automobile¹⁸, à son taux de renouvellement¹⁹ et aux taux d'équipement des voitures neuves pour différentes périodes²⁰. Les résultats de nos estimations doivent être

¹⁸ Voir Annexe IV : Projections de la croissance du parc automobile pour 2020.

¹⁹ Le taux annuel de renouvellement retenu de 9% pour la période 2004-2020 a été exprimé par la moyenne de la série historique de ce taux pour les années 1989-2003.

²⁰ Les taux d'équipement des véhicules neufs ont été fixés comme suit :

Avant 1975 : 0% ;
De 1975 - 1984 : 5% ;
De 1985 - 1995 : 10% ;
De 1995 - 1999 : 40% ;
De 2000 - 2003 : 70 %

interprétés avec prudence car les calculs et les hypothèses qui les sous-tendent ont été extrêmement simplifiés.

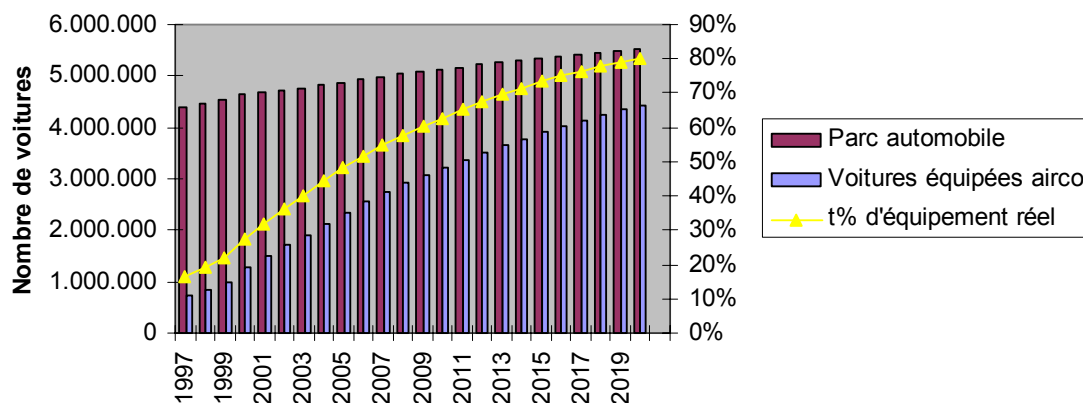


Figure 8 : Perspectives de pénétration des véhicules climatisés pour le parc automobile belge

D'après nos estimations, d'ici 2010, le parc automobile belge équipé d'un système d'air conditionné devrait comprendre environ 3.204.493 voitures, ce qui représenterait un taux d'équipement réel de 63%. A l'horizon 2020, ce nombre devrait s'accroître à 4.427.887, ce qui compterait pour près de 80% du parc total.

Eu égard à ces considérations, nous constatons que la pénétration de l'équipement de climatisation automobile est en pleine phase de croissance en Belgique. Ainsi, pour l'année 2004, le taux d'équipement des voitures comportant la climatisation s'élève à 44% et il pourrait, suivant une projection basse, atteindre les 80% d'ici 2020.

Face à l'ampleur de ce phénomène et dans le cadre d'une stratégie de réduction des effets de serre, il convient dès lors, d'une part, de conscientiser le consommateur quant aux impacts environnementaux de son utilisation de la climatisation dans son véhicule et d'autre part, il importe de favoriser l'entrée rapide sur le marché de technologies plus favorables à l'environnement.

Après avoir constaté l'ampleur du phénomène de développement de l'équipement des véhicules, nous allons nous intéresser, au chapitre suivant, aux émissions directes de gaz réfrigérant que les systèmes d'air conditionné automobile relâchent dans l'atmosphère sur l'ensemble de leur durée de vie.

De 2004 - 2010 : 85%
De 2011 - 2020 : 90%.

IX. Émissions directes des systèmes d'air climatisé

Ce chapitre traite des émissions directes associées à un système mobile d'air climatisé. Ces émissions proviennent [1] :

- de la production et du transport du réfrigérant ;
- des émissions habituelles (débit de fuite constant ou graduel) ;
- des émissions inhabituelles (dues à une défectuosité du système) ;
- des émissions durant l'entretien du système ;
- des émissions durant le démantèlement du véhicule en fin de vie.

A. Emissions provenant de la production et du transport du réfrigérant et du remplissage du système

On peut supposer que la quantité d'émissions dues à la production et au transport du réfrigérant, ainsi que les émissions durant le remplissage (en considérant le premier remplissage et pas les éventuels remplissages durant la phase d'entretien) du système est faible.

L'ordre de grandeur des émissions durant un remplissage effectué de manière normale (pas dans le cas d'un remplissage mal effectué ou d'une fuite accidentelle) est de 5 à 10 grammes de liquide réfrigérant par remplissage.

B. Emissions habituelles

Contrairement aux installations fixes d'air climatisé, les systèmes mobiles se caractérisent par un débit (inévitables) de fuites et d'émissions, dues aux conditions de fonctionnement du système dans un véhicule.

Le compresseur, actionné par le moteur du véhicule, n'est pas complètement hermétique. De plus, les composants du système sont reliés par des conduites qui sont exposées aux vibrations et à la chaleur provenant du moteur. En outre, la pression à l'intérieur du système de climatisation est élevée en permanence, non seulement lorsque le système est en fonctionnement, mais aussi quand le moteur est à l'arrêt. La pression est donc élevée durant la durée de vie complète du système. Ceci implique des émissions 'habituelles' de réfrigérant sous forme gazeuse. Celles-ci sont considérées comme acceptables par les constructeurs automobiles tant qu'elles restent en dessous de certaines limites. Tant que ces fuites restent limitées, elles ne posent pas d'entrave au fonctionnement optimal du système de climatisation et ne sont donc pas remarquées par l'utilisateur.

Une étude, à la demande de la Commission Européenne (DG Environnement), a estimé ces émissions 'habituelles' sur base d'une campagne de mesure de grande échelle [1].

Cette étude a établi que la moyenne des fuites de R-134a va de 52,4 à 53,9 grammes par an pour les systèmes de climatisation installés dans les véhicules en Europe. De plus, l'étude a démontré que la quantité des fuites était indépendante des conditions climatiques ainsi que du type de moteur (diesel ou essence).

C. Emissions inhabituelles

Les émissions inhabituelles se produisent durant l'utilisation du système et s'ajoutent aux émissions habituelles durant cette utilisation. Ces émissions proviennent d'une défektivité du système qui est due à des causes internes ou externes. Les causes les plus fréquentes d'émissions inhabituelles sont les impacts plus ou moins importants dus à un accident ou à des impacts de pierres ou autres. Le positionnement relativement exposé du condenseur du système est la principale cause d'émissions inhabituelles.

D. Emissions durant l'entretien du système

Durant les différentes phases d'entretien du système d'air climatisé, des émissions peuvent se produire. Ces émissions peuvent être importantes lorsque le personnel d'entretien ne suit pas suffisamment minutieusement les prescriptions d'entretien ou s'il n'utilise pas le matériel de récupération approprié pour le réfrigérant R-134a.

E. Emissions en fin de vie

Les émissions, lors du démantèlement du véhicule en fin de vie, doivent être additionnées à la quantité de réfrigérant restant dans le système d'air climatisé et qui n'a donc pas été récupérée. La quantité de ces émissions spécifiques dépend de la présence du matériel approprié dans l'entreprise de démantèlement, du soin apporté à l'utilisation de ce matériel et de la compétence du personnel effectuant les opérations.

La directive EU/2000/53 concernant les véhicules en fin de vie prévoit une récupération complète de tous les liquides contenus dans les véhicules hors d'usage avant leur démantèlement. L'implémentation et l'application de cette directive doivent faire en sorte que les émissions en provenance des véhicules en fin de vie soient réduites au minimum. Une donnée non négligeable est qu'une fraction importante des véhicules d'occasion européens est exportée vers des pays où il n'existe pas de récupération de liquide lors de la fin de vie du véhicule.

F. Total des émissions directes

Une étude de l'Ecole des Mines de Paris [26] nous permet d'avoir une bonne idée de l'ordre de grandeur de ces émissions directes.

EU-12j-13000km/an	HFC 134a			
	Optimiste (gram R134a)	Pessimiste (gram R134a)	Optimiste (kg CO2 eq)	Pessimiste (kg CO2 eq)
Résidu après remplissage	7.5	45.0	9.8	58.5
Remplissage	5.0	10.0	6.5	13.0
Fuites	712.5	1018.9	926.3	1324.5
Accident et défauts	187.5	268.1	243.8	348.6
Entretien	198.0	621.0	257.4	807.3
Fin de vie	67.5	428.3	87.8	556.8
TOTAL	1178.0	2391.3	1531.4	3108.7

Tableau 11 : Quantités d'émissions directes de R-134a d'un système d'air climatisé

Ces résultats sont basés sur une étude bibliographique et sur des enquêtes effectuées en Europe et aux Etats-Unis. Toutes les enquêtes semblent indiquer des valeurs d'émissions comparables.

Deux scénarios furent distingués : le scénario optimiste et le scénario pessimiste. La différence principale entre les deux scénarios se trouve dans les émissions en fin de vie. Le scénario optimiste est basé sur l'application des meilleures techniques disponibles, sans modification importante du système de climatisation en soi. Une durée de vie de 12 ans et un kilométrage annuel de 13.000 km sont proposés.

Après avoir mis en évidence les émissions directes induites par les systèmes d'air conditionné automobile, nous allons dans une suite logique nous intéresser dans le chapitre suivant aux émissions indirectes occasionnées par ces mêmes systèmes.

X. Émissions indirectes des systèmes d'air climatisé

A. Introduction

Une surconsommation du moteur à explosion est créée par la surcharge du moteur due au compresseur du système d'air climatisé. Cette surconsommation lors de l'utilisation de systèmes d'air climatisé sera analysée à l'aide d'une étude bibliographique ainsi que grâce à des simulations du fonctionnement de véhicules.

L'utilisation de la climatisation cause inévitablement une augmentation de la consommation de carburant (de 15 à 25%) ainsi qu'une augmentation des émissions qui y sont associées. Cette consommation dépend de la technologie utilisée ainsi que de certains facteurs externes comme les conditions atmosphériques (température, humidité, densité de l'air, etc.) et d'utilisation (cycle de conduite, style de conduite, ouverture des fenêtres, etc.). Les aspects technologiques concernent aussi bien le système de climatisation que la conception même du véhicule (type de vitrage, taille du véhicule, couleur de la carrosserie, circulation de l'air, etc.).

Les modèles de voitures actuels (véhicules de moins d'un an) et les modèles les plus chers utilisent la puissance de la climatisation de manière plus 'intelligente', ce qui diminue le surplus de consommation. Malheureusement, ces modèles ne constituent pas encore une part très importante du parc automobile. Un inconvénient des nouvelles pompes (à réglage automatique) de climatisation est que l'on ne peut pas désactiver la climatisation de manière manuelle. Ces pompes se règlent automatiquement mais ne s'éteignent jamais complètement. Même lorsque l'utilisateur pense que la climatisation est éteinte ("température set" plus élevée que "température extérieure"), il y a un surplus de consommation d'à peu près 0,1 litre par heure et ceci tout au long de l'année.

Si l'on souhaite climatiser l'habitacle lorsque la température extérieure est de plus de 25°C et ceci plus particulièrement quand le véhicule est immobilisé dans la circulation, il a été démontré que la consommation peut présenter une augmentation pouvant aller jusqu'à 20%. Cependant, lors de trajets en dehors de la ville, à plus de 80km/h, il a été démontré que l'utilisation du système d'air climatisé cause un surplus de consommation inférieur à celui d'une fenêtre ouverte. Un véhicule qui consomme 11 litres de carburant aux 100km en consomme 13,3 s'il est équipé d'un système d'air climatisé.

Dans un environnement urbain, le profil de conduite est différent de celui en dehors de la ville. Il y a plus de démarrages et de freinages, la vitesse moyenne est plus faible et les trajets sont plus courts. Tout ceci a des répercussions sur la consommation supplémentaire due à la climatisation. Le programme de simulation développé par la Vrije Universiteit Brussel (voir ci-après) permet de simuler ce genre de parcours et ses effets sur la consommation de carburant.

Globalement, on peut discerner trois groupes de facteurs d'influence [20] : la conception du véhicule, l'utilisation du véhicule et les influences extérieures.

La conception du véhicule peut être divisée en trois catégories en ce qui concerne l'impact sur le surplus de consommation de celui-ci :

- la première catégorie inclut les paramètres de conception du véhicule : superficie et inclinaison des vitres, masse du véhicule, taille et proportions du véhicule, tableau de bord, cylindrée, superficie et géométrie frontales, couleur de la carrosserie et de l'intérieur, aérodynamisme et résistance au roulement ;
- la deuxième catégorie concerne les caractéristiques thermiques du véhicule : caractéristiques de la peinture utilisée, vitrage et tableau de bord, masse, isolation et ventilation de l'habitacle lorsque le véhicule est en stationnement ;
- la troisième catégorie est constituée du système d'air climatisé en soi : les possibilités de contrôle (température, recyclage), la soufflerie, le flux d'air, le poids du système, le type de liquide réfrigérant et le type de compresseur (à volume fixe ou variable).

L'utilisation du véhicule peut également être divisée en trois catégories :

- la première catégorie inclut le conducteur : le style de conduite de celui-ci, l'entretien du véhicule, l'ouverture des vitres, l'utilisation du panneau de contrôle du système d'air climatisé, et l'utilisation de ce système (confort, dégivrage, réduction des nuisances sonores ou des allergies, réduction de la pollution dans l'habitacle) ;
- la deuxième catégorie concerne le cycle de conduite : situation du trafic et réglementations, situation réelle comparée au cycle d'homologation, trafic urbain comparé au trafic sur autoroute, fonctionnement à vide du moteur et influence de la vitesse du véhicule sur le système d'air climatisé ;
- la troisième catégorie est le stationnement : au soleil ou à l'ombre, orientation du véhicule, ouverture ou non du toit ouvrant et/ou des vitres.

Les influences extérieures peuvent elles aussi être divisées aussi en trois catégories :

- la première catégorie inclut les conditions climatiques : vent, humidité, ensoleillement, température extérieure et densité de l'air (altitude) ;
- la deuxième catégorie concerne le confort thermique : transpiration, humidité de l'air dans l'habitacle, température dans l'habitacle, vitesse du flux d'air sur le ou les passagers, asymétrie thermique, ensoleillement des passagers, température moyenne de rayonnement, modèle thermique du véhicule ;
- la troisième catégorie est relative à l'occupation du véhicule : chaleur corporelle, préférences des passagers, tenue vestimentaire des passagers, convection de chaleur/d'humidité, capacité thermique, degré hygrométrique.

B. Analyse de la surconsommation des systèmes individuels

1. Evaluation de la surconsommation à l'aide d'une étude bibliographique

Les résultats d'une étude CENERG et ADEME [21,22] sont résumés dans le **Tableau 12**. Dans cette étude, la surconsommation a été mesurée en laboratoire sous la contrainte de deux températures extérieures (30°C et 40°C), pour trois types de véhicules différents (essence, diesel et turbo diesel) durant la conduite d'un cycle d'homologation (NEDC). La température intérieure souhaitée était de 20°C. Les influences de l'ensoleillement de la carrosserie et du

vent sur la carrosserie n'ont pas été considérées étant donné que les tests ont été conduits dans un local conditionné.

	<i>Essence</i>		<i>Diesel</i>		<i>Turbo-Diesel</i>	
	<i>30°C</i>	<i>40°C</i>	<i>30°C</i>	<i>40°C</i>	<i>30°C</i>	<i>40°C</i>
Urbain	31 %	38 %	26 %	28 %	40 %	42 %
Non-urbain	16 %	20 %	12 %	15 %	28 %	33 %

Tableau 12 : Surconsommation relative (%) [24]

Il apparaît que la surconsommation est relativement élevée, c'est-à-dire entre 12% et 42% (+0,7 l/100km et 4 l/100km). On constate aussi que cette surconsommation est plus élevée en milieu urbain qu'en milieu rural. Les résultats démontrent une différence de surconsommation entre les différentes technologies de moteur.

Le type de système d'air climatisé a également une influence sur la surconsommation. CRF [23] a testé cinq types de systèmes différents, les résultats sont repris au **Tableau 13**. Durant l'étude CRF, cinq véhicules modernes avec injection directe « common rail » ont été testés dans une chambre climatisée alors qu'ils effectuaient un cycle d'homologation (NEDC). Le véhicule 5 était un prototype avec un système d'air climatisé optimisé. Ces systèmes d'air climatisé ont été évalués sous 4 conditions différentes (voir **Tableau 14**). Les résultats sont résumés dans le **Tableau 15** et le **Tableau 16**. Dans cette étude, on note également une surconsommation significative allant de 21 à 57% ou de 1 à 2,45 l/100km. Le véhicule 5 (prototype) a la surconsommation la plus faible grâce à l'application d'un système d'air climatisé optimisé avec un compresseur à déplacement variable et à contrôle externe.

	Cylindrée	Classe du véhicule	Compresseur	Contrôle de l'A/C
Véhicule 1	1900	B	Course fixe	Manuel
Véhicule 2	1900	D	Course variable, contrôle interne	Automatique
Véhicule 3	1900	D	Course variable, contrôle externe	Automatique
Véhicule 4	2000	B	Course variable, contrôle interne	Manuel
Véhicule 5	1900	B	Course variable, contrôle externe	Automatique

Tableau 13 : Systèmes d'air climatisé [2]

	Full Charge (FC)	Low Charge (LC)
Journée estivale moyenne européenne: température extérieure 28°C et humidité relative 50%	Maximal	Réduction de la température jusqu'à 20°C
Journée estivale chaude européenne: température extérieure 35°C et humidité relative 60%	Maximal	Réduction de la température jusqu'à 23°C

Tableau 14 : Conditions d'utilisation

	Mode	Temp. sortie A/C (°C)	Temp. Habitacle (°C)	Surconsommation	
				l/100km	(%)
Véhicule 1	Fc	12,9	20,4	2,45	53%
	Lc	12,0	21,6	1,70	37%
Véhicule 2	Fc	16,0	22,0	2,15	42%
	Lc	12,6	22,1	1,55	30%
Véhicule 3	Fc	11,8	20,5	2,46	44%
	Lc	18,2	23,8	1,95	35%
Véhicule 4	Fc	12,1	19,9	1,98	40%
	Lc	6,0	18,9	1,79	36%
Véhicule 5	Fc	13,3	20,6	1,16	25%
	Lc	12,0	21,7	0,99	21%

Tableau 15 : Surconsommation pour une journée estivale moyenne européenne

	Mode	Temp. sortie A/C (°C)	Temp. Habitacle (°C)	Surconsommation	
				l/100km	(%)
Véhicule 1	Fc	23,0	28,9	2,77	57%
	Lc	19,3	28,4	2,00	41%
Véhicule 2	Fc	23,1	29,3	2,79	53%
	Lc	16,3	28,1	1,92	36%
Véhicule 3	Fc	20,9	28,5	3,18	56%
	Lc	21,1	28,7	2,79	49%
Véhicule 4	Fc	21,2	29,1	2,19	41%
	Lc	13,4	27,8	2,07	39%
Véhicule 5	Fc	13,2	23,4	1,48	30%
	Lc	13,2	24,9	1,18	24%

Tableau 16 : Surconsommation pour une journée estivale chaude européenne

Récemment, l'ADEME a publié une étude dans laquelle l'utilisation d'air climatisé a été analysée pour 26 véhicules [24]. Cette évaluation était basée sur le cycle d'homologation NEDC, avec une valeur requise de 20°C est requise pour l'intérieur de l'habitacle, alors que la température extérieure était de 30°C pour le premier cycle et de 40°C pour le second.

Pour les véhicules à essence, une surconsommation moyenne de 3,11 /100km (+31%) a été notée pour la partie urbaine du cycle de vitesse pour une température extérieure de 30°C. Pour une température extérieure de 40°C, la surconsommation est montée jusqu'à 38%. Pour la partie non urbaine du cycle, les valeurs de surconsommation sont nettement plus faibles. Elles étaient de 0,9 l/100km de surconsommation pour une température extérieure de 30°C et de 1,3 l/100km pour 40°C (soit respectivement +16% et +20%).

L'analyse des véhicules diesel a donné les résultats suivants. Lors d'un cycle urbain effectué à une température extérieure de 30°C une surconsommation de 2,4 l/100km (+26%) est constatée pour les moteurs diesel. Cette surconsommation est de 4,0 l/100km (+43%) pour les moteurs turbo diesel. Lors d'un cycle non urbain la surconsommation est de 0,7 l/100km (+12%) pour les moteurs diesel et de 1,5 l/100km (+28%) pour les moteurs turbo diesel.

L'ADEME [24] également analysé les surémissions supplémentaires. La charge supplémentaire due au fonctionnement du compresseur du système d'air climatisé a un impact sur les émissions du moteur car les paramètres de la combustion sont modifiés. Les émissions (en g/km) ont été mesurées pour différents types de véhicules lors du cycle d'homologation (NEDC) exception faite des émissions durant les 40 premières secondes lors d'un démarrage à froid. Le **Tableau 2** présente les résultats moyens de cette série de mesures. Il est à remarquer que dans certains cas, l'utilisation d'un système d'air climatisé diminue les émissions (CO et hydrocarbures dans les véhicules diesel).

	CO	Hydrocarbures	NOx	Partic. fines
Essence				
Urbain	+17%	~0	+74%	
Rural	+75%	~0	+51%	
Diesel				
Urbain	-30%	-24%	+47%	+60%
Rural	-28%	-23%	+27%	+32%

Tableau 2 : Émissions moyennes de polluants mesurés en g/km - Écart en % entre essais climatisation en marche et sans climatisation

Le TNO a également effectué une étude sur les effets de l'utilisation de systèmes d'air climatisé dans les véhicules [25]. La moyenne des augmentations de consommation de carburants mesurée était de 27% lors de l'utilisation du système d'air climatisé à pleine puissance.

Le TNO propose également des facteurs de correction d'émissions (voir **Tableau 17**).

carburant	CO			Hydrocarbures			NO _x			PM ₁₀		
	urbain	rural	auto-route	urbain	rural	auto-route	urbain	rural	auto-route	urbain	rural	auto-route
<i>essence/GPL</i>	8,5	13,0	3,8	4,0	3,7	1,7	2,0	1,0	1,2	n.d.	n.d.	n.d.
<i>Diesel</i>	12,0	0,5	1,0	0,5	1,0	2,0	1,6	1,5	1,5	2,4	1,6	3,6

Tableau 17 : Facteurs de correction d'émissions pour véhicules lors d'une utilisation du système d'air climatisé à plein régime. (1 = pas d'émissions supplémentaires) [25]

Les facteurs de correction d'émissions doivent être multipliés par les émissions « standards » du véhicule (c'est-à-dire lorsque le système d'air climatisé n'est pas utilisé). Ces facteurs, et c'est certainement le cas pour le CO et les hydrocarbures, sont nettement plus élevés que ce qui a été affirmé jusqu'à présent dans d'autres études [26].

Selon le TNO, cela s'expliquerait par deux éléments. Premièrement, ces facteurs ont été obtenus lors de mesures faites pendant l'utilisation du système d'air climatisé lorsqu'il fonctionnait à plein régime. Dans la pratique, le système ne fonctionnera pas en permanence et lorsqu'il est enclenché, il ne fonctionnera pas toujours à plein régime. Le système de management du moteur constituerait la seconde explication. L'enclenchement de la climatisation engendrerait une surcharge de 4 à 6 kW selon le TNO. Cette surcharge est conservée lorsque le moteur tourne au ralenti (lorsque le véhicule est à l'arrêt). Pour faire en sorte que le moteur continue de tourner de manière optimale, il y a une interaction entre le système de management du moteur et le système d'air climatisé. La plupart des moteurs ne sont pas calibrés pour fonctionner de manière optimale (du point de vue des émissions) à faible charge. Le TNO explique que la majeure partie des moteurs passent à un mélange plus riche ($\lambda < 1$) quand ils tournent au ralenti et que l'air climatisé est enclenché. La conséquence est que le catalyseur ne peut plus oxyder le CO et les hydrocarbures, ce qui augmente les émissions de CO et d'hydrocarbures.

2. Evaluation de la surconsommation à l'aide de simulations

La Vrije Universiteit Brussel a développé un programme de simulation de véhicules (Vehicle Simulation Program) VSP, qui permet d'analyser les caractéristiques individuelles des véhicules sur base du temps.

VSP permet d'avoir un aperçu des raisons techniques qui sont à la base des émissions dues au système d'air climatisé, d'une part, et aux paramètres du véhicule et de la route, d'autre part.

Un tel programme de simulation requiert des données de véhicules très détaillées, ce qui signifie que tant que l'on ne dispose pas de ces données pour un échantillon représentatif du parc automobile, il est impossible d'obtenir des résultats généralisables à partir du programme de simulation.

Trois véhicules ont été sélectionnés dans la banque de données VSP :

- ✓ **Véhicule 1:** moteur essence 1l, 0.8 tonnes (*données reçues en 1991*) ;
- ✓ **Véhicule 2:** moteur essence 3l, 16 soupapes à injection électronique et catalyseur 3W, 1.4 tonnes (*données reçues en 1996*) ;
- ✓ **Véhicule 3:** moteur diesel 1.9l, 1.7 tonnes (*données reçues en 1997*).

Le but de cette étude n'est pas d'obtenir des résultats représentatifs du parc automobile complet, mais de décrire les raisons techniques qui forment la cause de l'impact des systèmes d'air climatisé sur la consommation et les émissions des véhicules. Les résultats forment une indication, étant donné qu'ils ne valent que pour les modèles de véhicules étudiés. Les modèles "VSP" sont basés sur des cartes d'émissions *mesurées* et sont donc soumis aux limitations inhérentes aux mesures d'émissions. Les conclusions basées sur les simulations de résultats ne peuvent être tirées que si la différence entre deux résultats est d'au moins 5%.

L'interface utilisateur de VSP est présentée dans la **Figure 9**. Un exemple de modèle de véhicule est représenté dans la **Figure 10**.

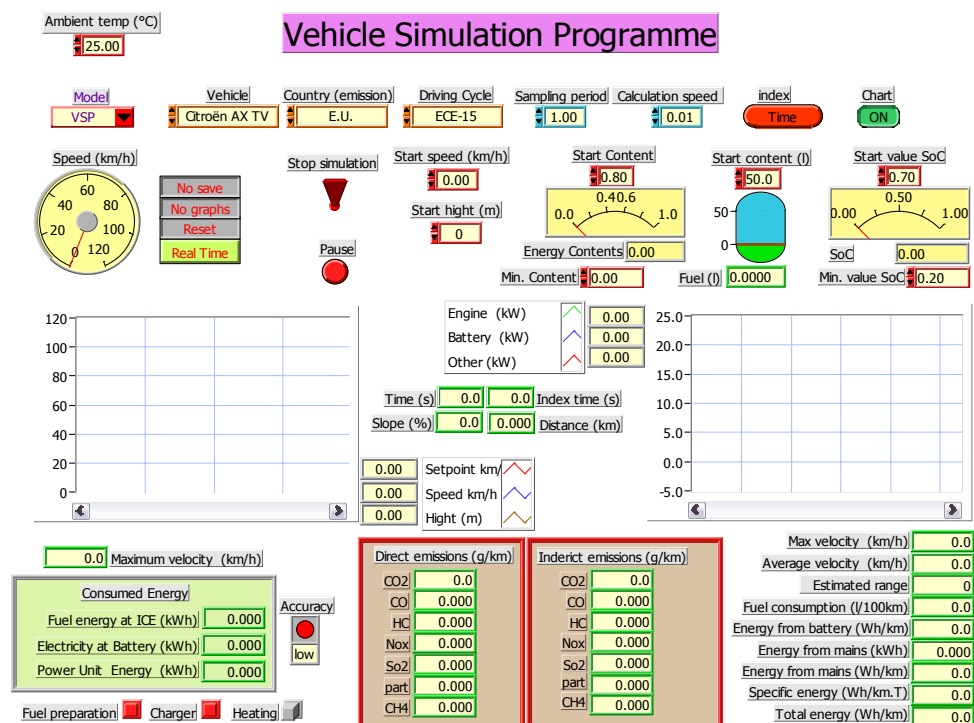


Figure 9 : Interface d'utilisation de VSP

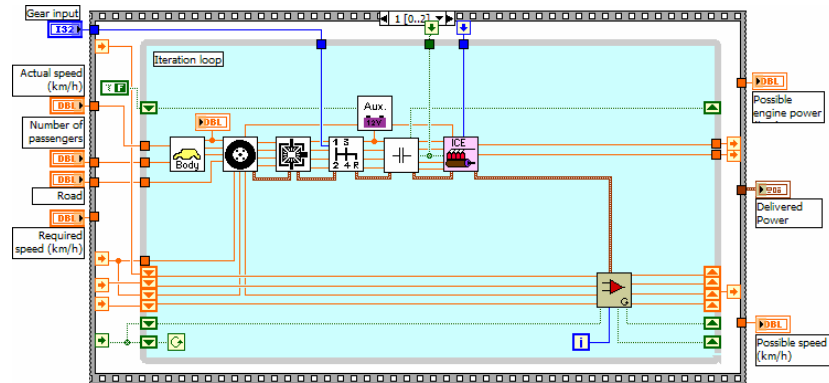


Figure 10 : Modèle de simulation d'un véhicule à essence en VSP

Un logiciel permettant d'analyser l'impact des systèmes d'air climatisé a spécialement été conçu pour cette étude. Ce modèle est basé sur l'analyse de l'Ecole des Mines de Paris et d'ARMINES à la demande la Commission Européenne [26].

La **Figure 11** représente l'interface développée pour le modèle airco et la **Figure 12** montre le modèle empirique correspondant. Ce modèle est un modèle simplifié. Il simule la surcharge au niveau du moteur en fonction de la température ambiante et du rythme du moteur (nombre de tours/minute) (**Tableau 18**). Le modèle tient également compte de la durée d'utilisation du système d'air climatisé en fonction de la température ambiante (**Tableau 19**). Ces données ont été traitées statistiquement et introduites dans le logiciel.

Un modèle détaillé, sur base des cycles thermodynamiques, d'une régulation de débit, du recyclage de l'air, de systèmes de contrôle et de régulation de température n'était pas réalisable dans le cadre de cette étude. Par ailleurs, le modèle utilisé n'a pas tenu compte de l'influence de l'ensoleillement de la carrosserie ni de l'influence de la circulation de l'air et du vent autour du véhicule.

Pm(kW)	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C	45 °C
900 tpm	0,42	0,67	0,91	1,08	1,25	1,32	1,39
1500 tpm	0,55	1,19	1,82	1,88	1,94	2,31	2,67
2500 tpm	0,67	1,39	2,10	2,39	2,67	2,90	3,13
3500 tpm	0,73	1,47	2,20	2,60	3,00	3,20	3,40
	15/30 °C	20/35 °C	25/40 °C	30/45 °C	35/50 °C	40/55 °C	45/60 °C
fonctionnement à vide	0,64	0,88	1,13	1,26	1,40	1,47	1,54

Tableau 18 : Surcharge du moteur en fonction de la température extérieure et de la vitesse du moteur ainsi que lors d'un fonctionnement à vide [26].

	12,5<T°<17,5	17,5<T°<22,5	22,5<T°<27,5	27,5<T°<32,5	32,5<T°<37,5	37,5<T°<42,5	42,5<T
Utilisation A/C	30%	60%	90%	100%	100%	100%	100%

Tableau 19 : Hypothèse d'utilisation de la climatisation en fonction de la température extérieure [26].

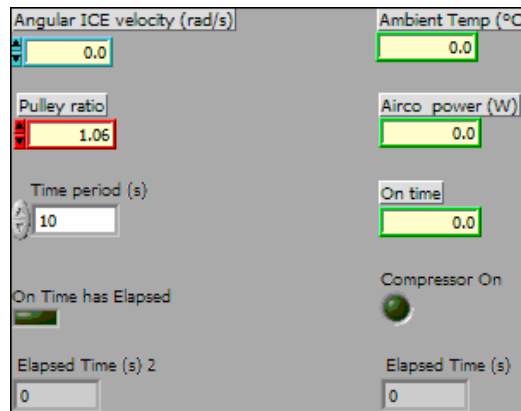


Figure 11 : Interface utilisateur du système d'air climatisé VSP

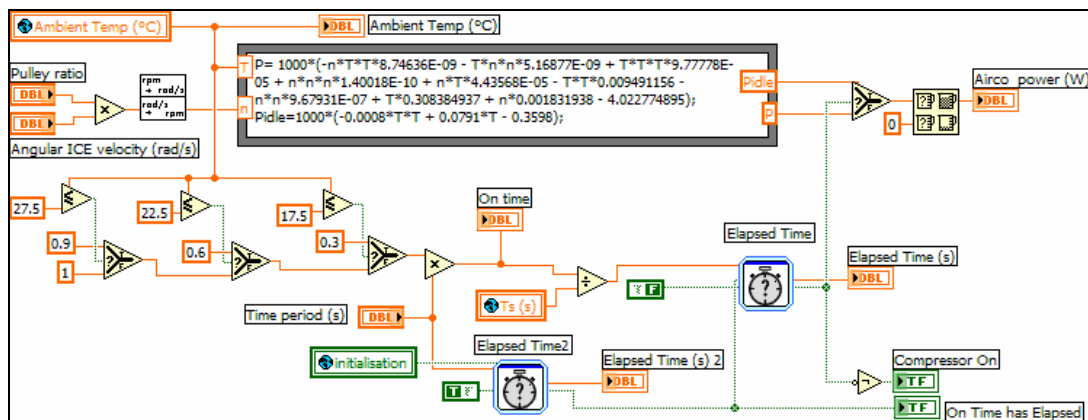


Figure 12 : Modèle de simulation du système d'air climatisé VSP

L'utilisation de systèmes d'air climatisé a été évaluée en utilisant 4 cycles différents décrits ci-dessous :

- NEDC : cycle d'homologation avec un profil de vitesses urbain et non-urbain ;
- ECE ; partie urbaine du cycle NEDC ;
- Cycle 1 : cycle de vitesses urbain mesuré sur route ;
- Cycle 2 : cycle de vitesses urbain et non urbain réellement mesuré sur route.

La Figure 13 donne un exemple de cycle simulé, le NEDC, et la Figure 14 montre la puissance de moteur simulée correspondante.

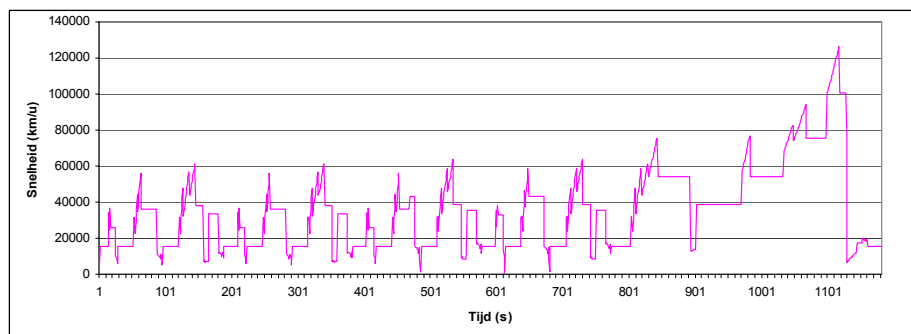


Figure 13 : Exemple de cycle simulé NEDC

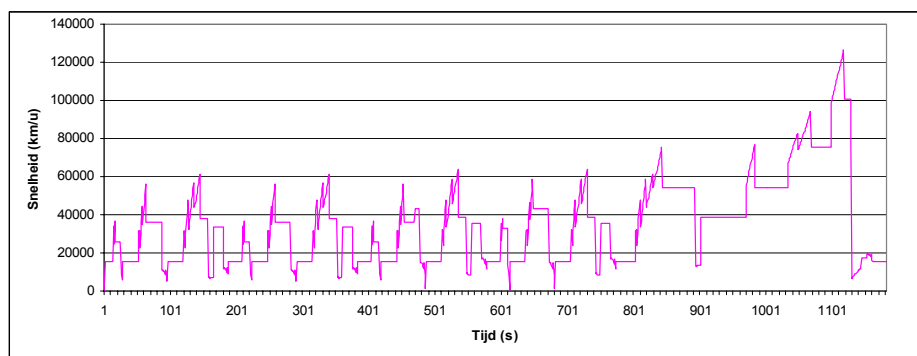


Figure 14 : Exemple de puissance de moteur simulée lors du NEDC

Les simulations ont été effectuées avec 3 températures extérieures différentes : 20°C, 25°C et 30°C. La combinaison de 3 véhicules, sur 4 cycles, avec 3 températures extérieures différentes donne un total de 36 analyses de simulation effectuées. Les résultats sont résumés dans les **tableaux 20 et 21**.

Le **Tableau 20** démontre que le type de véhicule, ainsi que le type de cycle de vitesse influencent la surconsommation. La sensibilité des véhicules diesel à la surconsommation semble être plus faible que celle des véhicules à essence.

De plus, on peut se rendre compte que la surconsommation relative, due à l'utilisation des systèmes d'air climatisé, est plus élevée en milieu urbain, qu'en milieu rural.

Conformément aux attentes, une température ambiante plus élevée a pour effet d'augmenter la consommation.

Les émissions de CO₂, ainsi que les émissions indirectes dues à la production de carburant sont proportionnelles à cette surconsommation. Le **Tableau 21** présente les émissions de CO, d'hydrocarbures et de NOx. Le véhicule à essence évalué (véhicule 2) réagit très différemment par rapport au véhicule diesel (véhicule 3). Tout comme le démontrait l'étude bibliographique, l'utilisation d'un système d'air climatisé réduit les émissions d'hydrocarbures des véhicules diesel. Les émissions de CO diminuent également, sauf dans les cycles de vitesse urbains.

	Temp.	NEDC	ECE	Cycle 1	Cycle 2
Véhicule 1	20 °C	16%	24%	19%	13%
Véhicule 2		12%	20%	14%	9%
Véhicule 3		7%	14%	10%	4%
Véhicule 1	25 °C	20%	27%	25%	18%
Véhicule 2		16%	28%	19%	13%
Véhicule 3		9%	17%	13%	6%
Véhicule 1	30 °C	24%	32%	29%	21%
Véhicule 2		19%	34%	23%	15%
Véhicule 3		11%	19%	16%	7%

Tableau 20 : Résultats Simulations – surconsommation (par rapport l/100km)

25°C	Véhicule 2				Véhicule 3			
	NEDC	ECE	Cycle 1	Cycle 2	NEDC	ECE	Cycle 1	Cycle 2
Emissions directes CO	18%	30%	20%	15%	-1%	17%	26%	6%
Emissions directes hydrocarbures	22%	30%	23%	17%	-13%	-23%	-22%	-15%
Emissions directes NOx	34%	50%	47%	22%	9%	18%	10%	4%

Tableau 21 : Résultats Simulations - Emissions (par rapport g/km)

Les résultats des simulations sont différents pour les véhicules essence (véhicule 2) et diesel (véhicule 3). Certains écarts apparaissent également entre les divers cycles analysés. Les raisons de ces différences sont expliquées plus loin (voir point C de ce chapitre).

La conclusion au vu des résultats des simulations, est que ceux-ci se trouvent dans la lignée des résultats de l'étude bibliographique. Par contre, la surconsommation simulée y est un peu moins élevée que celles mesurées (cf. étude bibliographique). Les simulations ont permis d'étudier différents facteurs d'influence comme la température extérieure, le type de moteur, les types de cycles de vitesse (urbain ou ruraux).

3. Simulation de la surconsommation due à l'accroissement de la masse

L'installation d'un système d'air climatisé augmente le poids total d'un véhicule. Bien que ce poids additionnel ne représente que 10kg sur un poids total du véhicule d'une tonne, il est bel et bien présent et il faut donc en tenir compte. Même lorsque le système d'air climatisé n'est pas en fonctionnement, il engendrera une légère surconsommation.

Cette surconsommation fut évaluée à l'aide de VSP. Le poids des trois véhicules analysés fut augmenté de 10kg et la surconsommation fut évaluée sur base de 4 cycles de vitesse. Le **Tableau 22** résume les résultats.

	l/100km	NEDC	ECE	CYCLE1	CYCLE2
VHCL1		0,023	0,015	0,037	0,032
VHCL2		0,018	0,026	0,027	0,015
VHCL3		0,016	0,018	0,034	0,020

Tableau 22 : Surconsommation lors d'un accroissement du poids de 10kg.

Une surconsommation entre 0,015 l/100km et 0,037 l/100km peut être observée lorsque la masse du véhicule est augmentée de 10 kg. Cette surconsommation est dépendante du cycle de roulage et du véhicule considéré. Les résultats obtenus sont comparables aux résultats publiés dans [26] et qui mentionnent une surconsommation de 0,05 l/100km pour un véhicule à essence et de 0,03 /100km pour un véhicule diesel pour une masse du véhicule augmentée de 10kg.

C. Comparaison Essence - Diesel

L'explication des différences entre les surconsommations et surémissions supplémentaires des véhicules (turbo) diesel, d'une part, et des véhicules essence, d'autre part, se situe au niveau du management du moteur et au niveau de la cartographie du moteur.

Une cartographie du moteur représente un paramètre particulier (consommation, émissions de CO, émissions de NOx, etc.) en fonction du domaine de fonctionnement complet du moteur, qui est caractérisé par le rythme du moteur et par le couple délivré. La consommation peut donc être cartographiée de cette façon pour chaque point de

fonctionnement du moteur. Ces cartographies dépendent du principe de combustion appliqué.

La charge supplémentaire due à l'utilisation d'un système d'air climatisé fait en sorte que le moteur se retrouve dans un autre régime de fonctionnement. La plupart des moteurs ne sont pas calibrés pour fonctionner de manière optimale (du point de vue des émissions) à faible charge. Cela fait en sorte que l'application de systèmes d'air climatisé aura un impact différent selon le type de moteur (essence, diesel, etc.). Les cartographies des moteurs déterminent non seulement la consommation, mais aussi les différentes surémissions supplémentaires (CO, NOx, hydrocarbures, etc.).

Les émissions des moteurs à allumage « spark-ignition » avec catalyseurs varient fortement en fonction du rapport air/carburant. Ce rapport air/carburant est défini comme étant la valeur Lambda (λ). Lorsque cette valeur est égale à 1, la combustion est stoechiométrique. Lors d'un ajustement stoechiométrique du moteur, la valeur Lambda sera maintenue à 1, ce qui donne les meilleurs résultats sur le plan des émissions lorsque l'on utilise un catalyseur. Par contre, lorsque l'ajustement du moteur n'est pas fait de manière précise, cela peut avoir de graves conséquences en matière d'émissions. Si λ est inférieur à 1, on dira du mélange qu'il est riche alors que l'on obtient un mélange pauvre lorsque λ est supérieur à 1. Le rendement de la combustion est bien plus élevé pour un mélange pauvre, mais les émissions de NOx seront plus élevées également (Si $\lambda = 1$ les émissions de NOx valent 0,4 g/kWh et si $\lambda = 1,4$ les émissions de NOx augmentent jusqu'à 2,5 - 3 g/kWh) [27].

Les véhicules à essence se comportent de manière totalement différente. Les véhicules, fonctionnant avec des mélanges enrichis ($\lambda < 1$), ont tendance à émettre plus de CO et d'hydrocarbures lors d'accélération brusques. La figure ci-après illustre ce phénomène de manière claire en présentant le rendement d'un catalyseur par rapport à la réduction des émissions pour différentes proportions air-carburant.

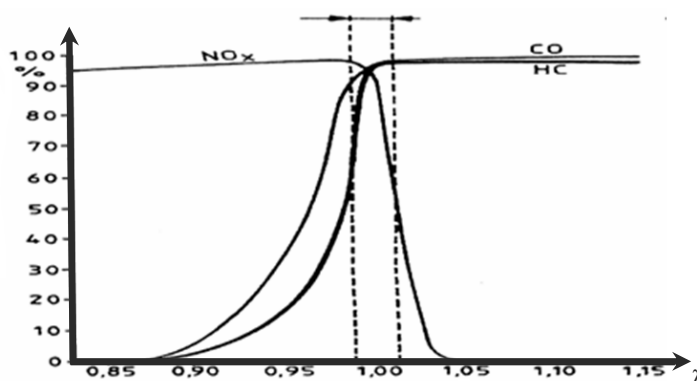


Figure 15 : Influence de λ sur l'efficacité de conversion d'un catalyseur de moteur à essence.

Cette figure démontre clairement que l'efficacité de conversion du catalyseur est la plus élevée pour les trois polluants lorsque $\lambda = 1$. De plus ce graphe démontre qu'une légère anomalie dans le fonctionnement du système de contrôle d'émissions d'un véhicule peut avoir d'importantes conséquences en ce qui concerne les émissions, sans que cela ne perturbe le fonctionnement normal du véhicule.

La plupart des moteurs passent à un mélange plus riche ($\lambda < 1$) quand ils tournent à vide et que l'air climatisé est enclenché. La conséquence est que le catalyseur ne peut plus oxyder le CO et les hydrocarbures, ce qui augmente les émissions de CO et d'hydrocarbures.

Un moteur diesel a souvent une cartographie du moteur plus stable, en ce qui concerne la consommation de carburant, qu'un moteur à essence. Ceci implique une moindre sensibilité aux variations des conditions de fonctionnement. Le parcours typique des émissions sur les cartographies des moteurs est également différent selon le type de moteur (diesel ou essence).

Par nature, les véhicules diesel produisent plus d'émissions de NO_x que les véhicules à essence. Ceci s'explique par le fait que les véhicules diesel fonctionnent avec des mélanges pauvres (λ élevé) et à des températures beaucoup plus élevées. De plus les catalyseurs classiques ne permettent pas encore de limiter les émissions de NO_x.

D. Surconsommation due aux conditions climatiques (Le cas de la Région de Bruxelles-Capitale).

Afin d'évaluer l'influence de l'emploi de systèmes d'air climatisé dans les véhicules en Région de Bruxelles-Capitale, un certain nombre de calculs ont été effectués sur base d'une référence [26]. Le profil de température de Bruxelles a été appliqué et un cycle de roulage exclusivement urbain a été utilisé.

Dans une première phase, la puissance mécanique d'entrée du système d'air climatisé a été calculée. Les capacités de refroidissement (exprimées en kW) ainsi que le COP (Coefficient de Performance) permettent de mesurer la puissance mécanique pour des valeurs discrètes de températures extérieures à différentes températures et à différents rythmes de moteur. La régression linéaire permet de calculer la puissance mécanique correspondant à une température extérieure donnée.

Il a été tenu compte du cycle de roulage ainsi que de son influence sur la consommation. La répartition du rythme de roulage tout au long du cycle de roulage a également été prise en considération. En ce qui concerne la situation de la Région de Bruxelles-Capitale, le cycle de roulage urbain ainsi que la répartition correspondante du rythme du moteur ont été prise en compte.

Les statistiques nationales et régionales permettent d'obtenir le nombre de kilomètres parcourus annuellement et d'utiliser ce nombre comme point de départ pour le calcul de la surconsommation due à l'utilisation de systèmes de climatisation. Selon les statistiques fédérales, le nombre moyen de kilomètres parcourus en 2003 était de 15.039 km (indépendamment du carburant utilisé).

Afin de calculer la consommation supplémentaire, le rendement moyen du moteur ainsi que la densité énergétique du carburant ont été examinés. Les rendements utilisés pour les moteurs peuvent être qualifiés d'optimistes.

Rendement du moteur	urbain	Contenu énergétique du carburant	
		[kWh/L]	
Essence	22%	Essence	8.96
Diesel	24%	Diesel	10.22

Tableau 23 : Rendement et contenu énergétique

Le poids supplémentaire dû au système d'air climatisé provoque une augmentation de la consommation. Celle-ci est calculée individuellement et est incluse dans la présente analyse.

Poid du système airco		Surconsommation (poid +10kg)	
[kg]		[L/100km]	[SAE]
R-134a	13.4	Essence	0.05
R-744	19.3	Diesel	0.03

Tableau 24: Poids supplémentaire

De plus, un certain nombre de suppositions ont été introduites à propos de l'utilisation de systèmes d'air climatisé, notamment la demande moyenne de refroidissement en fonction de la température extérieure, ainsi que l'application du recyclage de l'air et le choix du type d'orientation du courant d'air.

Outside Temp (°C)	T°<12.5	12.5<T°<17.5	17.5<T°<22.5	22.5<T°<27.5	27.5<T°<32.5	32.5<T°
A/C use	0%	30%	60%	90%	100%	100%
Recirculation mode use	0%	0%	0%	0%	25%	50%
Evap air flow (kg/h)		150	150	150	350	550
low charge (idle)	0%	100%	70%	40%	0%	0%
high charge	0%	0%	30%	60%	100%	100%

Tableau 25 : Utilisation du système d'air climatisé

Finalement, il a été tenu compte des conditions d'utilisation des systèmes d'air climatisé pour obtenir la surconsommation d'énergie (exprimée en kW) du moteur, en fonction des intervalles de températures extérieures et ceci par type de cycle de conduite. Les valeurs obtenues pour un cycle de conduite urbain sont présentées dans le tableau suivant.

Outside Temp (°C)	T°<12.5	12.5<T°<17.5	17.5<T°<22.5	22.5<T°<27.5	27.5<T°<32.5	32.5<T°
R-134a (essence) urbain	0	0.23	1.33	4.05	6.42	6.49
R-134a (diesel) urbain	0	0.21	1.22	3.72	5.89	5.95
R-744 (essence) urbain	0	0.23	1.59	5.32	8.80	9.73
R-744 (diesel) urbain	0	0.21	1.45	4.88	8.06	8.92

Tableau 26 : Puissance supplémentaire requise par le système d'air climatisé (en kW)

En fonction des données climatologiques et sur base des données d'utilisation, la puissance (en kW) requise pour l'utilisation du système d'air climatisé est représentée dans le **Tableau 26**.

Les données climatologiques pour la Région de Bruxelles-Capitale sont présentées dans le tableau suivant et proviennent de la **Figure 16**.

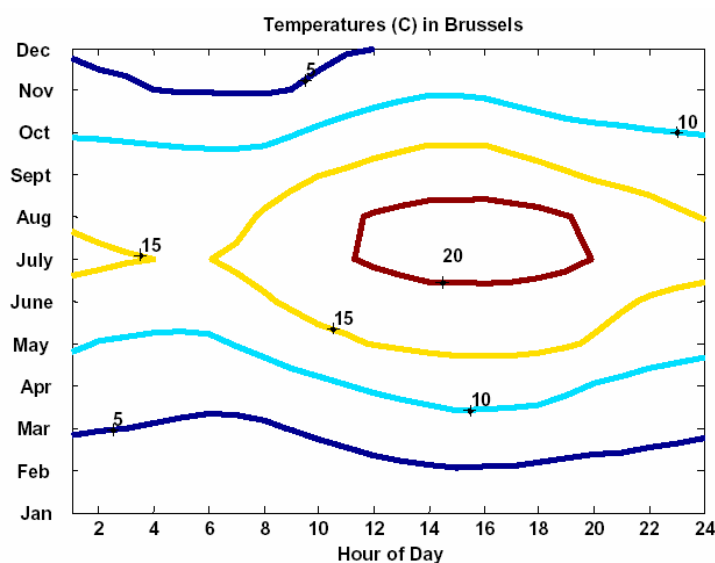


Figure 16 : Carte des températures à Bruxelles

La carte ci-dessus permet d'obtenir les données dans le tableau suivant :

	T°<12,5	12,5<T°<17,5	17,5<T°<22,5	22,5<T°<27,5	27,5<T°
Bruxelles	60%	27%	12%	1%	0%

Tableau 27 : Répartition des températures à Bruxelles

Les surconsommations pour deux systèmes de climatisation (systèmes R-134a et R-744) ont été calculées sur base des données relatives aux températures relevées en Région de Bruxelles-Capitale.

Les résultats de ces calculs sont présentés dans le **Tableau 28**.

Bruxelles urbain	Puissance	Energie	Surconsommation airco			Consommation	Surplus	emissions
	Somme		Puissance	Poids	Total	Véhicule		CO2
	[kW]	[kWh]	[L/jaar]	[L/jaar]	[L/jaar]	[L/jaar]	[%]	[kg/jaar]
R-134a (essence)	0,26	197,16	22,01	10,08	32,08	992,57	3,23%	70,97
R-744 (essence)	0,31	230,17	25,69	14,51	40,21	992,57	4,05%	88,94
R-134a (diesel)	0,24	180,69	17,68	6,05	23,73	1233,20	1,92%	64,00
R-744 (diesel)	0,28	210,17	20,57	8,71	29,28	1233,20	2,37%	78,96

Tableau 28 : Influence de l'utilisation de système d'air climatisé sur la consommation de carburant et sur les émissions de CO2 en Région de Bruxelles-Capitale.

La différence entre les deux systèmes d'air climatisé en cycle urbain est notable, ainsi que la différence entre les véhicules diesel et essence. La fraction imputable au poids supplémentaire du au système d'air conditionné est présentée également.

XI. Emissions Totales en Région de Bruxelles-Capitale

A. Total Equivalent Warming Impact (TEWI)

Dans ce paragraphe un calcul de l'équivalent total de réchauffement climatique ou 'Total Equivalent Warming Impact (TEWI)' est effectué sur base annuelle.

- Les émissions directes

Les données provenant du point F du chapitre IX sont utilisées. Les valeurs provenant du **Tableau 11** (basées sur une durée de vie de 12 ans) ont été recalculées pour obtenir des données sur base annuelle. On distingue la situation réaliste et la situation optimisée pour le système R-134a. La situation réaliste correspond à la moyenne des situations optimiste et pessimiste provenant du **Tableau 11**. La situation optimisée pour le système R-134a correspond à un potentiel de réduction décrit dans la référence [26].

- Les émissions indirectes

Les données provenant du point X.D du chapitre précédent ayant rapport aux émissions indirectes spécifiques à la Région de Bruxelles-Capitale sont également utilisées pour l'analyse TEWI. Ces résultats incorporent également l'influence des émissions de « well-to-tank » dues à la surconsommation due au fonctionnement d'un système d'air climatisé. La littérature existante néglige souvent cet aspect. Ces émissions « well-to-tank » reflètent l'impact de la production, du transport et de la distribution de carburant nécessaire à la consommation supplémentaire. Pour ce faire les facteurs d'émissions provenant de l'étude MEET ont été utilisés [28]. Ces facteurs d'émissions reflètent les émissions de CO₂ et de méthane pour la production, le transport et la distribution d'une unité (supplémentaire) de carburant (en milligramme par kWh). En utilisant la densité énergétique du carburant utilisé, les émissions « well-to-tank » peuvent être calculées facilement en partant de la surconsommation.

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous:

	Bruxelles (urbain)					
	direct			indirect		
	R-134a Realistic	R-134a Enhanced	R-744	R-134a Realistic	R-134a Enhanced	R-744
Petrol	190,6	59,1	1,0	70,7	70,7	86,7
Diesel	190,6	59,1	1,0	64,3	64,3	78,1

Tableau 29 : Emissions directes et indirectes

Les résultats sont également présentés de manière graphique dans la **Figure 17**.

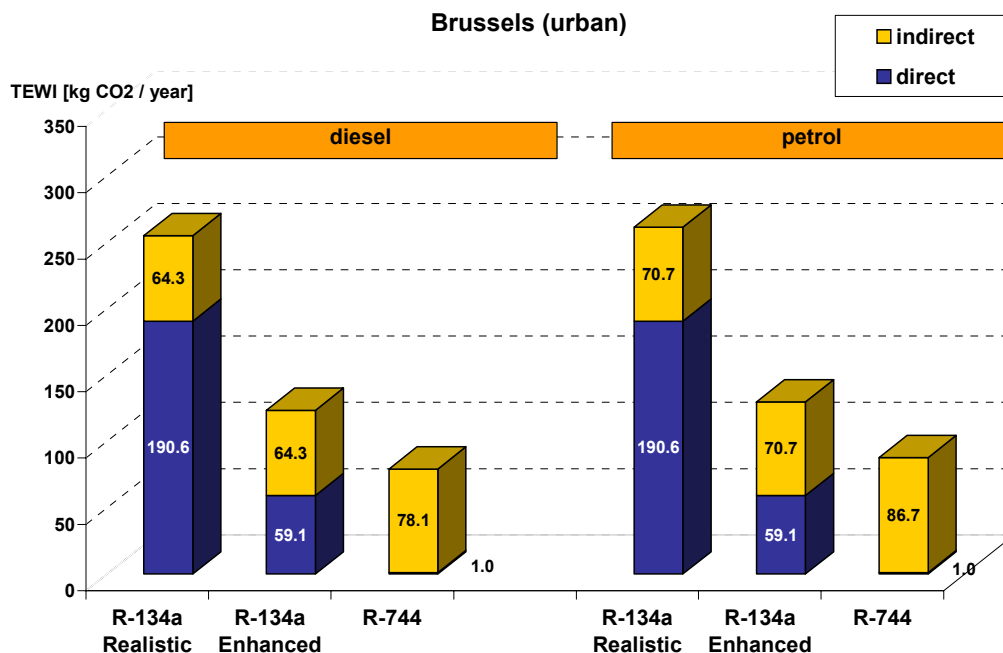


Figure 17: TEWI pour la Région Bruxelloise

Dans la figure ci-dessus, on peut voir le potentiel de réduction de certaines améliorations à apporter au système R-134a par rapport à la situation actuelle. Ceci est comparé au système R-744 qui se caractérise par des émissions indirectes plus élevées mais qui sont largement compensées par un impact direct bien inférieur.

Pour finir, une analyse des différentes contributions au TEWI a été effectuée. Cela permet de déterminer quelles sont les contributions les plus importantes aux émissions de gaz à effet de serre.

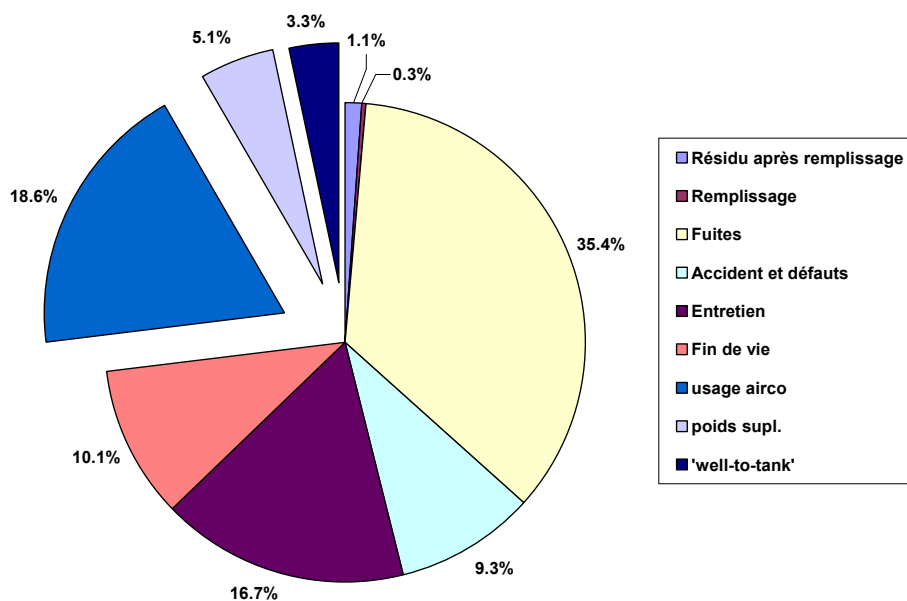


Figure 18: Répartition du TEWI et du « well-to-wheel »

Dans la figure ci avant, différentes contributions aux émissions totales d'un système d'air climatisé sont représentées par phase.

Ces résultats sont basés sur les résultats obtenus pour le système R-134a (réaliste) appliqué à un véhicule essence provenant d'une étude d'un cas spécifique à la Région de Bruxelles-Capitale (voir point X.D du chapitre précédent).

Une remarque importante concernant l'interprétation des résultats est que l'influence du fonctionnement d'un système d'air climatisé tient compte de l'utilisation du système comme résumé dans le **Tableau 25** et est basée sur les données climatologiques présentées le **Tableau 27**.

L'apport principal en émissions de GES provient clairement de la catégorie '(simples) fuites', ainsi que de la catégorie 'entretien'. L'apport dû au poids supplémentaire provenant du système d'air climatisé est important parce que cet apport est permanent. Ce résultat démontre aussi que l'apport du « well-to-tank » est limité mais certainement pas négligeable. Cet apport est plus favorable aux véhicules diesel et étant donné qu'il est proportionnel à la consommation de carburant, il est désavantageux pour le système R-744. Malgré ces quelques différences le système R-744 demeure nettement plus favorable que le système R-134a (amélioré), tant pour les véhicules diesel que pour les véhicules essence.

B. Surplus de consommation sur base annuelle.

Le paragraphe précédent traite de la surconsommation lorsque l'installation d'air climatisé est enclenchée. Cependant, le parc automobile n'est pas complètement équipé de ces systèmes, et, de plus, ces systèmes ne seront pas utilisés à pleine puissance durant toute l'année.

Les effets dus au parc automobile bruxellois complet n'étaient pas prévus dans la présente étude pour l'IBGE. Cependant, certains résultats peuvent être présentés sur base de la recherche effectuée précédemment pour AMINAL.

Dans le rapport méthodologique du "Taakgroep Verkeer en Vervoer" [29] une évaluation de l'utilisation de systèmes d'air climatisé a été faite pour la situation néerlandaise.

Année de construction	Proportion	Année de construction	Proportion	Année de construction	Proportion
1990	5%	1994	25%	1998	45%
1991	10%	1995	30%	1999	50%
1992	15%	1996	35%	2000	60%
1993	20%	1997	40%		

Tableau 30 : Présence de systèmes d'air climatisé dans les véhicules (pourcentage des ventes annuelles de véhicules neufs vendus aux Pays-Bas) [30]

Ces données ont été adaptées au parc automobile flamand dans une étude de la Vrije Universiteit Brussel, à la demande d'AMINAL [30]. Les émissions dues à l'utilisation d'air climatisé ont été évaluées pour le parc automobile flamand.

En ce qui concerne le parc automobile flamand de 1998, on peut estimer, sur base de ce tableau, que 5% des véhicules répondant à la norme Euro 0 sont équipés d'air climatisé,

contre 25% des véhicules répondant à la norme Euro 1 et 45% des véhicules répondant à la norme Euro 2.

Il n'y a pas de données disponibles concernant la durée moyenne de fonctionnement du système d'air climatisé aux Pays-Bas, ni en Flandre ou à Bruxelles. Cependant, une étude française estime que les systèmes d'air conditionné pour véhicules fonctionnent en moyenne 200 heures par an. Dans l'étude [29], on estime qu'étant donné le climat plus froid, les systèmes d'air climatisé ne fonctionnent que 100 heures par an aux Pays-Bas, mais que les vitesses de roulage ne sont pas différentes lorsque les systèmes d'air climatisé fonctionnent ou ne fonctionnent pas. Un temps de fonctionnement de 150 heures par an a été utilisé pour l'étude AMINAL concernant la Flandre. Dans ce cas, le pourcentage de kilomètres parcourus alors que le système d'air climatisé fonctionne est d'à peu près 26%.

	Proportion des kilomètres parcourus (%)	Effet sur la consommation (%)	Effet sur les émissions	Remarques
Air climatisé	26% (temps de fonctionnement)	+27%	voir Tableau 17	5% Euro 0; 25% Euro 1; 45% Euro 2

Tableau 31 : Hypothèses d'utilisation des systèmes d'air climatisé [30]

Selon cette étude AMINAL, l'utilisation de systèmes d'air climatisé impliquerait une augmentation de la consommation annuelle de carburant de 1,5% (par rapport à la consommation globale du parc automobile flamand).

		Emissions CO ₂ véhicules Flandre 1998 (kTon)				Effets globaux sur émissions CO ₂ parc automobile Flamand en 1998 (kton)
		total	urbain	rural	autoroute	airco
Essence	Euro 0	1855	750	503	603	6,5
	Euro 1	1412	634	370	408	24,8
	Euro 2	762	345	199	217	24,1
Diesel Indirect	Euro 0	1460	579	398	484	5,1
	Euro 1	1373	566	373	433	24,1
	Euro 2	840	351	229	260	26,5
Diesel direct	Euro 0	14	5	4	4	0,0
	Euro 1	134	55	37	42	2,4
	Euro 2	344	144	94	106	10,9
GPL	Euro 0	68	29	18	20	0,2
	Euro 1	35	15	10	10	0,6
	Euro 2	11	5	3	3	0,3
Total:		8308	3479	2238	2591	125,6
Proportion		100%	42%	27%	31%	1,5%

Tableau 32 : Effets globaux au niveau de la Flandre

Le **Tableau 33** démontre que l'utilisation de systèmes d'air climatisé a un grand effet sur les émissions de CO (+19%), ce qui s'explique surtout par l'effet important que ces facteurs ont sur les véhicules à essence (voir **Tableau 17**). A l'avenir, l'importance relative de ce facteur continuera de grandir étant donné que de plus en plus de véhicules seront équipés de systèmes de climatisation. En ce qui concerne les émissions d'hydrocarbures (voir **Tableau 33**), l'augmentation est estimée à 6% alors qu'elle est estimée à 8% pour les particules fines.

Globalement, les effets sur les émissions de NOx sont relativement faibles comparés aux autres polluants (**Tableau 33**).

	émissions véhicules Flandre 1998				Effets globaux sur émissions parc automobile flamand en 1998
	total	urbain	rural	autoroute	airco
CO (kTonne)	199,8	127	39	33,8	38,92
Hydrocarbures (kTonne)	31,4	21,7	5,7	4	1,89
NOx (kTonne)	48,4	14,9	11,4	22,1	0,79
PM10 (kTonne)	2,7	1,2	0,7	0,8	0,22
CO (%)	100%	64%	20%	17%	+19%
Hydrocarbures (%)	100%	69%	18%	13%	+6%
NOx (%)	100%	31%	24%	46%	+2%
PM10 (%)	100%	45%	25%	30%	+8%

Tableau 33 : Influence de l'utilisation de climatisation sur les émissions globales du parc automobile flamand 1998

Précisons que les conclusions tirées ici sont basées sur les émissions relatives aux systèmes de climatisation par rapport aux émissions globales (au niveau de la Flandre). Les résultats sont basés sur plusieurs études du TNO (voir **Tableau 17**), qui utilisent des surémissions supérieures à celles d'autres études (voir résultats de simulation (voir **tableau 21**) et études effectuées par l'ADEME (voir **Tableau 2**))

Par contre, l'apport de ces émissions peut être localisé et peut donc poser des problèmes de pollution atmosphérique importants au niveau local. Les effets globaux peuvent donc parfois paraître modestes, mais si un embouteillage se forme, les effets peuvent s'avérer être assez importants localement.

Après avoir analysé les divers types d'émissions pouvant résulter du fonctionnement des systèmes d'air conditionné automobile, nous allons consacrer les chapitres suivants à l'analyse économique des coûts induits par ces mêmes systèmes.

XII. Les coûts directs de l'air conditionné automobile

Pour rappel, l'objectif principal de cette étude est de dégager des éléments pouvant servir à une campagne de sensibilisation. L'argument financier étant généralement déterminant dans le choix du comportement du consommateur, l'analyse des coûts financiers liés à l'acquisition et à l'utilisation du système de conditionnement d'air automobile s'impose.

Les coûts directs mesurent la valeur des dépenses additionnelles destinées à l'achat ou l'installation, la réparation ou l'entretien des systèmes d'air climatisé. Les coûts directs totaux sont ventilés en coûts fixes et coûts variables.

A. Les coûts fixes

Les coûts fixes sont des coûts annuels indépendants de l'usage des systèmes d'air conditionné.

Dans le cadre de cette étude, nous avons retenu, comme l'unique poste des coûts fixes, le prix d'investissement d'un équipement d'air conditionné. Cette dépense peut s'effectuer soit directement lors de l'achat du véhicule (installation d'origine), soit ultérieurement (installation de deuxième monte).

Tous les prix repris ci-dessous sont exprimés en euros TVA (21%) comprise pour l'année 2004.

1. Le coût d'achat des systèmes d'air conditionné

Pour rappel, l'installation d'un système d'air conditionné peut être d'origine ou de deuxième monte. Les coûts de ces deux options sont examinés ci-après.

a) Le prix d'installation d'origine

La **figure 19** à la page suivante reprend les prix 2004 par marque de voitures pour l'installation d'un système d'air conditionné en option. Ces résultats sont issus de la consultation des documents disponibles auprès des constructeurs automobiles et d'enquêtes auprès des garages concessionnaires.

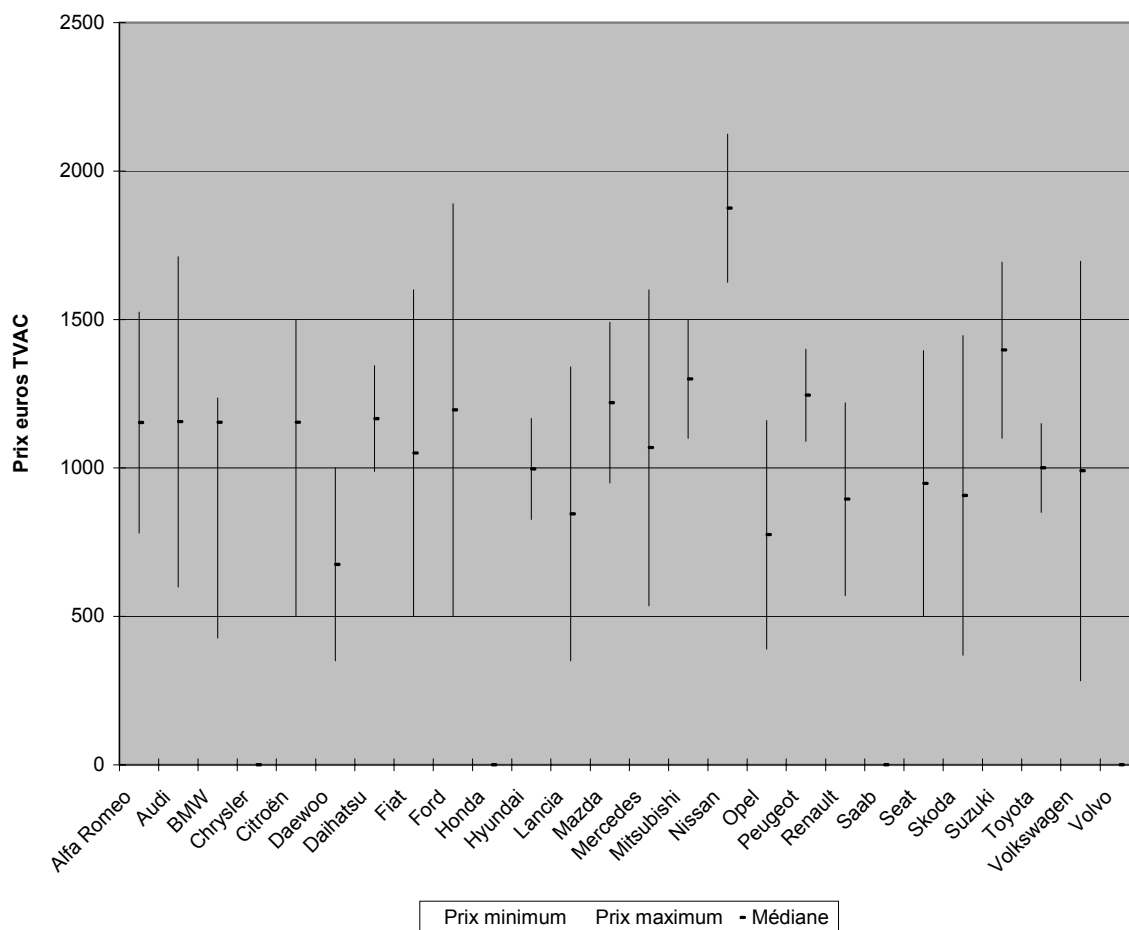


Figure 19 : Prix des options climatisation sur base des catalogues 2004

La détermination de la fourchette de prix d'installation d'origine d'un système de conditionnement s'est faite sur base des prix de cette option²¹ pour les différents modèles et versions de chaque marque. En effet, pour les versions ou modèles ayant la climatisation en série le coût d'investissement pour le consommateur n'est pas identifiable.

Afin de donner une meilleure vue d'ensemble de la large variation du coût d'achat au sein de chaque marque, nous avons préféré exprimer cette variable en une fourchette de prix plutôt qu'en une moyenne. En effet, cette dernière entraînerait la perte de beaucoup d'information.

La colonne des prix indique que le coût supplémentaire lié à l'air conditionné en option lors de la décision d'achat d'un véhicule se situe entre **283,14 €** et **2.125 €** toutes marques confondues. Cet intervalle des valeurs extrêmes comprend le prix pour obtenir aussi bien l'air conditionné manuel que celui automatique.

La limite inférieure de cette fourchette correspond aux tarifs minimaux de Volkswagen alors que la limite supérieure reprend les tarifs maximaux chez Nissan²².

²¹ Voir Annexe III: Prix d'achat d'origine d'un système d'air conditionné.

²² Ce résultat semble quelque peu étonnant, car généralement les voitures japonaises sont meilleur marché. Le prix des options Nissan ne figure pas dans les catalogues de la marque. Ce chiffre nous a été communiqué lors d'un entretien téléphonique avec un concessionnaire Nissan et il est dès lors à considérer avec prudence.

Il ressort de la **Figure 19** que l'intervalle de prix se situe plus généralement entre **900€ et 1.300€**.

L'analyse individuelle des marques, a mis en évidence que le coût le plus élevé (zone supérieure de la fourchette de prix) pour le consommateur se présentait dans la situation où il optait pour l'air conditionné (manuel ou automatique) sur une voiture conçue en série sans système de climatisation.

Inversement, il ressort que les prix du bas de la fourchette correspondent à la situation où le consommateur choisit, en option, l'air conditionné automatique sur un modèle ou une version ayant déjà l'air conditionné manuel en série.

Ainsi, le coût d'équipement de l'air conditionné varie fortement en fonction du modèle de série du véhicule choisi. De cette façon, le consommateur peut, dans une perspective d'économie des coûts lors de la décision d'achat d'un véhicule climatisé, comparer le différentiel de prix entre les divers modèles et versions de voitures à celui des prix d'option de l'air conditionné.

b) Le prix d'installation en deuxième monte

Les données concernant ce poste ont été recueillies auprès de quelques garages bruxellois spécialisés dans cette activité. A l'heure actuelle, il n'existe que quatre garages indépendants spécialisés dans ce type de service, à Bruxelles. Le reste du marché est détenu par les garages concessionnaires.

Les fourchettes de prix d'installation fournies par les différents garages interrogés sont les suivantes :

Garage	Prix TVAC
Perfecta	1210-2420€
Arwac	1430-1640€
Avo Car	1452-1815€
Audio Jet Car	1440-3025€
Mockels	2110-2975€
Toby*	1000-3000€
BMW**	2.689,62 €

* à quitté la profession, estimation de prix fournie.

** prix série 1 étant donné que tous les autres modèles sont équipés en série

Tableau 34 : Fourchette de prix des installations de deuxième monte

Il ne nous a pas été possible de dégager des données précises quant à la deuxième monte des systèmes d'air conditionné, car pour chaque modèle de voiture il existe un modèle d'air conditionné correspondant d'origine ou en version piratée. Vu le nombre de modèles de voitures disponibles actuellement sur le marché, le recensement des prix des systèmes pouvant être installés en deuxième monte est une tâche considérable et c'est pourquoi les personnes interrogées nous ont uniquement communiqué une fourchette de prix toutes marques confondues. Ainsi, la fourchette de prix des installations de deuxième monte varie entre **1.000 € et 3.025 €**.

De manière générale, les prix en bas de fourchette correspondent aux systèmes installés sur les voitures de marque japonaise alors que ceux de la limite supérieure correspondent aux marques de luxe (BMW, Mercedes, etc.)

La comparaison entre les prix d'achat en option et ceux de deuxième monte indique que ces derniers sont nettement supérieurs aux premiers. La différence entre ces prix peut être

exprimée par un facteur variant entre 1,5 et 2. La variation de ce facteur dépend de l'origine des kits montés sur les véhicules. Un facteur 2 représente des kits d'air conditionné composés de pièces d'origine, comme c'est le plus souvent le cas pour les marques automobiles de luxe.

En général, selon Christian Mockel, afin de déterminer le coût d'installation de deuxième monte, il faut compter le prix du système d'air conditionné d'origine plus environ 750€ pour les frais de main-d'œuvre.

L'essor de la diffusion de la climatisation pour les véhicules neufs va entraîner une régression du marché de deuxième monte.

Selon l'étude de l'ADEME sur la climatisation automobile [24], cette évolution s'explique notamment pour les raisons suivantes :

- le consommateur va attendre le renouvellement de sa voiture, si sa voiture non équipée est assez ancienne ;
- l'usager a des doutes sur la qualité des systèmes de deuxième monte par rapport à ceux d'origine ;
- les coûts du post-équipement sont plus élevés que les coûts en option (voir **Figure 19**).

Face à ces constatations, le marché de la deuxième monte est voué à devenir marginal.

Cette évolution se fait ressentir à Bruxelles, où depuis cinq ans le nombre d'opérateurs hors réseau concessionnaires s'est réduit de 33% (passage de 6 à quatre)²³.

Actuellement, l'essentiel des opérations de deuxième monte est effectué pour des voitures destinées à l'exportation vers le sud de l'Europe ou l'Afrique.

Conclusion

En conclusion, l'analyse des coûts fixes montre qu'il est financièrement plus avantageux d'acquérir l'équipement de conditionnement d'air d'origine que de deuxième monte.

Après avoir présenté les divers postes relatifs aux coûts fixes nous allons au point suivant détailler ceux relatifs aux coûts variables.

B. Les coûts variables

Les coûts variables correspondent aux dépenses qui sont fonction de l'utilisation du système d'air conditionné. Pour les systèmes de climatisation automobile, l'entretien et les réparations seront les deux postes étudiés.

1. L'entretien des systèmes d'air conditionné

A l'heure actuelle, 2.138.040 voitures²⁴ sur un parc de 4.826.500 voitures sont approximativement équipées de climatisation, un chiffre qui laisserait supposer que le secteur de l'entretien se porte bien. Il n'en est pourtant rien car beaucoup d'automobilistes ignorent qu'un système d'air conditionné doit être régulièrement entretenu sous peine de dégradation de la qualité de l'air (poussières, allergènes, polluants atmosphériques

²³ Propos recueillis lors d'une interview auprès du gérant du garage de Jette.

²⁴ Voir Annexe II : Projections de pénétration des voitures climatisées pour le parc automobile belge.

extérieurs, micro-organismes) dans l'habitacle et de perte d'efficacité du système induite par une charge du liquide réfrigérant insuffisante.

Selon l'avis des diverses personnes contactées dans les garages, la plupart des automobilistes s'intéressent à l'entretien à partir du moment où l'équipement présente des dysfonctionnements, et ceci le plus souvent au début de la période estivale. Les considérations qui précèdent expliquent la forte variation saisonnière de cette branche d'activité.

Les opérations le plus généralement comprises dans l'entretien du système d'air conditionné comprennent la recharge de gaz, le changement du filtre à pollen, le changement de la bouteille déshydratante et la désinfection de l'évaporateur.

Comme nous l'indique le tableau à la page suivante, l'offre de l'entretien de la climatisation est très hétérogène au niveau des services et des prix pratiqués. Les diverses opérations peuvent être proposées séparément ou sous forme de forfaits.

Au dire des responsables des garages interviewés, il semblerait qu'actuellement les garages concessionnaires détiennent 50% du marché, contre 30% pour les garages spécialisés et 20% pour les garages franchisés tels que Speedy et Midas. A l'avenir, la part de ces derniers pourrait croître au détriment des garages concessionnaires face aux nouvelles exigences des consommateurs. En effet, pendant la période de garantie (3 ans), les consommateurs confient l'entretien de leur véhicule au garage concessionnaire, mais au terme de cette période plus de 50% des clients [31] quittent ces réseaux pour des centres d'entretien et de réparation offrant des solutions à moindre prix. De plus, le consommateur exige une satisfaction instantanée : il n'est plus disposé à attendre longtemps.

Ainsi, l'ensemble de ces facteurs crée une demande qui est essentiellement satisfaite par les chaînes de garages de réparation et d'entretien rapide de type Speedy ou Midas.

Le tableau qui suit reprend la liste des divers opérateurs et leurs fourchettes de prix pour le service d'entretien de la climatisation.

Coûts financiers directs et indirects engendrés par l'installation de systèmes d'air climatisé dans les voitures particulières - Rapport final

Catégorie	Garages	Opérations	Prix TVAC	Périodicité conseillée	
Concessionnaire	Renault	recharge gaz	151 €	3 ans après achat ensuite contrôle 1x an	
		nettoyage/ désinfection	42,35 €	1 x an	
		remplacement filtre pollen	36,3-48,4€	1 x an	
	BMW	recharge gaz	102,32 €	3 ans (manuel), 5 ans (automatique) après achat ensuite contrôle 1x an	
		changement filtre pollen	inclus	1 an (ville)	
		nettoyage/ désinfection	inclus	1 x an	
	Volkswagen	recharge gaz	144,11 €	3 ans après achat ensuite contrôle 1x an	
		changement filtre pollen	inclus	1 an (ville)	
		nettoyage/ désinfection	inclus	1 x an	
Spécialistes	Radia Express	recharge gaz	102,85 €	3 ans (manuel), 5 ans (automatique) après achat ensuite contrôle 1x an	
	Toby	recharge gaz	118,58 €	mauvais fonctionnement	
		changement filtre pollen	15-50€	1 x an	
		nettoyage/ désinfection*	15-50€	1 x an	
	Arwac	forfait contrôle + entretien	151,25 €	1x an	
		contrôle bouteille déshydratante	inclus	1x an	
		contrôle filtre habitacle	inclus	1x an	
		contrôle fuite	inclus	1x an	
	Avo Car	nettoyage/ désinfection*	inclus	1x an	
		recharge gaz	inclus	1x an	
		forfait entretien	120 €	1x an	
		recharge gaz	inclus	1x an	
		changement filtre pollen	inclus	1x an	
		nettoyage/ désinfection*	inclus	1x an	
		liquide traceur de fuites	inclus	1x an	
		forfait sans nettoyage et traceur	105,27 €	1x an	
		Audio Jet Car	recharge gaz	108,90 €	1x tous les 2 ans
			déshydrateur	36,3-181,5€	1 x an
	filtre à pollen		32,67 €	1 x an	
	désinfection*		48,50 €	1 x an	
	Franchisés	Midas	contrôle airco	18,50 €	1 x an
			recharge gaz	95,00 €	1x tous les 2 ans
		Speedy	nettoyage/filtre à pollen	60,00 €	1 x an
			forfait entretien	99 €	1 x an
			recharge gaz	inclus	1 x an
			nettoyage/ désinfection	inclus	1 x an
	Indépendants	Garage Edmond	recharge gaz	72,60 €	1x 2 ans
déshydrateur			36,3-181,5€	1x 2 ans	
filtre à pollen			24,2-48,8€	1 x an	
désinfection*			24,20 €	2 x an	

• opération comprise dans le forfait

* démontage du système pour désinfection complète

Tableau 35 : Liste de divers opérateurs et fourchettes de prix pour l'entretien de la climatisation (en euros 2004)

L'essentiel de l'entretien consiste en la recharge de gaz, les autres opérations étant la plupart du temps annexes. Le prix de la recharge est toujours forfaitaire²⁵ et varie entre **72,6 €** et **151 €** en fonction de la catégorie de garage choisie. Ainsi, pour le consommateur, le prix de la recharge de gaz est toujours le même peu importe la quantité de gaz perdue par la charge initiale. Il ressort, des diverses entrevues, que la première recharge est, en moyenne, nécessaire 3 ans après l'achat du véhicule pour les systèmes manuels et 5 ans pour les systèmes automatiques, ensuite un contrôle régulier (une fois par an) est conseillé par la plupart des garages.

Dans l'ensemble, les prix proposés chez les concessionnaires sont plus élevés. Ceci s'explique essentiellement par le fait que les conducteurs confient aux réseaux concessionnaires les entretiens de leur voiture sur toute la durée de la garantie.

Par après, ils recherchent la solution la plus économique et s'adressent soit aux garages spécialisés, soit à un opérateur d'un réseau de franchise.

Habituellement, l'entretien complet (changement des filtres, nettoyage) peut représenter une somme relativement conséquente pour le consommateur : entre **148,58€** et **327,1€**, soit entre 36% et 80% du poste « entretien et réparation » pour les dépenses moyennes d'utilisation des véhicules dans le budget 2001 des ménages²⁶.

- **La mise en marche régulière comme meilleur entretien**

Néanmoins, tous les professionnels du froid automobile contactés nous ont affirmé à l'unanimité que le meilleur moyen d'entretenir son système de climatisation est de le faire fonctionner au moins cinq minutes par semaine en toute saison. En effet, l'utilisation régulière de la climatisation permet, d'une part, de répartir sur l'ensemble du circuit l'huile protégeant les circuits de l'action corrosive du liquide réfrigérant et ainsi diminuer considérablement le risque de fuites²⁷ et, d'autre part, d'éviter après une longue période d'inutilisation de la boucle du froid, l'huile se mélange au liquide réfrigérant créant une élévation de pression dans le circuit et qu' à la première utilisation la pression élevée endommage les tuyaux, flexibles ou autres composants du circuit.

Ainsi, cet « auto entretien » pourrait allonger la périodicité de recharge de gaz de 1 an à 3 ans, de même il pourrait contribuer à éviter quelques réparations onéreuses.

- **Arrivée de nouveaux opérateurs sur un marché en plein développement**

D'après Jean-François Almey (garage FGA Sport), le marché de l'entretien se limitait, jusqu'à il y a peu de temps encore, essentiellement à quelques spécialistes, les barrières à l'entrée, étant les coûts d'investissement fort élevés pour les appareils nécessaires.

Depuis peu, face à la croissance du taux d'équipement réel du parc automobile, à la démocratisation des coûts d'investissement du matériel d'entretien de ces dernières années, le prix des nouvelles machines destinées à l'entretien des systèmes d'air conditionné se démocratise et en vue des marges réalisables (30%) sur ce type de service, de nombreux garages ambitionnent la pénétration de ce marché par la stratégie du cassage des prix.

Cependant, les personnes interrogées nous ont confié que cette baisse de prix induit souvent le risque de baisse de qualité du service. D'après ces mêmes personnes, certains garages

²⁵ Quelle que soit la quantité de gaz rechargé, le prix reste le même. Ceci s'explique par le coût de revient relativement faible de ce liquide. A titre d'exemple, le catalogue Waeco 2004 propose une bouteille de 12 kg de HFC 134a à 135€, soit 11,25 € le kg.

²⁶ FEBIAC, Dépenses moyennes de transport par ménage et par an,
URL : <http://www.febiac.be/fr/statistics/xls/ECON2.xls>

²⁷ Lorsque les flexibles ou tuyaux reliant les différents composants du système ne sont pas protégés par cette huile, ils se fissurent rapidement et constituent la principale source de fuites.

s'improvisent dans le métier et ne suivent pas les règles requises, souffrant d'un manque de formation pour la maîtrise de l'outillage et des diverses opérations.

Pour le consommateur, cela pose un risque par rapport à la qualité du service payé. A titre d'exemple, lors de la recharge du gaz, les différentes sous-opérations²⁸ doivent être scrupuleusement respectées sous peine d'endommager sérieusement le système. Lors des interviews, nombreux professionnels du froid automobile nous ont confié connaître des garages s'aventurant dans l'entretien du circuit du froid sans connaissances préalables et ne respectant souvent pas les procédures techniques dans un souci de diminution des coûts ou par incompetence. Les erreurs les plus communes lors de la recharge de gaz consistent à omettre le tirage à vide ou à ne pas respecter la durée minimale du processus, ce qui peut ainsi abîmer le système. Ces erreurs induisent, par après, des frais de réparation supplémentaires pour le consommateur. D'après Monsieur C. Mockels²⁹, 70% des problèmes des systèmes d'air conditionné rencontrés lors des réparations ont pour origine des erreurs de manipulation lors des entretiens des systèmes. Une bonne citation peut être de mise pour la situation actuelle : « tout le monde veut faire du froid, mais très peu savent le faire ».

Il en va de même pour la désinfection du circuit du froid (évaporateur). Ainsi, une opération de désinfection efficace du système requiert le démontage du tableau de bord afin d'accéder à l'évaporateur. Cette opération requiert deux à trois heures de travail. A nouveau, dans un souci d'économie de temps ou par simple ignorance, certains se limitent à uniquement vaporiser un spray biocide au niveau de la bouche d'aération du système. Pour un système contaminé par des micro-organismes, ce type d'opération est tout à fait vain, car l'agent désinfectant ne parvient pas à atteindre l'évaporateur.

Afin de se prémunir contre ce risque, le consommateur peut demander auprès du garage les attestations de formation en air conditionné des mécaniciens. L'expérience montre que le risque d'être victime de ces pratiques peu scrupuleuses est nettement plus élevé dans des garages dont l'air conditionné n'est qu'une activité accessoire.

Recommandations

Il importe donc de sensibiliser le consommateur quant à sa responsabilité dans l'utilisation et l'entretien régulier de son système de climatisation ainsi que dans son choix de l'opérateur d'entretien et ceci dans une perspective d'économie de dépenses, de prévention d'un éventuel risque sanitaire et de respect de l'environnement.

2. Les coûts de réparation

Les opérations de réparation deviennent nécessaires suite à un accident, une erreur de manipulation des garagistes lors de l'entretien ou suite à la détérioration d'un composant du système.

²⁸ La première opération du processus de recharge d'un gaz est le tirage à vide du système. En effet, avant de compléter le circuit avec la charge manquante, il est impératif sous peine d'endommager le système de procéder au tirage à vide. Afin de bien extraire tout le gaz ainsi que les impuretés et traces d'humidité contenues dans le circuit, il faut tirer à vide pendant au moins une heure et demie. Certains garagistes, qui s'improvisent dans l'activité et qui n'ont souvent pas suivi de formation, négligent cette tâche soit par économie de temps, soit par ignorance et risquent ainsi d'endommager le circuit du froid.

²⁹ Propriétaire du garage Mockels spécialisé dans la réparation et la deuxième monte des systèmes d'air conditionné.

Face à la multiplicité des dommages qui peuvent survenir sur un système d'air conditionné ainsi que la diversité des options pour remplacer les pièces d'origine, il nous est impossible d'estimer les coûts d'entretien.

A titre indicatif, nous incluons dans l'étude des différents scénarios, trois cas de figure pour les coûts de réparation : changement de flexibles, remplacement d'un compresseur, remplacement du système suite à un accident.

3. Les coûts de surconsommation

Le fonctionnement de l'air conditionné induit, par une demande énergétique supplémentaire envers le moteur, une surconsommation de carburant.

Cette surconsommation a été évaluée suivant un modèle de simulation sur trois voitures distinctes par la VUB en première partie de cette étude. Néanmoins, dans le cadre d'une étude devant fournir des arguments de sensibilisation envers les consommateurs, il nous a semblé plus opportun de nous baser sur un échantillon de voitures plus large de même que sur des mesures de surconsommation réelles (versus théoriques). Ainsi, les estimations qui suivent ont été réalisées sur base des taux de surconsommation déterminés à l'issue de deux campagnes d'essai (sur des bancs à rouleaux) menées par l'ADEME en 1995 et en 1996-1997 sur trois cycles de conduite (ECE, MVEG, EUCD).

Les huit modèles de voitures retenus pour notre analyse ont été classés selon quatre catégories (petite, moyenne, grande et 4x4). Les voitures appartenant aux trois premières catégories figurent dans les segments B, C, Breaks et Monospaces comptant à eux seuls 85% des parts de marché. Notre choix pour la catégorie des 4x4 s'explique par l'engouement du consommateur depuis quelques années pour ce type de véhicule, surtout dans les villes alors que la destination première de ces voitures est la récréation dans des grands espaces ruraux, forestiers ou montagnards.

Chaque catégorie reprend deux voitures, dont chacune avec un carburant différent, l'essence ou le diesel, à l'exception de la catégorie « petite voiture urbaine » qui elle comporte deux voitures essence. Cela s'explique par le fait qu'il est très rare de trouver une voiture de petite cylindrée alimentée au diesel et équipée d'un système de climatisation. En effet, les performances du moteur, sur une petite cylindrée, seraient plus fortement influencées par le fonctionnement de la climatisation sur une voiture diesel que sur une voiture essence.

Les hypothèses retenues pour le calcul sont les suivantes :

- fonctionnement annuel de l'air conditionné sur une durée de 100 heures ;
- vitesse moyenne en cycle urbain (ECE³⁰) :18,8 km/h ;
- vitesse moyenne en cycle extra-urbain (EUCD³¹) :62,6 km/h ;
- taux de surconsommation fixés sur base d'une température extérieure de 30° et dans l'objectif d'une température de 20° dans l'habitacle ;

L'hypothèse d'une utilisation moyenne annuelle de 100 heures a été avancée par l'ADEME qui l'a reprise de Fischer [32]. Ce chiffre peut, à première vue, paraître quelque peu limité.

Néanmoins, si l'on considère que la Belgique connaît en moyenne 21 jours par an où la température dépasse les 25 °C dont 3 jours avec des températures au-dessus de 30°C, cela revient à une utilisation de plus de quatre heures et demie par jour « chaud », cette hypothèse de durée de fonctionnement annuel semble être plausible. Il faut d'autant plus de

³⁰ Cycle urbain d'essais européens normalisés.

³¹ Cycle extra-urbain d'essais européens normalisés.

prendre en considération qu'une partie de cette durée de fonctionnement annuelle est également imputable aux opérations de dégivrage et désembuage des fenêtres de l'habitacle et non uniquement au maintien d'une température agréable au sein de l'habitacle.

Nos calculs sur base des diverses hypothèses retenues ont donné les résultats suivants :

	Petite urbaine		Voiture moyenne		Grande voiture		4x4	
	Yaris	Lupo	Astra	Golf	Xsara Picasso	Mercedes Break	XC90	X 3.0 D
	1000 Wti	1,4 60cv	1,6 16 V C	1,9 Tdi	2,0l 16 V	E220 CDI	2,5T	3,0D
Caburant	Essence	Essence	Essence	Diesel	Essence	Diesel	Essence	Diesel
Prix du carburant*	1,14 €	1,14 €	1,14 €	0,81 €	1,14 €	0,812	1,14 €	0,812
Urbain								
Consommation (l/100 km)	6,8	8,3	9,4	6,8	12,6	9,1	15,2	12,3
Surconsommation (l/100 km)	2,11	2,57	2,91	2,924	3,906	3,913	4,712	5,289
Consommation totale	8,908	10,873	12,314	9,724	16,506	13,013	19,912	17,589
Surcoût 100 heures**	45,34 €	55,34 €	62,67 €	44,64 €	84,01 €	59,73 €	101,34 €	80,74 €
Extraurbain								
Consommation (l/100 km)	4,9	4,9	5,4	4,4	6,3	5,5	9,1	8,2
Surconsommation(l/100 km)	0,784	0,784	0,864	1,232	1,008	1,54	1,456	2,296
Consommation totale	5,684	5,684	6,264	5,632	7,308	7,04	10,556	10,496
Surcoût 100 heures	56,15 €	56,15 €	61,87 €	62,62 €	72,19 €	78,28 €	104,27 €	116,71 €

* essence: prix SPB 98 1,144€ , diesel 0,812€ au 12/12/2004

Source Prix: http://ecodata.mineco.fgov.be/mdf/ts_structur.jsp?table=ZENQ2

** vitesse moyenne urbaine: 18,8 km/h (cycle ECE)

vitesse moyenne extraurbaine: 62,6 km/h (cycle EUDC)

Tableau 36 : Coûts annuels de surconsommation de l'air conditionné (hypothèse de fonctionnement 100 heures/an)

Nos calculs montrent que sur un cycle urbain l'utilisation de l'air conditionné sur une durée de cent heures conduit à un surcoût pouvant varier entre 45,34 € et 101,34 € pour les voitures essence suivant la cylindrée du moteur.

Bien que les taux de surconsommation associés aux diesels soient plus importants que ceux des voitures essence, la fourchette de coût de ces premiers est moindre s'étendant de 44,64 € à 80,74 €. Cette différence s'explique par un prix plus faible du carburant diesel que celui de l'essence.

Dans la situation extra-urbaine, les coûts de surconsommation augmentent pour les deux types de motorisation par rapport à la situation urbaine. En effet, la diminution du taux de surconsommation et de consommation est largement compensée par l'augmentation de la vitesse moyenne (de 18,8 km/h à 62,6 km/h). De plus, sur le cycle extra-urbain, les coûts associés aux véhicules diesel sont plus élevés que ceux des voitures essence.

Ainsi, pour les voitures essence le surcoût engendré par la surconsommation varie entre 56,15 € et 104,27 €. Pour les diesels cet intervalle de coût est compris entre 62,62 € et 116,7 €. Cette différence s'explique essentiellement par des taux de surconsommation plus importants pour les voitures diesel.

C. Synthèse et conclusions

Il ressort de l'analyse menée les éléments essentiels suivants.

En ce qui concerne les coûts fixes d'achat d'une installation de climatisation automobile : ceux-ci engendrent un surcoût, pour le consommateur, se situant entre 900 € et 1.300 € en installation d'origine. Ce coût est plus élevé pour l'installation de deuxième monte avec une moyenne de 2.000 € (fourchette 1.000 €-3.025 €).

En ce qui concerne les coûts variables (entretien, réparation), ceux-ci s'élèvent aux environs de 148 € à 328 € pour les opérations de recharge de gaz, de nettoyage et de changement de filtre. De manière générale, les prix demandés sont moins élevés dans les garages de réparation rapide et les spécialistes d'air conditionné automobile que chez les concessionnaires. Il semble, toutefois, que la qualité du service soit moindre dans les établissements de réparation rapide.

Les coûts de surconsommation varient entre 46 € et 102 € pour les voitures essence et entre 44 € et 80 € pour les voitures diesel sur un cycle urbain pour une utilisation annuelle de 100 heures.

En cycle extra-urbain et pour la même durée d'utilisation, ces mêmes coûts s'étendent entre 57 € et 105 € pour les voitures essence et entre 62 € et 116 € pour les voitures diesel.

Dans une suite logique, après avoir examiné les coûts directs incombant aux consommateurs, nous allons dans le chapitre suivant procéder à une analyse des coûts indirects engendrés par l'utilisation de l'air conditionné automobile.

XIII. Les coûts indirects

Les coûts indirects sont ceux qui ne viennent pas directement grever le budget du consommateur suite à l'utilisation de l'air climatisé automobile.

Dans le cadre de l'étude des coûts financiers des systèmes d'air conditionné automobiles, les coûts indirects sont ceux correspondant aux coûts externes environnementaux et sanitaires.

A. Les coûts externes ou les externalités négatives

« Une externalité négative apparaît à l'occasion d'une activité de production ou de consommation si un agent économique fait supporter des coûts ... à d'autres agents économiques sans qu'aucune transaction marchande n'enregistre cette interdépendance »³².

On entend donc par « coûts externes de la climatisation automobile » les coûts relatifs à la santé et à l'environnement qui ne sont pas couverts par les usagers, mais qui sont donc à la charge des collectivités et des générations futures.

Dans le cadre des systèmes d'air conditionné automobile, les coûts externes environnementaux sont générés par les émissions directes et indirectes de polluants dans l'atmosphère. Les coûts externes sanitaires de l'air conditionné automobile sont liés à la qualité de l'air (effets indirects) et à la contamination fongique et bactériologique (effets directs) des systèmes d'aération.

Pour rappel, en l'absence de fonctions exposition-réponse connues et compte tenu des multiples incertitudes concernant les effets directs sanitaires liés à l'utilisation de l'air conditionné, il ne nous a pas été possible d'estimer ces coûts.

Les émissions directes correspondent aux pertes de fluide frigorigène tout au long de la durée de vie du système. Ces fuites de HFC 134a sont exprimées en tonne d'équivalent CO₂³³ et occasionnent un dommage en termes de changement climatique ou de réchauffement planétaire.

Les émissions indirectes correspondent aux surémissions induites par la surconsommation de carburant ainsi qu'à la production et à l'acheminement de ce carburant.

Ce type d'émissions cause des dommages du point de vue de la santé humaine (qualité de l'air), des écosystèmes, des bâtiments ainsi que du réchauffement atmosphérique et du changement du climat.

Avant de détailler les coûts inhérents aux trois sources d'émissions, nous allons présenter les coûts externes unitaires retenus pour les calculs.

³² HECQ W., Aspects économiques de l'environnement, Fascicule 4 : Economie de l'environnement, Presses Universitaires de Bruxelles, Bruxelles, 2002, p.2.

³³Le calcul de la tonne l'équivalent CO₂ de HFC134a se fait en multipliant la quantité de HFC134a par son pouvoir de réchauffement potentiel (PRP) qui est de 1300.

B. Les coûts externes unitaires retenus pour l'analyse

Afin de pouvoir chiffrer le coût total associé aux diverses émissions de polluants engendrées par l'air conditionné automobile, il importe de fixer les coûts unitaires (€/kg) retenus pour chacun des polluants.

Ces coûts sont présentés dans le **Tableau 37** qui suit :

Impacts	Polluant	Coût externe	Coût externe	Source
		rural [€/kg]	urbain[€/kg]	
Qualité de l'air, Santé				
	HC	3	3	ExternE
	CO	0,0008	0,0032	ExternE
	PM10	103,49	418,61	ExternE
	NOx	1,152	1,483	ExternE
	SO2	6,267	14,788	ExternE
Qualité de l'air, écosystème				
	NOx	0,113	0,113	NewExt
	SO2	0,176	0,176	NewExt
Changement Climatique	CO2	0,02818	0,02818	DEFRA

Source : Ecoscore 2004

Tableau 37 : Coûts externes retenus selon les impacts

Les coûts externes unitaires repris dans le tableau ci-dessus sont en large partie tirés des études ExternE[33][34][35], NewExt[36] et DEFRA[37] menées à l'échelle européenne. Toutes deux visent à évaluer les coûts externes de divers polluants dans le secteur de l'énergie et celui des transports.

Ces études sont une base de référence internationalement reconnue et leurs résultats aussi exploités par la Commission Européenne dans des projets économique-environnementaux.

Les coûts externes associés aux différents polluants sont ventilés en termes d'impacts environnementaux et sanitaires.

Comme indiqué dans le tableau ci-dessus, pour certains polluants, le coût externe unitaire d'un polluant est supérieur lorsque l'émission/imission se fait en milieu urbain plutôt qu'en milieu rural. Cette différence s'explique du fait que la conséquence de l'émission d'un kilogramme de polluant en ville est beaucoup plus prononcée en termes d'impact sanitaire et dommages aux bâtiments qu'en milieu rural. En effet, les incidences des polluants en milieu urbain sont nettement plus élevées qu'en milieu rural, ne serait-ce que par la plus forte concentration de population exposée à cette pollution. La distinction entre les divers milieux d'émission/imission d'un coût externe indique également que les conséquences de cette pollution sont fortement localisées. Dans notre cas, les coûts externes unitaires retenus diffèrent pour le NOx, le CO, le SO₂ et les PM₁₀³⁴.

Lorsque le coût externe unitaire d'un polluant est identique en milieu rural et en milieu urbain, cela signifie que l'émission de ce polluant a un impact à une échelle plus globale (exemple du CO₂ en termes de changement climatique).

Les coûts externes unitaires repris dans le tableau ci-dessus sont exprimés selon deux types de coûts. Ceux relatifs au CO₂ sont des coûts marginaux alors que ceux des autres polluants sont des coûts moyens.

³⁴ Dans la suite du rapport, nous emploierons plus fréquemment le terme de particule pour faire référence aux PM₁₀.

A notre avis, dans le cadre d'une problématique environnementale portant sur l'accumulation, d'un polluant dans un certain milieu (GES et polluants atmosphériques) et afin de refléter au mieux l'impact environnemental exponentiel résultant de cette accumulation il est plus approprié de recourir au coût marginal. Ce dernier représente au mieux la réalité écologique dans le sens où la courbe du coût marginal croît de façon exponentielle en fonction des quantités de polluants émises. Ainsi, la dernière unité de polluant émise aura le coût le plus élevé suite à l'incidence nettement plus conséquente qu'elle aura sur la dynamique et le déséquilibre de l'écosystème.

Le recours aux coûts moyens, par contre, confère à chaque unité de polluants la même importance en termes de conséquences environnementales, ce qui ne correspond pas toujours à la réalité des dynamiques de nombreux écosystèmes (effets de bioaccumulation, GES et changements climatiques, O₃, eutrophisation des eaux, etc.)

De plus le coût externe moyen d'un polluant est toujours inférieur au coût marginal, il en résulte dès lors une sous-estimation des coûts externes totaux.

Malheureusement, nous ne sommes pas parvenus à trouver les coûts externes marginaux des divers polluants pour le secteur des transports, c'est pourquoi nous avons retenu leurs coûts externes moyens.

Il en résulte que les résultats de nos estimations concernant les coûts externes totaux sont dès lors probablement sous-estimés.

Sur base des ces coûts externes unitaires, nous allons estimer la part des coûts attribuables à chacune des trois sources d'externalités liées au fonctionnement de l'air conditionné automobile.

Nous débutons au point suivant ces estimations sur base des émissions directes.

C. Les émissions directes en équivalents CO₂

Plusieurs études ont porté sur l'évaluation des émissions directes en équivalents CO₂ correspondant à la perte de fluides frigorigènes ([1][24][26]).

Il en ressort que les pertes de fluide frigorigène interviennent à plusieurs stades du cycle de vie du système de conditionnement d'air :

- production du système d'air conditionné et du fluide,
- pertes régulières annuelles,
- maintenance du circuit du froid,
- pertes irrégulières dues à des accidents, défauts des composants ou impact de pierres,
- en fin de vie du véhicule.

Les résultats des études mentionnées ci-dessus sont fortement disparates. A titre d'exemple, l'étude de l'ADEME avance une perte régulière annuelle moyenne de 116 g (charge nominale 775 g, soit 15%) alors que Ecofys et Öko-Recherche annoncent une perte régulière annuelle moyenne de 53 g (charge nominale 756 g, soit 7%). Ces différences s'expliquent essentiellement par le choix de la méthodologie (conditions des tests), des hypothèses ainsi que des véhicules figurant dans l'échantillon de mesures.

Afin d'évaluer les quantités de fluides émises au niveau de la Région Bruxelles-Capitale ainsi que le coût externe induit, nous avons retenu les données fournies par l'étude de l'Ecole des Mines-Armines [26]. Ces données sont le résultat de la synthèse de diverses études

entreprises dans ce champ de recherche, elles offrent l'avantage de considérer les sources d'émissions à chacun des stades repris ci-dessus, et celles-ci étant exprimées selon quatre scénarios.

Les hypothèses retenues pour les divers scénarios sont les suivantes:

	Scénario pessimiste	Scénario réaliste	Scénario optimiste	HFC134a amélioré
Durée de vie du système	12 ans	12 ans	12 ans	12 ans
Charge nominale	750g	750g	750g	590g
Fuites annuelles	15% charge nominale (107,3 g)	15% charge nominale (107,3 g)	10% charge nominale (75g)	7% charge nominale (40g)
Périodicité entretien	lorsque la charge atteint 60% de la charge nominale	lorsque la charge atteint 60% de la charge nominale	lorsque la charge atteint 60% de la charge nominale	lorsque la charge atteint 60% de la charge nominale
Emissions en fin de vie	perte totale	récupération 85% selon objectifs directive européenne 2000/53/CE	récupération 85% selon objectifs directive européenne 2000/53/CE	récupération 90%

Tableau 38: Hypothèse de calculs des émissions directes pour les divers scénarios

L'hypothèse commune aux quatre scénarios est la durée de vie du système et du véhicule portée à de 12 ans.

L'essentiel des différences entre les trois premiers scénarios réside dans le développement de meilleures pratiques à l'entretien, dans la récupération du liquide réfrigérant en fin de vie (scénario optimiste et réaliste) ainsi que dans le développement de composants plus étanches.

Le scénario optimiste se distingue du scénario pessimiste, d'une part, par la réduction du taux de fuite annuelle et, d'autre part, par la récupération en fin de vie du liquide réfrigérant suivant l'objectif de 85% prévu par la directive européenne 2000/53/CE.

La diminution du taux de fuite annuelle a pour répercussion directe l'abaissement du nombre d'entretiens nécessaires ainsi que des fuites associées aux opérations de maintenance.

Enfin, le scénario HFC134a amélioré se distingue par une diminution de la charge nominale de gaz ainsi que par une amélioration technologique conduisant à une étanchéité renforcée du système. La diminution de la charge nominale a des répercussions positives considérables sur les pertes annuelles, étant donné qu'il a été estimé que les systèmes de petite charge ont des pertes moindres en valeurs absolues et relatives que des systèmes à charge plus importante [1].

Les calculs basés sur ces hypothèses ont abouti aux résultats suivants :

	Scénario pessimiste (g de HFC 134a)	Scénario réaliste (g de HFC 134a)	Scénario optimiste (g de HFC 134a)	HFC134a amélioré
Circuit de distribution	45	15	7,5	3
Remplissage du système	10	7,5	5	3
Emissions régulières et irrégulières	1287	1287	900	480
Emissions à l'entretien	621	409	198	14
Emissions en fin de vie	428,3	41,1	67,5	45,1
TOTAL (g de HFC 134a)	2391,3	1759,6	1178	545,1
TOTAL (kg éq. CO ₂)	3108,69	2287,48	1531,4	708,63
TOTAL (g de HFC 134a)/an	199,28	146,63	98,17	45,43
TOTAL (kg éq. CO₂)/an	259,06	190,62	127,62	59,05

Source : Ecole des Mines-Armines

Tableau 39: Estimations des émissions directes de HFC 134a sur la durée de vie d'un système d'air conditionné automobile

D'après ces calculs basés sur l'ensemble du cycle de vie, les émissions directes annuelles de HFC134a par système se situent entre 45g (scénario HCF 134a amélioré) et 200g (scénario pessimiste), soit un équivalent en CO₂ de 59 kg (scénario HCF 134a amélioré) et 259kg (scénario pessimiste). Sur l'ensemble de la durée de vie, les émissions directes d'un système d'air conditionné automobile correspondant aux hypothèses du scénario pessimiste se situent près de 3,1 tonnes de CO₂.

Il ressort donc de la comparaison des scénarios, que les diverses améliorations technologiques des systèmes et l'instauration de la récupération en fin de vie pourraient éviter des fuites à concurrence de 78%. Une stratégie de réduction des émissions directes se base donc nécessairement sur ces deux options.

A partir de cette année, les premiers systèmes d'air conditionné fonctionnant au CO₂ vont être mis sur le marché par les marques Volkswagen, Audi, BMW et Toyota, ce qui va permettre de fortement réduire les émissions directes.

La différence essentielle entre le scénario réaliste et pessimiste réside dans la supposition de la récupération du liquide réfrigérant selon l'obligation prévue par la directive européenne 2000/53/CE. Or, il ressort des interviews menées auprès des différents garages que dans la pratique il n'en est rien. En effet, il semble que les gaz contenus dans les systèmes de climatisation automobile ne sont quasiment jamais récupérés. Cela s'explique essentiellement par deux facteurs : d'une part, toutes les casses (centres de fin de vie) ne sont pas équipées d'une station de récupération/recharge et, d'autre part, la faible valeur économique du gaz (+/- 11 €/kg) n'incite pas sur le plan économique à la récupération.

D'après ce qui suit, nous pouvons donc, à juste titre, considérer que la Belgique s'inscrit dans le scénario pessimiste.

Sur base de ce scénario pessimiste, nous avons donc calculé les coûts externes annuels associés aux fuites directes de HFC134a pour les 8 voitures retenues dans notre analyse. Le coût externe unitaire du kg de CO₂ retenu dans le calcul se chiffre à 0,02818 €.

Les résultats de ces calculs figurent dans le tableau ci-dessous :

Coûts financiers directs et indirects engendrés par l'installation de systèmes d'air climatisé dans les voitures particulières – Rapport final

	Petite urbaine		Voiture moyenne		Grande voiture		4x4	
	Yaris	Lupo	Astra	Golf	Xsara Picasso	Mercedes Break	XC90	X 3.0 D
Version	1000 Wti	1,2 Tdi 3L	1,6 16 V Com	1,9 Tdi 77 Comfo	2,0l 16 V	E220 CDI	2,5T	3,0D
Charge nominale (g)	450	570	700	750	700	950	900	450
Circuit de distribution(g)	27	34,2	42	45	42	57	54	27
Remplissage du système (g)	10	10,0	10	10	10	10	10	10
Emissions fugitives (g)	810	1026,0	1260	1350	1260	1710	1620	810
Entretien (g)	378	478,8	588	630	588	798	756	378
Fin de vie (g)	247,5	313,5	385	412,5	385	522,5	495	247,5
Total sur toute la durée de vie(g)	1472,5	1862,5	2285	2447,5	2285	3097,5	2935	1472,5
Total/an (g)	122,71	155,21	190,42	203,96	190,42	258,13	244,58	122,71
Total/an éq CO2 (kg)	159,52	201,77	247,54	265,15	247,54	335,56	317,96	159,52
Coût total annuel ém.dir	4,49530 €	5,68590 €	6,97572 €	7,47181 €	6,97572 €	9,45615 €	8,96007 €	4,49530 €

Tableau 40 : Emissions directes et coûts externes annuels pour les 8 voitures analysées

Les chiffres repris dans ce tableau, indiquent clairement que les émissions et les coûts associés à ces émissions sont fonction de l'importance de la charge nominale du système. Ainsi, les voitures équipées d'un système à faible charge nominale (Yaris, Lupo, BMW X) présentent les coûts externes annuels d'émissions directes les plus restreints. Inversement, les coûts externes annuels les plus conséquents sont ceux qui correspondent aux systèmes à charge nominale les plus importante.

Une estimation plus globale des coûts externes liés aux émissions directes pour l'année 2003 à l'échelle de la Région de Bruxelles-Capitale a été calculée sur base des hypothèses suivantes.

La valeur moyenne de la fourchette de coût a été retenue comme coût externe total annuel par voiture.

Le nombre de voitures équipées avec l'air conditionné, sur le parc bruxellois a été obtenu sur base du taux d'équipement réel (40% pour l'année 2003) dégagé dans la section concernant l'équipement du parc belge.

Ainsi, selon ces hypothèses et dans le cadre d'un scénario d'émissions pessimiste, le coût externe associé aux émissions directes de gaz réfrigérants issus des systèmes d'air conditionné automobile du parc bruxellois équivaldrait à environ **1.585.221 €**, soit un coût par habitant³⁵ sur la Région Bruxelles-Capitale de 1,6 € et par voiture particulière de 2,7 €. Le passage au scénario optimiste abaisserait ce coût externe à 761.253 €, soit près de la moitié.

Il importe également de souligner que les montants des coûts externes engendrés sur le territoire de la Région de Bruxelles-Capitale sont certainement sous-estimés du fait que leur calcul est basé sur le parc de voitures bruxellois (immatriculations) et non sur le nombre moyen de voitures présentes sur le territoire. La Région de Bruxelles-Capitale est un bassin d'emploi attirant chaque jour plus de 360.000 navetteurs dont les voitures sont également équipées d'air conditionné et qui génèrent ainsi des émissions supplémentaires à celles reprises dans les tableaux ci-dessus. Néanmoins, l'entièreté de ces coûts n'est pas supportée uniquement par la Région de Bruxelles-Capitale étant donné que l'impact environnemental de l'émission de CO₂ est global et s'exprime en termes de réchauffement atmosphérique et de changement climatique.

Après avoir mis en évidence les coûts externes résultant des émissions directes de gaz réfrigérant dans l'atmosphère, nous allons développer ceux associés à la surémission de polluants.

³⁵ La RBC dénombrait 978 384 habitants au 1 janvier 2002.

D. Les surémissions de polluants

Le fonctionnement de l'air conditionné automobile génère une surémission de polluants suite à la surconsommation de carburant.

En ce qui concerne le CO, les HC, les NOx et les particules, deux campagnes de mesures de l'ADEME ont fourni une estimation des surémissions liées à l'utilisation de la climatisation.

	CO	HC	NOx	Particules
Essence				
Urbain	17%	~0	74%	
Extra-urbain	75%	~0	51%	
Diesel				
Urbain	-30%	-24%	47%	60%
Extra-urbain	-28%	-23%	27%	32%

T° extérieure = 30°C, T consigne = 20°C, essai selon Directive 98/96

nouveau cycle MVEG

Source: ADEME

Tableau 2 : Emissions moyennes de polluants mesurées en g/km – Ecart en % entre essai climatisation en marche et sans climatisation

Ces mesures indiquent que pour les véhicules essence les niveaux de rejets de polluants se caractérisent par une augmentation sensible du CO, une hausse très forte des NOx et une stabilité des HC sur le cycle urbain. Sur le cycle extra-urbain, les variations de CO et de NOx restent importantes.

Pour les véhicules diesel la tendance des émissions de polluants liées au fonctionnement de l'air conditionné automobile se caractérise comme suit : baisse sensible du CO et des C, augmentation prononcée des NOx et très élevée des particules sur le cycle urbain. Pour le cycle extra-urbain du MVEG, les variations sont légèrement moindres, mais cette hiérarchie se conserve.

Quant aux émissions de CO₂ et de SO₂, elles sont directement proportionnelles à la consommation de carburant. Ainsi, la quantité des surémissions a été obtenue par simple multiplication sur base des taux de surconsommation.

Les surémissions annuelles de CH₄ sont également proportionnelles à la consommation de carburant. Mais d'après nos calculs, ces surémissions sont minimes (~1 g/an). Le coût externe qui leur est associé est infime et nous ne l'avons dès lors pas repris dans notre analyse.

Sur base de ces considérations de surémissions et suivant l'hypothèse d'un fonctionnement annuel de l'air conditionné automobile de 100 heures, nous avons estimé les coûts externes annuels de surémission pour les divers polluants suivant un cycle de conduite urbain et extra-urbain.

Les résultats de nos calculs sont repris dans le tableau suivant.

Coûts financiers directs et indirects engendrés par l'installation de systèmes d'air climatisé dans les voitures particulières – Rapport final

		Petite urbaine		Voiture moyenne		Grande voiture		4x4			
		Yaris	Lupo	Astra	Golf	Xsara Picasso	Mercedes Break	XC90	X 3.0 D		
		1000 Wti	1.4 44KW	1.6 16 V Com	1.9 Tdi 77 Com	2.0i 16 V	E220 CDI	2.5T	3.0D		
Urbain	Changement climatique	CO2	0,02671	0,03334	0,03453	0,04201	0,05041	0,05639	0,06110	0,04799	
	Qualité de l'air, santé	CO	0,00031	0,00231	0,00921	-0,00813	0,00469	-0,01041	0,02323	-0,01415	
		NOx	0,02063	0,04745	0,16505	0,32759	0,09697	0,65519	0,05364	0,83471	
	Qualité de l'air, écosystèmes	HC	0	0	0	-0,06768	0	-0,081216	0	-0,0311328	
		Particules	0	0	0	11,80480218	0	23,60960435	0	39,19194264	
		SO2	0,04425	0,05401	0,06117	0,06910	0,08199	0,09247	0,09891	0,12499	
	Qualité de l'air, écosystèmes	NOx	0,00157	0,00362	0,01258	0,02496	0,00739	0,04992	0,00409	0,06360	
		SO2	0,00053	0,00064	0,00073	0,00082	0,00098	0,00110	0,00118	0,00149	
	Coûts externes surémissions totaux			0,094	0,141	0,283	12,193	0,242	24,373	0,242	40,219
	Extra-Urbain	Changement climatique	CO2	0,0331	0,0308	0,0341	0,0842	0,0433	0,1056	0,0629	0,1344
Qualité de l'air, santé		CO	0,0011	0,0009	0,0038	-0,0007	0,0019	-0,0009	0,0095	-0,0012	
		NOx	0,0368	0,0846	0,2942	0,4868	0,1729	0,9736	0,0956	1,2403	
Qualité de l'air, écosystèmes		HC	0,0000	0,0000	0,0000	-0,2160	0,0000	-0,2592	0,0000	-0,0093	
		Particules	0	0	0	5,182779277	0	10,36555855	0	17,20682694	
		SO2	0,0232	0,0232	0,0256	0,0521	0,0299	0,0652	0,0431	0,0829	
Qualité de l'air, écosystèmes		NOx	0,0036	0,0083	0,0289	0,0477	0,0170	0,0955	0,0094	0,1217	
		SO2	0,0007	0,0007	0,0007	0,0015	0,0008	0,0018	0,0012	0,0023	
Coûts externes surémissions totaux			0,098	0,149	0,387	5,638	0,266	11,347	0,222	18,688	

Tableau 41 : Surémissions annuelles en (g) de polluants liés à l'air conditionné automobile et suivant une utilisation annuelle de 100 heures

Les coûts externes imputables aux voitures essence individuelles semblent insignifiants par rapport à ceux engendrés par les voitures diesel. Cette forte différence s'explique par l'émission de particules par ces dernières et par le coût externe unitaire élevé rattaché à ce type de polluant atmosphérique (103,49 € en milieu rural et 418,61 € en milieu urbain).

La fourchette du coût externe annuel pour les voitures essence se situe entre 0,093 € et 0,283 € en cycle urbain et entre 0,098 € et 0,387 € en cycle extra-urbain .

Malgré la hausse des émissions de polluants et du kilométrage parcouru, les coûts externes sur le cycle extra-urbain restent très proches de ceux du cycle urbain. En effet, la hausse de ces deux paramètres a été compensée par la baisse des coûts externes unitaires.

Dans l'ensemble des voitures essence analysées ci-dessus, la part la plus importante des coûts externes liés à la surémission de polluants est imputable aux émissions de SO₂ et de NOx , ce qui se traduit en termes d'effets sur la qualité de l'air et la santé.

La fourchette du coût externe de surémissions pour les voitures diesel (Golf, Mercedes Break, Volvo X 3.0 D) varie entre 12,193 € et 40,219 € en cycle urbain et entre 5,638 € et 18,688 € en cycle extra-urbain.

Les coûts externes totaux sur le cycle extra-urbain sont nettement inférieurs à ceux du cycle urbain. Ceci s'explique, d'une part, par la baisse des surémissions sur le cycle extra-urbain par rapport au cycle urbain et, d'autre part, par une baisse du coût externe unitaire. Pour les voitures diesel, la majeure fraction de ces coûts se rapporte aux émissions de particules et concerne donc principalement les effets sur la qualité de l'air et la santé.

Une estimation plus globale des coûts externes pour l'année 2003 générés par le parc automobile bruxellois a été calculée sur base des hypothèses suivantes.

La valeur médiane des deux fourchettes de coût (diesel, essence) a été retenue comme coût externe total de surémission pour chaque type de motorisation.

La répartition diesel/essence du parc automobile bruxellois s'est faite suivant le taux de répartition du parc belge. Le nombre de voitures équipées avec l'air conditionné a été obtenu sur base du taux d'équipement réel (40% pour l'année 2003) dégagé dans la section concernant l'équipement du parc belge.

Ainsi d'après nos calculs, les coûts externes totaux liés à la surémission de polluants dans l'atmosphère par les voitures privées immatriculées dans la RBC se situeraient autour des 2.757.093 € pour l'année 2003 avec une répartition de 20.643 € pour les voitures essence et 2.736.450 € pour les diesels.

Notons que ces chiffres se réfèrent au parc bruxellois et la prise en compte de la réalité des navetteurs quotidiens conduirait certainement à des coûts plus conséquents pour le territoire de la Région bruxelloise.

Vu la faiblesse de ces coûts par voiture (0,17 €/ an pour un véhicule essence et 26,21 € pour un véhicule diesel), il serait assez aisé d'internaliser ce coût externe, selon le principe du « pollueur-payeur », via le paiement d'une taxe sur l'équipement de l'air conditionné lors de l'achat du véhicule (voir plus loin la section sur les recommandations).

Afin de fournir une analyse la plus complète possible sur les coûts externes de l'air conditionné automobile, nous allons au point suivant présenter les coûts externes relatifs à la production et au transport du carburant surconsommé.

E. Les émissions à la production et à l'acheminement du carburant surconsommé

Afin de tenir compte de l'ensemble des coûts externes engendrés par le fonctionnement de l'air conditionné automobile, il faut également considérer les émissions indirectes de polluants liées à la production et à la distribution du carburant surconsommé.

Les émissions indirectes sont celles qui sont issues des processus en amont de la consommation du carburant (« Well-to-Tank ») à savoir les opérations d'extraction, de raffinage, de transport et de distribution des carburants.

La part de ces émissions indirectes causée par l'utilisation de l'air conditionné automobile est proportionnelle à la surconsommation de carburant qu'elle engendre.

La part des émissions de polluants induites lors des processus en amont de la consommation a été estimée dans le cadre du projet Ecoscore [38] et est reprise dans le **tableau 43** suivant.

	contenu énergétique	densité	CO	NMHC	NO _x	PM	CO ₂	SO ₂	CH ₄
	[kJ/kg]	[g/l]	[mg/kWh]	[mg/kWh]	[mg/kWh]	[mg/kWh]	[mg/kWh]	[mg/kWh]	[mg/kWh]
Essence	42715,23	755	18,4	761,4	151,9	8,6	33100	236,2	62,6
Diesel	43273,8	850	16,6	315,4	129,6	3,6	24500	174,2	56,5

Source : Ecoscore, 2004

Tableau 42 : Emissions (mg/kwh) indirectes de polluants lors de la production et la distribution de carburants

D'après le **Tableau 42**, la production et la distribution pour le carburant essence semblent engendrer des émissions supérieures à celles du carburant diesel.

Sur base des estimations d'émissions indirectes, des coûts unitaires externes associés à chaque polluant, des taux de surconsommation de carburant et selon l'hypothèse d'une utilisation annuelle de l'air conditionné de 100 heures en cycle urbain de même qu'en cycle extra-urbain, il nous a été possible de dégager les coûts externes liés à la production et à l'acheminement du carburant consommé par le fonctionnement de l'air conditionné automobile.

Ces derniers sont présentés dans le **Tableau 43** qui suit.

			Petite urbaine		Voiture moyenne		Grande voiture		4x4	
			Yaris	Lupo	Astra	Golf	Xsara Picasso	Mercedes Breal	XC90	X 3.0 D
			1000 Wti	1.4 44KW	1,6 16 V Cc	1,9 Tdi 77	2,0l 16 V	E220 CDI	2,5T	3,0D
Urbain	Changement climatique	CO2	0,331	0,404	0,458	0,388	0,614	0,519	0,740	0,701
		CH4 (en eq. CO2)	0,014	0,017	0,020	0,020	0,026	0,027	0,032	0,037
	Qualité de l'air, santé	CO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		NOx	0,062	0,076	0,086	0,084	0,115	0,112	0,139	0,152
		HC	0,811	0,990	1,121	0,531	1,503	0,711	1,813	0,961
		Particules	0,316	0,386	0,437	0,209	0,585	0,280	0,706	0,379
	Qualité de l'air, écosystèmes	SO2	0,526	0,641	0,726	0,613	0,974	0,821	1,175	1,109
		NOx	0,006	0,007	0,008	0,008	0,011	0,011	0,014	0,015
		SO2	0,015	0,018	0,020	0,017	0,027	0,023	0,033	0,031
		Coûts externes surémissions totaux	2,081	2,540	2,876	1,871	3,855	2,504	4,651	3,385
			Petite urbaine		Voiture moyenne		Grande voiture		4x4	
			Yaris	Lupo	Astra	Golf	Xsara Picasso	Mercedes Breal	XC90	X 3.0 D
			1000 Wti	1.4 44KW	1,6 16 V Cc	1,9 Tdi 77	2,0l 16 V	E220 CDI	2,5T	3,0D
Extra-Urbain	Changement climatique	CO2	0,410	0,410	0,452	0,544	0,527	0,680	0,762	1,014
		CH4 (en eq. CO2)	0,018	0,018	0,019	0,031	0,023	0,039	0,033	0,059
	Qualité de l'air, santé	CO	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		NOx	0,077	0,077	0,085	0,118	0,099	0,147	0,143	0,219
		HC	1,004	1,004	1,107	0,746	1,291	0,932	1,865	1,390
		Particules	0,391	0,391	0,431	0,294	0,211	0,367	0,727	0,547
	Qualité de l'air, écosystèmes	SO2	0,496	0,496	0,546	0,860	0,637	1,075	0,920	1,603
		NOx	0,008	0,008	0,008	0,012	0,010	0,014	0,014	0,022
		SO2	0,014	0,014	0,015	0,024	0,018	0,030	0,026	0,045
		Coûts externes surémissions totaux	2,417	2,417	2,664	2,628	2,815	3,285	4,489	4,898

Tableau 43 : Coûts externes annuels résultant de la production et de la distribution du carburant

Pour les voitures essence, les coûts externes annuels de l'air conditionné automobile liés à la production et à la distribution de carburant se situent entre 2,081 € et 4,651€ sur un cycle urbain et entre 2,417 € et 4,489 € pour un cycle extra-urbain.

Pour les voitures diesel, ces mêmes coûts varient respectivement entre 1,871 € et 3,385 € et entre 2,628 € et 4,896 €.

Ainsi, ces coûts ne diffèrent pas considérablement entre les deux types de motorisation.

De même, les coûts externes annuels sur les deux cycles se situent pratiquement pour les deux types de carburant sur le même intervalle. Cela s'explique essentiellement par le fait que dans le calcul des coûts du cycle extra-urbain la hausse du kilométrage soit compensée par une baisse de la surconsommation.

Pour chacune des motorisations, les émissions de SO₂ et d'hydrocarbures sont celles induisant les postes les plus élevés sur l'ensemble des coûts externes liés à la production et à l'acheminement des carburants.

Une estimation plus globale des coûts externes engendrés par le parc automobile bruxellois pour l'année 2003 a été calculée sur base des mêmes hypothèses retenues pour les estimations des coûts externes totaux reliés aux surémissions de polluants.

Ainsi, le coût externe total de production et de distribution retenu pour chaque type de motorisation est la valeur moyenne de chacune des deux fourchettes de coût (diesel, essence).

Notons que le coût pour les véhicules diesel est quelque peu surévalué du fait que les trois véhicules repris dans l'analyse sont des diesel suralimentés qui présentent des taux de surconsommation plus élevés (~ 8%) que ceux des moteurs diesel atmosphérique.

La répartition diesel/essence du parc automobile bruxellois s'est faite sur base du taux de cette même répartition du parc belge. Un taux d'équipement réel de 40%³⁶ a été retenu pour l'année 2003 pour estimer le nombre de voitures équipées avec un système d'air conditionné.

³⁶ Obtenu sur base des estimations effectuées dans la partie concernant le taux d'équipement du parc belge.

Ainsi d'après ces calculs, pour le parc bruxellois, les coûts externes totaux liés à la production et à la distribution de carburant se situeraient autour des 687.832 € pour l'année 2003 avec une répartition 413.430 € pour les voitures essence et 274.402 € pour les diesel.

Il importe, néanmoins, de souligner que même si ces coûts sont générés par la consommation de carburant sur le territoire bruxellois, seule une partie minime de ce coût est effectivement supportée par ce même territoire, soit la partie reliée à la distribution du carburant (vapeurs de carburant et émanations de COV) aux stations de distribution.

En effet, comme la Belgique est importatrice de produits pétroliers, l'essentiel du coût externe de production et de distribution est supporté par les pays producteurs de carburants et ceux via lesquels est effectué leur acheminement.

Pour terminer ce chapitre nous allons donner une présentation synthétique des principaux résultats issus de notre analyse.

F. Synthèse et conclusions

Notre analyse des coûts externes s'est uniquement focalisée sur les externalités de l'air conditionné automobile. En effet, n'étant pas parvenus à quantifier les effets positifs (confort, sécurité routière) qui peuvent être induits par ce type de système, il ne nous a pas été possible de les inclure dans l'analyse économique. Il faut donc considérer que le coût externe total supporté par la société est donc moindre par rapport à ce qui est avancé ci-dessous.

L'ensemble des coûts externes associés au fonctionnement de l'air conditionné est repris dans le tableau suivant.

	Petite urbaine		Voiture moyenne		Grande voiture		4x4	
	Yaris	Lupo	Astra	Golf	Xsara Picasso	Mercedes Break	XC90	X 3.0 D
	1000 Wti	1,4 60cv	1,6 16 V Com	1,9 Tdi 77 Cd	2,0l 16 V	E220 CDI	2,5T	3,0D
Emissions directes	4,495 €	5,686 €	6,976 €	7,472 €	6,976 €	9,456 €	8,960 €	4,495 €
Surémissements								
Urbain	0,094	0,141	0,283	12,193	0,242	24,373	0,242	40,219
Extra-Urbain	0,098	0,149	0,387	5,638	0,266	11,347	0,222	18,688
Production et acheminement								
Urbain	2,081 €	2,540 €	2,876 €	1,871 €	3,855 €	2,504 €	4,651 €	3,385 €
Extra-Urbain	2,417 €	2,417 €	2,664 €	2,628 €	2,815 €	3,285 €	4,489 €	4,898 €
Total urbain	6,670 €	8,367 €	10,135 €	21,536 €	11,074 €	36,333 €	13,853 €	48,099 €
Total extra-urbain	7,011 €	8,252 €	10,027 €	15,739 €	10,057 €	24,089 €	13,671 €	28,081 €

Tableau 44 : Coûts externes négatifs totaux de l'air conditionné automobile

Dans l'ensemble, il ressort que les coûts externes annuels sont plus élevés pour les voitures diesel que pour celles à essence.

En effet, la fourchette des coûts externes totaux pour les voitures essence se situe entre 6,670 € (urbain) et 13,653 € (extra-urbain) et pour celles alimentées au diesel entre 15,739 € (extra-urbain) et 46,099 € (urbain). Cet écart s'explique essentiellement par des coûts externes de surémissements beaucoup plus conséquents pour les voitures diesel suite à la surémission de particules.

Pour les voitures essence, les émissions directes présentent la source de coûts externes la plus importante alors que pour les voitures diesel ce sont les surémissements qui engendrent le poste majeur des coûts externes.

La différence entre les coûts totaux annuels urbains et extra-urbains est infime pour les voitures essence alors qu'elle représente plus d'un tiers pour les voitures diesel. Cette

différence s'explique par une baisse des émissions de particules sur le cycle extra-urbain ainsi qu'une baisse du coût externe unitaire associé à ces émissions.

	Coûts externes parc bruxellois 2003
Emissions directes	1.554.754,36 €
Surémissions	2.757.093 €
Production et acheminement	687.832,00 €
Total	4.999.679 €

Tableau 45 : Coûts externes totaux de l'air conditionné automobile en RBC pour l'année 2003

Le coût externe total engendré par le parc automobile bruxellois calculé suivant les diverses estimations retenues s'élève à 4.999.679 € pour l'année 2003.

Le poste le plus important est celui relatif aux surémissions de polluants liées aux surconsommations de carburant. L'essentiel de ce coût représente les émissions de particules des moteurs diesel.

Rappelons, néanmoins, que ce coût total est sous-estimé, d'une part, du fait que nous avons pour la majorité des polluants eu recours au coût externe unitaire moyen et non au coût marginal (plus élevé et plus approprié dans cette thématique).

Il importe de souligner qu'une part importante de ce coût externe généré en Région de Bruxelles-Capitale est supportée par les pays producteurs et transformateurs de produits pétroliers (impacts environnementaux liés à la production et à l'acheminement des carburants) ainsi que le reste du monde actuel et futur (GES et réchauffement climatique).

Une stratégie de réduction des coûts externes de l'air conditionné automobile passerait prioritairement par une diminution des émissions directes. En effet, les mesures visant une diminution des deux autres postes de coûts exigeraient la réduction des émissions des véhicules à moteur sur l'ensemble du cycle de vie et ne viseraient pas prioritairement l'air conditionné.

Cette diminution des fuites pourrait pour le HFC 134a être obtenue, d'une part, par une récupération des liquides réfrigérants en fin de vie et, d'autre part, par une étanchéité renforcée des circuits du froid ainsi que la diminution des charges nominales.

Notons que les systèmes d'air conditionné automobile fonctionnant au CO₂ éliminent intégralement les émissions directes. Les premières boucles de froid alimentées au CO₂ vont apparaître progressivement sur le marché à partir de cette année. Il faudrait dès lors en favoriser l'achat par rapport aux systèmes HFC 134a.

Notons que la faiblesse des coûts externes par voiture permettrait d'internaliser une partie voir l'entièreté de ce coût auprès des automobilistes équipés avec la climatisation via l'imposition d'une taxe (voir analyse de sensibilité) selon le principe du « pollueur-payeur ». Cependant l'augmentation du prix du liquide réfrigérant n'induirait pas nécessairement une meilleure récupération des fluides, même si la hausse de sa valeur économique la rendait plus intéressante pour les casses.

Il serait peut-être dès lors plus intéressant d'instaurer une redevance garantissant le financement du retraitement de ces liquides après leur récupération en fin de vie.

Les différents postes de coûts ont été jusqu'à présent présentés de façon isolée et pour une durée moyenne de fonctionnement de l'air conditionné de 100 heures par an sans prendre en compte les spécificités d'utilisation du véhicule.

Dans le chapitre suivant, nous allons estimer pour trois profils distincts d'utilisation d'un véhicule, les coûts totaux annuels résultant de l'équipement et du fonctionnement de l'air conditionné automobile. Afin de mettre en évidence les variables influençant le plus les coûts totaux annuels, nous soumettrons les trois scénarios de référence à une analyse de sensibilité.

XIV. Coûts totaux annuels de l'air conditionné automobile : étude selon trois scénarios d'utilisation d'un véhicule et analyse de sensibilité

Sur base des résultats obtenus pour les diverses catégories de coûts, nous allons effectuer une analyse détaillée en nous appuyant sur 3 scénarios d'utilisation de véhicule ainsi que sur une analyse de sensibilité.

Les scénarios de référence reprennent les hypothèses les plus réalistes d'utilisation et de coûts liés à l'air conditionné automobile. L'analyse de sensibilité permet, quant à elle de faire varier ces hypothèses (paramètres des calculs) pour vérifier l'importance d'éventuels changements sur le calcul des coûts.

Les coûts sont annualisés et ensuite calculés au km parcouru.

Les scénarios de référence sont au nombre de trois et permettent de mieux rendre compte des divers profils d'utilisation des véhicules.

Les trois scénarios se caractérisent par :

- une utilisation sur 5 ans avec un kilométrage annuel parcouru de 20.000 km. Ce profil correspond aux représentants de commerce et autres professionnels du service dont l'activité professionnelle exige de nombreux déplacements au moyen de voitures de société sous contrats de leasing ;
- une utilisation sur 7 ans avec un kilométrage annuel de 15.000 km. Ce scénario reprend les valeurs moyennes qui caractérisent le parc automobile en Belgique. Ainsi, le kilométrage annuel moyen parcouru (en 2003) pour la Belgique était de 15.000 km et l'âge moyen du parc se situait à 7 années et huit mois et vingt jours (Febiac).
- une utilisation sur 10 ans avec un kilométrage de 10.000 km/an. Ce scénario constitue une hypothèse basse par rapport au scénario précédent. Il correspond à un amortissement intégral du véhicule par son acquéreur.

A. Les hypothèses communes aux trois scénarios d'utilisation

1. Le coût d'achat

Le coût d'achat d'un système d'air conditionné automobile retenu pour l'analyse est le prix en option. Pour les véhicules ayant l'équipement d'air conditionné en série, il ne nous a pas été possible d'identifier ce coût dans le prix global du véhicule.

Vu que le marché de deuxième monte est voué à disparaître progressivement, il nous a semblé peu pertinent d'intégrer le prix de ce mode d'équipement dans la présente grille d'analyse.

2. Le capital immobilisé

Le capital immobilisé représente le coût, dans le sens de perte de gain d'intérêts, découlant de l'investissement dans un système d'air conditionné automobile sur toute sa durée de vie. En effet, si l'acquéreur d'un système d'air conditionné n'avait pas investi dans ce type d'équipement, et s'il avait placé son argent dans un produit bancaire, il aurait pu en retirer

un gain sous forme d'intérêts. Cette perte de gain est considérée dans la présente analyse comme constituant un coût pour le consommateur.

La formule de calcul du capital immobilisé est la suivante :

$$\frac{(\text{prix d'achat} - \text{prix de revente})}{\text{nombre d'années de capitalisation}} \times (\text{taux d'intérêt}) \times (1 + \text{taux d'intérêt})^{\text{nombre d'années d'utilisation}}$$

Suite aux interviews téléphoniques que nous avons eues avec des entreprises³⁷ du marché de vente de voitures de seconde main, il est ressorti qu'il n'existe pas réellement de différence de prix entre des voitures d'un même modèle équipé ou non d'un système d'air conditionné, de sorte qu'il n'y a pas vraiment de valeur de revente pour le système l'air conditionné automobile. C'est pourquoi, dans le cadre de la présente analyse nous avons retenu une valeur de revente nulle.

Le taux d'intérêt retenu (2,5%) est celui offert pour les comptes d'épargne chez Fortis et Dexia.

3. La dépréciation

La dépréciation indique la perte de valeur annuelle subie par le propriétaire d'un bien, ici en l'occurrence le propriétaire d'un système d'air conditionné automobile.

La formule d'amortissement retenue est :

$$\frac{(\text{prix d'achat} - \text{prix de revente})}{\text{nombre d'années}}$$

Dans notre cas, comme pour le calcul du capital immobilisé nous avons considéré que le prix de revente du système est nul.

4. L'entretien

Les opérations d'entretien retenues pour l'analyse des coûts annuels sont le changement du filtre à air, la recharge du liquide réfrigérant, le remplacement de la bouteille déshydratante et la désinfection du système. Pour les trois scénarios de base nous avons retenu, sur base des recommandations émises par les garagistes, un changement du filtre à pollen et une désinfection annuels, de même qu'un remplacement de la bouteille déshydratante tous les deux ans. La périodicité de la recharge du gaz est fonction des pertes annuelles. Pour les scénarios de référence, nous avons considéré le scénario pessimiste³⁸ des émissions directes³⁹. Les prix retenus pour la recharge et la désinfection du système sont les prix minima issus de notre enquête auprès des garages. Ceux relatifs à la bouteille déshydratante et au filtre à air ont été obtenus sur base du catalogue WAECO 2004.

5. Les cycle de roulage et de la durée de fonctionnement

Les coûts calculés jusqu'à présent étaient exprimés en termes de cycle de roulage urbain ou extra urbain pour un fonctionnement annuel de l'air conditionné pendant 100 heures. Or, l'utilisation annuelle de l'air conditionné est liée au kilométrage parcouru, généralement mix

³⁷ Nearly New Car et My Way.

³⁸ Le scénario pessimiste se caractérise par des émissions régulières de 15% de la charge nominale par an ainsi qu'une émission totale du fluide réfrigérant restant dans le système en fin de vie (non récupération).

³⁹ Voir Annexe : Calculs des émissions directes pour le scénario d'émission optimiste et pessimiste.

de trajets urbains et extra-urbains. Afin d'adapter les coûts calculés précédemment aux diverses caractéristiques d'utilisation des trois scénarios de référence, il nous a fallu déterminer la durée annuelle d'utilisation de l'air conditionné pour chacun des trois scénarios de référence.

Ainsi, pour le scénario moyen de 15.000 km/an (ce qui correspond au kilométrage annuel moyen pour la Belgique en 2003), nous avons arrêté une durée de fonctionnement annuelle moyenne de 100 heures. La vitesse annuelle moyenne sur un cycle mixte de 40,7 km/h, retenue pour la présente analyse, a été obtenue par le calcul de la moyenne entre les vitesses moyennes en cycles urbain (18,2 km/h) et extra urbain (62,6km/h).

Soulignons, que ce type de calcul de la vitesse moyenne induit que l'on pose une première hypothèse implicite qui veut que l'on roule sur l'année le même nombre d'heures en cycle urbain qu'en cycle extra-urbain. Une deuxième hypothèse implicite, à ce calcul, est l'utilisation homogène de l'air conditionné sur les cycles urbain et extra-urbain.

La considération de ces trois paramètres indique que sur une année, environ 27% du nombre d'heures de roulage est parcouru avec l'air conditionné en état de fonctionnement. Sur base de ce constat, nous avons pu calculer la durée de fonctionnement annuelle pour les deux autres scénarios, et ainsi déterminer les facteurs de multiplication afin d'obtenir les coûts annuels liés à la surconsommation de carburant et aux surémissions de polluants ainsi qu'à l'acheminement et à la production du carburant supplémentaire.

6. Les émissions directes

Le calcul des coûts externes liés aux émissions directes repose sur le scénario d'émission pessimiste présenté dans la partie relative aux émissions directes. Notre choix, pour ce scénario, s'explique essentiellement par le fait que la récupération systématique des liquides réfrigérants en fin de vie n'est pas une réalité en Belgique malgré l'obligation prévue par la directive 2000/53 CE.

Depuis le 15 avril 2004, cette directive a été transposée au niveau de la Région de Bruxelles-Capitale au travers de l'arrêté portant cette même date et intitulé : « Arrêté relatif à la gestion des véhicules hors d'usage ». Cet arrêté lie, entre autres, l'obligation de récupération des fluides réfrigérants en fin de vie du véhicule à l'obtention du permis d'environnement.

Il semble toutefois, que nous nous trouvions dans une phase de transition étant donné que cette nouvelle obligation n'est pas encore intégrée dans les pratiques quotidiennes de dépollution et de démontage des véhicules hors d'usage. Une explication probable, à ce temps de réaction relativement long de la part des entreprises concernées par ces nouvelles dispositions légales, réside dans le fait que l'ensemble des investissements liés à ces nouvelles obligations est entièrement à leur charge.

Les émissions directes annuelles ont été calculées pour les trois scénarios d'utilisation sur base des émissions totales sur toute la durée d'utilisation du système. En ce qui concerne les émissions en fin de vie de l'air conditionné, nous les avons réparties selon le principe de « responsabilité proportionnelle à la durée d'utilisation », c'est-à-dire au prorata de l'utilisation sur la durée de vie du véhicule.

La durée de vie pour les véhicules diesel a été fixée à 200.000 km alors que nous avons retenu un kilométrage de 150.000 km pour les véhicules essence.

B. Les hypothèses pour l'analyse de sensibilité

Les différents scénarios repris ci-dessous ont pour objet de mettre en évidence l'influence de certains paramètres sur l'ensemble des coûts directs ou totaux liés à l'équipement et à l'utilisation de l'air conditionné automobile.

1. Fixation du prix d'achat à 1€

A la veille de l'été, ce type d'argument de vente se généralise dans les réseaux de concessionnaires afin d'écouler un nombre maximal de voitures équipées avec l'air conditionné. Il est à noter que durant les premières années où le véhicule est sous garantie du concessionnaire, les entretiens seront effectués auprès de ce dernier qui bénéficie ainsi d'une sorte de monopole sur le marché après-vente.

2. Imposition d'une taxe

L'intérêt de cette hypothèse est l'application d'un instrument réglementaire permettant, d'une part, d'internaliser les coûts externes, dans le respect du principe du « pollueur-payeur » et, d'autre part, d'augmenter la valeur économique du liquide réfrigérant, ce qui pourrait inciter les acteurs à en prévenir les fuites. Le choix des deux niveaux de taxe (13,5€ et 31€ par kg de HFC134a) s'est fait sur base des expériences danoise et norvégienne et vise à analyser l'influence de ceux-ci sur les coûts totaux.

3. Redevance de type « Récupel »

Autre instrument régalién par rapport à la taxe, la redevance vise, d'une part, elle aussi l'internalisation des coûts externes selon le principe du « pollueur-payeur » et, d'autre part, la création d'un fond permettant le financement d'un réseau de récupération des fluides réfrigérants en fin de vie du système/du véhicule. Comme pour la taxe, la fixation de deux niveaux de redevance sert à analyser l'influence de cette dernière sur les coûts totaux. La fixation du montant à 50 € s'est faite de façon arbitraire alors que celle des 21 € a été reprise de l'expérience japonaise.

4. Hausse du prix du carburant de 10% et 20%

Le prix du carburant est un paramètre-clé dans les coûts liés à l'utilisation de l'air conditionné automobile. La hausse du prix des produits pétroliers constitue une réalité tangible à laquelle les économies mondiales sont confrontées depuis une trentaine d'années et qui, dans une perspective d'épuisement progressif des réserves, risque de s'accroître.

5. Hausse de l'utilisation moyenne annuelle (150 et 200 heures)

Comme tous nos calculs préliminaires étaient basés sur une hypothèse d'utilisation moyenne de l'air conditionné de 100 heures par an, il nous a semblé indispensable, dans une étude visant à chercher des arguments de sensibilisation à l'égard du consommateur, d'en présenter l'influence en termes de coûts dans deux scénarios où l'utilisation a été portée à la hausse. Un fonctionnement moyen de 150 heures par an de la climatisation correspond à 41 % de la durée annuelle de conduite dans le scénario d'utilisation « normale » alors qu'une durée de fonctionnement de 200 heures correspond à 52 % de cette durée.

6. Scénario optimiste des émissions directes

De même que pour l'hypothèse précédente, il nous a semblé primordial de montrer l'incidence en termes de coûts d'une politique allant dans le sens d'un confinement des fuites et d'une récupération en fin de vie des liquides réfrigérants.

C. Scénario d'utilisation intense (5 années avec 20.000 km/an)

Pour déterminer les coûts annuels résultant d'une utilisation du véhicule sur 5 années à concurrence de 20.000 km parcourus par an, nous avons retenu les hypothèses suivantes :

1. Durée d'utilisation annuelle

Si l'on considère que 27 % de la durée annuelle de roulage est effectuée avec l'air conditionné activé, dans le cas d'un kilométrage annuel moyen de 20.000 km et d'une vitesse annuelle moyenne de 40,7 km/h, cela donne 133 heures de fonctionnement réparties à concurrence de 66 heures en cycle urbain et 66 heures en cycle extra-urbain.

2. L'entretien

Le scénario pessimiste des émissions directes ne prévoit qu'une seule recharge de gaz sur les cinq premières années. Le changement du filtre à air et la désinfection du système sont prévus chaque année et le dessiccateur est remplacé tous les deux ans.

Les résultats de nos calculs pour ce scénario d'utilisation (5 ans et 20.000 km/an) sont repris dans le tableau ci-dessous.

	Petite urbaine		Voiture moyenne		Grande voiture		4x4	
	Yaris	Lupo	Astra	Golf	Xsara Picasso	Mercedes Break	XC90	X 3.0 D
Version	1000 Wti	E 1,4 160 cv	1,6 16 V Comfort	1,9 Tdi 77 Comfortline	2,0l 16 V	E220 CDI	2,5T	3,0D
Charge nominale	450g	570g	700g	750g	700g	950g	900g	450g
Coûts d'achat								
Origine*		1.150 €	1.244 €	1.160 €	non déterminable	n.d.	n.d.	n.d.
Coûts fixes					non déterminable	n.d.	n.d.	n.d.
Capital immobilisé	6 €	7 €	6 €	non déterminable	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Dépréciation	230 €	249 €	232 €	non déterminable	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Entretien	64,36	81,4	86,14	74,68	76,92	84,42	113,72	118,72
Réparation								
Coûts de surconsommation	67,66 €	74,32 €	83,03 €	71,51 €	104,13 €	92,01 €	137,07 €	131,63 €
COÛTS DIRECTS TOTAUX/an	368 €	411 €	408 €	146 €	181 €	176 €	251 €	250 €
Coûts externes								
Emissions directes	5,54 €	6,99 €	8,57 €	8,40 €	8,57 €	10,62 €	11,00 €	5,07 €
Surémissions liées à surconsommation	0,128	0,193	0,447	11,888	0,339	23,813	0,309	39,272
Emissions production et acheminement	2,999	3,305	3,693	3,000	4,447	3,860	6,093	5,522
COÛTS EXTERNES TOTAUX/an	8,66 €	10,49 €	12,71 €	23,29 €	13,36 €	38,29 €	17,40 €	49,86 €
COÛTS ANNUELS TOTAUX	377,02 €	421,88 €	420,28 €	169,47 €	194,41 €	214,72 €	268,20 €	300,21 €
COÛTS ANNUELS AU KM (en €/km)	0,02 €	0,02 €	0,02 €	0,01 €	0,01 €	0,01 €	0,01 €	0,02 €

Tableau 46 : Coûts annuels totaux pour le scénario d'utilisation de la voiture sur 5 ans avec 20.000 km parcourus/an

Les coûts totaux annuels, répartis en coûts directs et en coûts externes, liés à l'air conditionné automobile pour une utilisation d'un véhicule sur 5 ans à concurrence de 20.000 km/an pour les 8 huit voitures reprises dans l'analyse varient entre 169,47 € et 420 €, ce qui représente un coût au km se situant entre 0,01 € et 0,02 €.

Les coûts directs totaux semblent être plus élevés pour les trois premières voitures (Yaris, Lupo, Astra), mais cela découle du fait que le coût d'achat pour ces dernières est connu et que l'on sait donc estimer tous les postes de coûts.

Ainsi, pour les cinq voitures pour lesquelles le prix d'achat n'est pas déterminable, les coûts directs annuels totaux se composent uniquement des frais d'entretien et de surconsommation. Ils figurent dans une fourchette allant de 146€ à 251€.

Le coût annuel d'entretien varie pour les huit voitures analysées entre 64€ et 118€ et dépend fortement du prix des pièces de rechange. En effet, la différence entre le coût annuel d'entretien de la Yaris et de la BMW X3 est constituée par l'écart entre les prix du filtre à air et ceux de la bouteille déshydratante.

Les coûts de surconsommation dépendent du type de motorisation (taux de surconsommation plus élevé pour les voitures diesel que pour les véhicules essence), de la taille du moteur et du coût du carburant. Ainsi, les petites voitures essence, malgré un coût du carburant plus élevé par rapport aux voitures diesel, présentent un coût plus réduit que leurs homologues diesel.

Notons que les coûts variables directs (entretien et surconsommation) représentent un budget annuel relativement important pour le consommateur, à savoir 8 % à 16 % du budget des ménages en Région de Bruxelles-Capitale consacré aux dépenses d'utilisation des véhicules pour l'année 2001.

Les coûts externes sont dans l'ensemble relativement faibles par rapport aux coûts directs. Les coûts externes générés par les émissions directes croissent en fonction de la charge nominale du système. Ceux liés aux surémissions sont nettement plus importants pour les voitures diesel que pour les voitures essence, à cause de l'importante émission particulaire. Les coûts externes induits par la production et le transport de carburant croissent en fonction de la consommation moyenne des véhicules, des taux de surconsommations dus au fonctionnement de l'air conditionné et du type de motorisation.

L'analyse de sensibilité qui suit va permettre d'identifier quels sont les paramètres les plus susceptibles d'influencer les coûts totaux.

		Petite urbaine		Voiture moyenne			Grande voiture		4x4	
		Yaris	Lupo	Astra	Golf	Xsara Picasso	Mercedes Bre	XC90	X 3.0 D	
Version		1000 Wti	E 1,4 1 60 cv	1,6 16 V Comfo	1,9 Tdi 77 C	2,0l 16 V	E220 CDI	2,5T	3,0D	
Charge nominale		450g	570g	700g	750g	700g	950g	900g	450g	
Scénario de référence	Coûts hors coûts externes	368 €	411 €	408 €	146 €	181 €	176 €	251 €	250 €	
	Coûts totaux	377,02 €	421,88 €	420,28 €	169,47 €	194,41 €	214,72 €	268,20 €	300,21 €	
Prix d'achat 1€	Rapport au scénario de référence	-63%	-61%	-57%	0%	0%	0%	0%	0%	
	Coûts hors coûts externes	132 €	156 €	169 €	146 €	181 €	176 €	251 €	250 €	
Taxe 13,5€/kg	Coûts totaux	140,88 €	166,42 €	182,09 €	169,47 €	194,41 €	214,72 €	268,20 €	300,21 €	
	Rapport au scénario de référence	1%	1%	1%	2%	2%	2%	2%	1%	
Taxe 31€/kg	Coûts hors coûts externes	371 €	415 €	411 €	150 €	185 €	182 €	256 €	253 €	
	Coûts totaux	377,02 €	421,88 €	420,28 €	169,47 €	194,41 €	214,72 €	268,20 €	300,21 €	
Redevance 21€	Rapport au scénario de référence	2%	2%	2%	6%	5%	6%	4%	2%	
	Coûts hors coûts externes	374 €	419 €	416 €	156 €	190 €	188 €	262 €	256 €	
Redevance 50€	Coûts totaux	382,68 €	429,04 €	429,08 €	178,90 €	203,21 €	226,66 €	279,51 €	305,87 €	
	Rapport au scénario de référence	1%	1%	1%	3%	2%	2%	2%	1%	
Hausse du prix du carburant +10%	Coûts hors coûts externes	373 €	416 €	412 €	151 €	185 €	181 €	255 €	255 €	
	Coûts totaux	381,34 €	426,19 €	424,60 €	173,79 €	198,72 €	219,04 €	272,51 €	304,53 €	
Hausse du prix du carburant +20%	Rapport au scénario de référence	3%	2%	2%	6%	5%	5%	4%	3%	
	Coûts hors coûts externes	379 €	422 €	418 €	156 €	191 €	187 €	261 €	261 €	
Utilisation moyenne annuelle 150 heures	Coûts totaux	387,30 €	432,15 €	430,56 €	179,75 €	204,68 €	225,00 €	278,47 €	310,49 €	
	Rapport au scénario de référence	2%	2%	2%	4%	5%	4%	5%	4%	
Utilisation moyenne annuelle 200 heures	Coûts hors coûts externes	375 €	419 €	416 €	153 €	191 €	186 €	265 €	264 €	
	Coûts totaux	383,79 €	429,31 €	428,59 €	176,62 €	204,82 €	223,92 €	281,90 €	313,38 €	
Scénario des pertes de fluides optimiste	Rapport au scénario de référence	4%	4%	4%	11%	8%	9%	10%	9%	
	Coûts hors coûts externes	382 €	426 €	424 €	160 €	202 €	195 €	278 €	277 €	
Scénario des pertes de fluides pessimiste	Coûts totaux	390,56 €	436,74 €	436,89 €	183,77 €	215,23 €	233,12 €	295,61 €	326,54 €	
	Rapport au scénario de référence	9%	9%	10%	25%	28%	28%	27%	29%	
Scénario des pertes de fluides optimiste	Coûts hors coûts externes	402 €	449 €	449 €	182 €	233 €	222 €	319 €	316 €	
	Coûts totaux	412,42 €	460,79 €	463,87 €	212,67 €	248,86 €	274,56 €	339,93 €	388,43 €	
Scénario des pertes de fluides pessimiste	Rapport au scénario de référence	19%	18%	21%	51%	56%	56%	53%	59%	
	Coûts hors coûts externes	436 €	486 €	491 €	218 €	285 €	268 €	388 €	382 €	
Scénario des pertes de fluides optimiste	Coûts totaux	447,81 €	499,70 €	507,46 €	255,87 €	303,32 €	334,40 €	411,67 €	476,64 €	
	Rapport au scénario de référence	-1%	-1%	-1%	-3%	-3%	-3%	-2%	-1%	
Scénario des pertes de fluides pessimiste	Coûts hors coûts externes	368 €	411 €	408 €	146 €	181 €	176 €	251 €	250 €	
	Coûts totaux	373,64 €	417,60 €	415,39 €	164,96 €	189,51 €	209,01 €	261,92 €	297,49 €	

Tableau 47 : Résultats de l'analyse de sensibilité pour le scénario 5 ans d'utilisation avec 20.000 km parcourus/an

L'analyse de sensibilité indique que les hypothèses induisant un impact considérable sur les coûts totaux sont le prix d'achat du système, la hausse du prix du carburant ainsi que l'augmentation de l'utilisation moyenne annuelle du système d'air conditionné.

La réduction du prix d'achat du système d'air conditionné à 1 € entraîne une baisse se situant entre 57 % et 63 % du coût total pour les trois voitures ayant un prix d'équipement en option. Notons qu'une telle diminution du prix d'achat est fréquemment employée comme argument de vente par les concessionnaires à l'approche de l'été.

Néanmoins les coûts directs restants, c'est-à-dire les coûts variables, restent tout de même relativement importants et représentent, pour rappel, entre 8 % à 16 % du budget annuel consacré aux dépenses d'utilisation des véhicules par les ménages en Région de Bruxelles-Capitale pour l'année 2001.

Une hausse du carburant de 20% entraîne un accroissement des coûts totaux de 4% à 11 % pour les différentes voitures. Cette hausse de 20% représente un prix de 1,37 € pour un litre d'essence et 0,97 € pour la même quantité de diesel.

Une augmentation de 50 % de la durée annuelle moyenne du fonctionnement de l'air conditionné automobile conduit à une hausse de 9 % à 29 % des coûts totaux.

Un doublement (+100 %) de la durée annuelle moyenne d'utilisation de l'air conditionné automobile génère une augmentation de 19 % à 59 % des coûts totaux.

Cette augmentation des coûts totaux s'opère essentiellement par une hausse des coûts directs variables (coûts de surconsommation).

Remarquons que l'imposition d'une taxe sur HFC 134a ou l'introduction d'une redevance sur le prix d'achat du système n'induisent, toutes deux, qu'une augmentation minimale (de l'ordre de 1 % à 6 %) des coûts totaux.

L'imposition d'une taxe serait justifiée par une volonté politique visant à une réduction des émissions directes via l'internalisation des coûts externes dans le respect du principe du « pollueur-payeur ». Cela conduirait, ainsi, à accroître la valeur économique du gaz réfrigérant, ce qui, à son tour, pourrait amener les garagistes et démonteurs à récupérer davantage ce gaz. Toutefois, cette option n'apporte pas de garantie de réduction des émissions (incertitude quant à la réaction des opérateurs). C'est pourquoi, il nous semble que l'option de la redevance offre une plus grande efficacité dans la poursuite de cet objectif.

Dans le cadre du régime législatif en application en Région de Bruxelles-Capitale (voir arrêté du 15 avril 2004), la récupération du liquide réfrigérant a été rendue obligatoire par application de la directive européenne 2000/53/CE. Néanmoins, comme mentionné plus haut, les frais inhérents aux opérations de dépollution, de récupération et de stockage sont entièrement à charge des entreprises de dépollution et de démontage, ce qui constitue, dans un premier temps, un frein à la mise en œuvre de ces nouvelles pratiques. De plus ces dispositions réglementaires ne visent aucunement le principal responsable des coûts externes, c'est-à-dire l'utilisateur de l'air conditionné.

C'est pourquoi nous proposons comme solution plus économiquement et environnementalement équitable, l'introduction d'une redevance de type « Récupel » à charge du consommateur lors de l'achat d'un système d'air conditionné automobile permettant ainsi d'alimenter un fond destiné à financer les infrastructures et l'équipement nécessaires aux entreprises de dépollution et de démontage et ainsi les soutenir dans leur effort environnemental.

Cette option permettrait, d'une part, d'internaliser les coûts externes et, d'autre part, de financer la filière de récupération/destruction du HFC 134a tout en diminuant les émissions de GES issues des systèmes d'air conditionné au niveau de la Région de Bruxelles-Capitale.

En dernier lieu, le passage à un scénario de fuites optimiste, caractérisé par un confinement des fuites de gaz réfrigérant sur toute la durée de vie et la récupération en fin de vie, entraîne une baisse des coûts totaux de l'ordre de 1 % à 3 %. Dans ce scénario, cette baisse concerne uniquement les coûts externes. En effet, bien que les coûts d'entretien, suite au passage vers le scénario optimiste des fuites, se réduisent sur la durée de vie du système grâce à une baisse des fuites (et donc baisse du nombre de recharges nécessaires), ils restent globalement identiques au scénario de référence car sur la période des cinq premières années le nombre de recharges est identique pour les deux scénarios envisagés (pessimiste et optimiste).

D. Scénario d'utilisation normale (7 années avec 15.000 km/an)

Pour déterminer les coûts annuels résultant d'une utilisation du véhicule équipé d'un système d'air conditionné sur 7 années à concurrence de 15.000 km parcourus par année, nous avons retenu les hypothèses suivantes :

1. Durée d'utilisation annuelle

Ce scénario correspond aux données de références soit un kilométrage moyen annuel de 15.000 avec une utilisation annuelle moyenne de l'air conditionné de 100 heures. Avec une vitesse annuelle moyenne de 40,7 km/h, cela correspond à un fonctionnement de l'air conditionné à concurrence de 27% de la durée totale de roulage sur toute l'année. Ces 100 heures sont réparties de façon égale entre les cycles urbain et extra-urbain.

2. L'entretien

Le scénario pessimiste des émissions directes ne prévoit qu'une seule recharge de gaz sur les sept premières années. Le changement du filtre à air et la désinfection du système sont prévus chaque année et le dessiccateur est remplacé tous les deux ans.

Les résultats de nos calculs pour ce scénario d'utilisation (7 ans et 15.000 km/an) sont repris dans le tableau ci-dessous.

	Petite urbaine		Voiture moyenne		Grande voiture		4x4	
	Yaris	Lupo	Astra	Golf	Xsara Picasso	Mercedes Brea	XC90	X 3.0 D
Version	1000 Wti	E 1.4 1 60 cv	1.6 16 V Com	1.9 Tdi 77 Comfortlin	2,0l 16 V	E220 CDI	2,5T	3,0D
Charge nominale	450g	570g	700g	750g	700g	950g	900g	450g
Coûts d'achat								
Origine*	1.150 €	1.244 €	1.160 €	non déterminable	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Coûts fixes				non déterminable	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Capital immobilisé	5 €	5 €	5 €	non déterminable	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Dépréciation	164 €	178 €	166 €	non déterminable	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Entretien	71,62	88,66	94,59		81,46	85,14	92,64	122,80
Réparation								
Coûts de surconsommation	50,74 €	55,74 €	62,27 €		53,63 €	78,10 €	69,01 €	102,81 €
COÛTS DIRECTS TOTAUX/an	291 €	327 €	327 €		135 €	163 €	162 €	226 €
Coûts externes								
Emissions directes	5,39	6,81	8,35		7,45	8,35	9,43	10,72
Surémissions liées à surconsommation	0,096	0,145	0,335		8,916	0,254	17,860	0,232
Emissions production et acheminement	2,249	2,478	2,770		2,250	3,335	2,895	4,570
COÛTS EXTERNES TOTAUX/an	7,73 €	9,43 €	11,46 €		18,62 €	11,94 €	30,18 €	15,52 €
COÛTS ANNUELS TOTAUX	299,14 €	336,70 €	338,84 €		153,71 €	175,18 €	191,83 €	241,13 €
COÛTS ANNUELS AU KM (en €/km)	0,02 €	0,02 €	0,02 €		0,01 €	0,01 €	0,01 €	0,02 €

Tableau 48 : Coûts annuels totaux pour le scénario d'utilisation de la voiture sur 7 ans avec 15.000 km parcourus/an

Les coûts totaux annuels découlant de ce scénario d'utilisation s'étendent entre 154 € et 339 €, soit un coût au kilomètre se situant entre 0,01 € et 0,02 €. Le haut de cet intervalle comprend les voitures ayant un prix d'achat identifiable alors que le bas de cet intervalle couvre uniquement les coûts liés à l'entretien et à la surconsommation. Comme pour le scénario précédent les coûts externes sont relativement faibles par rapport aux coûts directs entièrement supportés par le consommateur.

Par rapport au scénario précédent les coûts totaux annuels sont moindres. En effet, en ce qui concerne les coûts directs, l'amortissement du prix d'achat de même que l'étalement des frais d'entretien se font sur une durée plus longue. Par ailleurs, les coûts de surconsommation diminuent suite à un abaissement du kilométrage annuel.

Les mêmes remarques sont valables pour expliquer la diminution des coûts externes. Ainsi, les émissions directes totales sur la durée de vie sont réparties sur une durée plus importante et la diminution du kilométrage annuel (baisse du carburant surconsommé) engendre une baisse du coût des émissions indirectes (surémissions + émissions à la production et à l'acheminement).

L'analyse de sensibilité sur ce scénario de référence donne les résultats suivants :

	Petite urbaine		Voiture moyenne		Grande voiture		4x4		
	Yaris	Lupo	Astra	Golf	Xsara Picasso	Mercedes Bre	XC90	X 3 0 D	
Version	1000 Whi	E 1,4 1 60 cv	1,6 16 V Comfo	1,9 Tdi 77 C	2,0 16 V	E220 CDI	2,5T	3,0D	
Charge nominale	450g	570g	700g	750g	700g	950g	900g	450g	
Scénario de référence	Coûts hors coûts externes	291 €	327 €	327 €	135 €	163 €	162 €	226 €	220 €
	Coûts totaux	299,14 €	336,70 €	338,84 €	153,71 €	175,18 €	191,83 €	241,13 €	258,39 €
Prix d'achat 1€	Rapport au scénario de référence	-56%	-54%	-50%	0%	0%	0%	0%	0%
	Coûts hors coûts externes	123 €	145 €	157 €	135 €	163 €	162 €	226 €	220 €
	Coûts totaux	130,24 €	153,98 €	168,47 €	153,71 €	175,18 €	191,83 €	241,13 €	258,39 €
Taxe 13,5€/kg	Rapport au scénario de référence	1%	1%	1%	3%	2%	3%	2%	3%
	Coûts hors coûts externes	294 €	331 €	331 €	139 €	167 €	167 €	231 €	229 €
	Coûts totaux	301,77 €	340,03 €	342,93 €	158,09 €	179,27 €	197,38 €	246,39 €	267,24 €
Taxe 31€/kg	Rapport au scénario de référence	2%	2%	3%	7%	5%	7%	5%	5%
	Coûts hors coûts externes	374 €	419 €	416 €	156 €	190 €	188 €	262 €	256 €
	Coûts totaux	382,68 €	429,04 €	429,08 €	178,90 €	203,21 €	226,66 €	279,51 €	305,87 €
Redevance 21€	Rapport au scénario de référence	1%	1%	1%	2%	2%	2%	1%	1%
	Coûts hors coûts externes	294 €	330 €	330 €	138 €	166 €	165 €	229 €	223 €
	Coûts totaux	302,23 €	339,79 €	341,93 €	156,79 €	178,27 €	194,92 €	244,22 €	261,48 €
Redevance 50€	Rapport au scénario de référence	2%	2%	2%	5%	4%	4%	3%	3%
	Coûts hors coûts externes	299 €	335 €	335 €	142 €	171 €	169 €	233 €	228 €
	Coûts totaux	306,49 €	344,05 €	346,19 €	161,06 €	182,53 €	199,18 €	248,48 €	265,74 €
Hausse du prix du carburant +10%	Rapport au scénario de référence	2%	2%	2%	3%	4%	4%	4%	4%
	Coûts hors coûts externes	296 €	333 €	334 €	140 €	171 €	169 €	236 €	230 €
	Coûts totaux	304,22 €	342,28 €	345,07 €	159,07 €	182,99 €	198,73 €	251,41 €	268,26 €
Hausse du prix du carburant +20%	Rapport au scénario de référence	3%	3%	4%	7%	9%	7%	8%	8%
	Coûts hors coûts externes	302 €	338 €	340 €	146 €	179 €	175 €	246 €	240 €
	Coûts totaux	309,29 €	347,85 €	351,29 €	164,43 €	190,80 €	205,63 €	261,69 €	278,13 €
Utilisation moyenne annuelle 150 heures	Rapport au scénario de référence	9%	9%	10%	21%	23%	23%	22%	26%
	Coûts hors coûts externes	317 €	355 €	359 €	162 €	202 €	196 €	277 €	270 €
	Coûts totaux	325,69 €	365,88 €	371,53 €	186,11 €	216,02 €	236,71 €	294,93 €	324,55 €
Utilisation moyenne annuelle 200 heures	Rapport au scénario de référence	18%	17%	19%	42%	47%	47%	45%	51%
	Coûts hors coûts externes	342 €	383 €	390 €	189 €	241 €	231 €	328 €	319 €
	Coûts totaux	352,23 €	395,07 €	404,22 €	218,50 €	256,87 €	281,59 €	348,74 €	390,71 €
Scénario des pertes de fluides optimiste	Rapport au scénario de référence	-5%	-4%	-5%	-9%	-8%	-8%	-7%	-3%
	Coûts hors coûts externes	281 €	317 €	317 €	125 €	153 €	151 €	215 €	216 €
	Coûts totaux	285,39 €	322,30 €	323,53 €	139,37 €	159,87 €	176,44 €	224,42 €	251,85 €

Tableau 49 : Résultats de l'analyse de sensibilité pour le scénario 7 ans d'utilisation avec 15.000 km parcourus/an

Comme pour le scénario précédent (5 années avec 20.000 km/an) les hypothèses ayant l'impact le plus conséquent sur les coûts totaux sont la diminution du prix d'achat du système d'air conditionné à 1€, la hausse du prix du carburant et l'augmentation de l'utilisation moyenne annuelle.

Ainsi, une baisse du prix d'achat à un 1 € symbolique engendre une diminution des coûts totaux de l'ordre de 50 % à 56 %, ce qui constitue un argument de vente très efficace pour persuader le consommateur.

Une hausse du prix du carburant de 10 %, ce qui revient à payer 1,26 € par litre d'essence et 0,97 € par litre de diesel, conduit à une augmentation de 2 % à 4 % des coûts totaux.

Un accroissement de l'ordre de 20 % du prix du carburant, équivalent à un prix de 1,37 € par litre d'essence et 0,89 € par litre de diesel, mène à une élévation des coûts totaux entre de 3 % et 9 %.

Une augmentation de 50 % de la durée annuelle d'utilisation de l'air conditionné provoque une hausse des coûts totaux de l'ordre de 9 % à 26 %.

Le doublement de la durée annuelle d'utilisation engendre une élévation de l'ordre de 18 % à 51 % des coûts totaux. Notons que cette hausse se répercute essentiellement dans les coûts directs, au niveau des coûts liés à la surconsommation.

En ce qui concerne, l'imposition d'une taxe sur le HFC134a ou l'application d'une redevance à l'achat du système, les remarques relatives au scénario précédent restent valables. A nos yeux, la redevance reste l'instrument le plus efficace dans la perspective d'une internalisation des coûts externes et la diminution des GES au niveau de la Région de Bruxelles-Capitale.

Dans ce scénario d'utilisation l'application d'une redevance, de 21 € ou 50 €, engendre une hausse des coûts totaux allant respectivement de 1 % à 5 %, répercutée exclusivement dans les coûts directs (coûts privés).

Enfin le passage à un scénario de fuites optimiste, caractérisé par un confinement des fuites de fluide réfrigérant sur toute la durée de vie du véhicule/du système et la récupération en fin de vie, entraîne une baisse des coûts totaux de l'ordre de 3% à 9 %. Cette baisse concerne aussi bien les coûts directs (entretien, coûts privés) que les coûts externes. Ce scénario de fuites optimiste correspond partiellement à l'introduction d'une redevance finançant la récupération du fluide en fin de vie.

Si l'on considère la différence entre la hausse des coûts directs induite par l'application d'une redevance de 50 € et la baisse des coûts directs et externes suite au passage à un scénario de fuite optimiste, on voit que la redevance conduit à réaliser un gain social net compris de 1 % à 5 % des coûts totaux du scénario de base.

E. Scénario d'utilisation faible (10 années avec 10.000 km/an)

Pour déterminer les coûts annuels résultant d'une utilisation sur 10 années à concurrence de 10.000 km parcourus par an, nous avons retenu les hypothèses suivantes :

1. Durée d'utilisation annuelle

Si l'on considère que 27 % de la durée annuelle de roulage est effectuée avec l'air conditionné activé, dans le cas d'un kilométrage annuel moyen de 10.000 km et d'une vitesse annuelle moyenne de 40,7 km/h, cela donne 66 heures de fonctionnement réparties à concurrence de 33 heures en cycle urbain et 33 heures en cycle extra-urbain.

2. L'entretien

Le scénario pessimiste des émissions directes prévoit deux recharges de gaz sur les sept premières années. Le changement du filtre à air et la désinfection du système sont prévus chaque année et le dessiccateur est remplacé tous les deux ans (soit 5 fois pour ce scénario).

Les résultats de nos calculs pour ce scénario d'utilisation (10 ans et 10.000 km/an) sont repris dans le tableau ci-après.

Coûts financiers directs et indirects engendrés par l'installation de systèmes d'air climatisé dans les voitures particulières – Rapport final

	Petite urbaine		Voiture moyenne		Grande voiture		4x4	
	Yaris	Lupo	Astra	Golf	Xsara Picasso	Mercedes Bre	XC90	X 3.0 D
Version	1000 Wti	E 1,4 160 cv	1,6 16 V Com	1,9 Tdi 77 Comfortlin	2,0l 16 V	E220 CDI	2,5T	3,0D
Charge nominale	450g	570g	700g	750g	700g	950g	900g	450g
Coûts d'achat								
Origine*	1.150 €	1.244 €	1.160 €	non déterminable	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Coûts directs								
Capital immobilisé	4 €	4 €	4 €	non déterminable	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Dépréciation	115 €	124 €	116 €	non déterminable	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Entretien	75,25	92,29	101,2	83,89	91,18	98,68	130,98	135,98
Réparation	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Coûts de surconsommation	33,83 €	37,16 €	41,52 €	35,75 €	52,06 €	46,00 €	68,54 €	65,82 €
COÛTS DIRECTS TOTAUX/an	228 €	258 €	262 €	120 €	143 €	145 €	200 €	202 €
Coûts externes								
Emissions directes	4,10301 €	5,22218 €	6,37065 €	6,63075 €	6,19115 €	8,38919 €	8,18037 €	3,99311 €
Surémissions liées à surconsommation	0,064	0,097	0,224	5,944	0,169	11,907	0,155	19,636
Emissions production et acheminement	1,499	2,055	2,291	1,938	2,693	2,477	3,795	3,577
COÛTS EXTERNES TOTAUX/an	5,67 €	7,37 €	8,88 €	14,51 €	9,05 €	22,77 €	12,13 €	27,21 €
COÛTS ANNUELS TOTAUX	233,33 €	265,11 €	271,22 €	134,16 €	152,30 €	167,46 €	211,65 €	229,00 €
COÛTS ANNUELS AU KM (en €/km)	0,02 €	0,03 €	0,03 €	0,01 €	0,02 €	0,02 €	0,02 €	0,02 €

Tableau 50: Coûts annuels totaux pour le scénario d'utilisation de la voiture sur 10 ans avec 10.000 km parcourus/an

Les coûts totaux annuels découlant de ce scénario d'utilisation du véhicule s'étendent entre 134 € et 265 €, soit un coût au kilomètre se situant entre 0,01 € et 0,03 €. Le haut de cet intervalle comprend les voitures ayant un prix d'achat du système d'air conditionné identifiable, alors que le bas de cet intervalle couvre uniquement les coûts liés à l'entretien et à la surconsommation du système. Comme pour les deux scénarios précédents, les coûts externes sont relativement minimes par rapport aux coûts directs entièrement supportés par le consommateur.

La comparaison avec les deux scénarios précédents indique que les coûts totaux annuels de ce dernier scénario sont les plus faibles. En effet, en ce qui concerne les coûts directs, l'amortissement du prix d'achat de même que l'étalement des frais d'entretien (qui augmentent de façon moins que proportionnelle à la durée de vie) se fait sur une durée plus longue. Par ailleurs, les coûts de surconsommation diminuent suite à un abaissement du kilométrage annuel.

Ces mêmes arguments sont valables pour expliquer la diminution des coûts externes. Ainsi, les émissions directes totales, sur la durée de vie, sont réparties sur une durée plus importante et la diminution du kilométrage annuel (baisse du carburant surconsommé) engendre une baisse du coût des émissions indirectes (surémissions + émissions à la production et à l'acheminement).

L'analyse de sensibilité sur ce dernier scénario de référence donne les résultats suivants :

Version	Petite urbaine		Voiture moyenne		Grande voiture		4x4		
	Yaris 1000 Wti 450g	Lupo E 1,4 160 cv 570g	Astra 1,6 16 V Comto 700g	Golf 1,9 Tdi 77 C 750g	Xsara Picasso 2,0i 16 V 700g	Mercedes Bre E220 CDI 950g	XC90 2,5T 900g	X 3.0 D 3,0D 450g	
Scénario de référence	Coûts hors coûts externes	228 €	258 €	262 €	120 €	143 €	145 €	200 €	202 €
	Coûts totaux	233,33 €	265,11 €	271,21 €	134,16 €	152,30 €	167,46 €	211,65 €	229,00 €
Prix d'achat 1€	Rapport au scénario de référence	-51%	-48%	-44%	0%	0%	0%	0%	0%
	Coûts hors coûts externes	109 €	130 €	143 €	120 €	143 €	145 €	200 €	202 €
	Coûts totaux	115 €	137 €	152 €	134 €	152 €	167 €	212 €	229 €
Taxe 13,5€/kg	Rapport au scénario de référence	1%	1%	1%	3%	3%	3%	2%	1%
	Coûts hors coûts externes	230 €	261 €	266 €	124 €	147 €	150 €	204 €	204 €
	Coûts totaux	236 €	268 €	275 €	138 €	156 €	173 €	217 €	231 €
Taxe 31€/kg	Rapport au scénario de référence	2%	3%	3%	7%	6%	7%	5%	2%
	Coûts hors coûts externes	233 €	265 €	271 €	129 €	152 €	157 €	211 €	207 €
	Coûts totaux	239 €	272 €	280 €	144 €	161 €	179 €	223 €	235 €
Redevance 21€	Rapport au scénario de référence	1%	1%	1%	2%	1%	1%	1%	1%
	Coûts hors coûts externes	230 €	260 €	265 €	122 €	145 €	147 €	202 €	204 €
	Coûts totaux	236 €	267 €	273 €	136 €	154 €	170 €	214 €	231 €
Redevance 50€	Rapport au scénario de référence	2%	2%	2%	4%	3%	3%	2%	2%
	Coûts hors coûts externes	233 €	263 €	267 €	125 €	148 €	150 €	205 €	207 €
	Coûts totaux	238 €	270 €	276 €	139 €	157 €	173 €	217 €	234 €
Hausse du prix du carburant +10%	Rapport au scénario de référence	1%	1%	2%	3%	3%	3%	3%	3%
	Coûts hors coûts externes	231 €	261 €	266 €	123 €	148 €	149 €	206 €	208 €
	Coûts totaux	237 €	269 €	275 €	138 €	158 €	172 €	219 €	236 €
Hausse du prix du carburant +20%	Rapport au scénario de référence	3%	3%	3%	5%	7%	5%	6%	6%
	Coûts hors coûts externes	234 €	265 €	271 €	127 €	154 €	154 €	213 €	215 €
	Coûts totaux	240 €	273 €	280 €	141 €	163 €	177 €	225 €	242 €
Utilisation moyenne annuelle 150 heures	Rapport au scénario de référence	8%	7%	8%	16%	18%	18%	17%	19%
	Coûts hors coûts externes	245 €	276 €	283 €	138 €	169 €	168 €	234 €	235 €
	Coûts totaux	251 €	284 €	293 €	155 €	179 €	197 €	247 €	272 €
Utilisation moyenne annuelle 200 heures	Rapport au scénario de référence	15%	15%	16%	32%	35%	35%	34%	38%
	Coûts hors coûts externes	261 €	295 €	304 €	155 €	195 €	191 €	268 €	268 €
	Coûts totaux	269 €	304 €	314 €	177 €	206 €	227 €	283 €	316 €
Scénario des pertes de fluides optimiste	Rapport au scénario de référence	-4%	-4%	-4%	-8%	-7%	-7%	-6%	-4%
	Coûts hors coûts externes	220 €	250 €	255 €	112 €	136 €	137 €	192 €	195 €
	Coûts totaux	224 €	255 €	261 €	124 €	142 €	156 €	199 €	219 €

Tableau 51 : Résultats de l'analyse de sensibilité pour le scénario 10 ans d'utilisation avec 10.000 km parcourus/an

De même que pour les deux scénarios précédents, les hypothèses ayant un impact significatif sur les coûts totaux sont la diminution du prix d'achat du système d'air conditionné à 1€, la hausse du prix du carburant et l'augmentation de l'utilisation moyenne annuelle de l'air conditionné.

Ainsi, une baisse du prix d'achat du système à un 1 € symbolique engendre une diminution des coûts totaux de l'ordre de 44 % à 51 %.

Une hausse du prix du carburant de 10 %, ce qui revient à payer 1,26 € par litre d'essence et 0,97 € par litre de diesel, conduit à une augmentation de 1 % à 3 % des coûts totaux.

Un accroissement de l'ordre de 20 % du prix du carburant, équivalent à un prix de 1,37€ par litre d'essence et 0,89 € par litre de diesel, mène à une élévation des coûts totaux entre 3% et 7 %.

Une augmentation de la durée d'utilisation annuelle du système d'air climatisé de 50 % provoque une hausse des coûts totaux de l'ordre de 7 % à 19 %.

Le doublement de la durée annuelle d'utilisation engendre une élévation de l'ordre de 15 % à 38 % des coûts totaux. Notons que cette hausse se répercute essentiellement dans les coûts directs, au niveau des coûts liés à la surconsommation.

En ce qui concerne l'imposition d'une taxe sur le HFC 134a ou l'application d'une redevance à l'achat du système, les remarques relatives aux scénarios précédents restent valables. A nos yeux, la redevance reste l'instrument le plus efficace dans la perspective d'internalisation des coûts externes et de la diminution des GES au niveau de la Région de Bruxelles-Capitale.

Dans ce scénario d'utilisation, l'application d'une redevance de 1 € ou 50 € engendre une hausse des coûts totaux allant respectivement de 1 % à 4 %, répercutée exclusivement dans les coûts directs (coûts privés).

Comme pour le scénario précédent, nous considérons que l'introduction d'une telle redevance pourrait conduire à un gain net social.

Enfin, le passage à un scénario de fuites optimiste, caractérisé par un confinement des fuites de gaz réfrigérant sur toute la durée de vie du véhicule/du système et la récupération en fin de vie, entraîne une baisse des coûts totaux de l'ordre de 4 % à 8 %. Cette diminution porte autant sur les coûts directs (entretien, coûts privés) que sur les coûts externes.

Pour terminer cette partie nous tenons à insister plus particulièrement sur le cas des voitures tout terrain ou 4x4.

Comme mentionné antérieurement, ce type de voiture est de plus en plus à la mode et envahit les centres urbains, malgré sa conception initiale pour les grands espaces.

L'engouement pour ce type de voiture s'explique par le sentiment de liberté et de sécurité qu'il confère à ses conducteurs et passagers de même que par le statut social empreint d'une certaine aisance financière (voitures très énergivores) auquel elle est associée. Or, les conséquences de la circulation de ce type de véhicule dans le milieu urbain sont particulièrement néfastes en termes de sécurité des usagers faibles (piétons, cyclistes) et en termes de qualité de l'air.

De plus, en ce qui concerne les coûts privés directs, les consommations moyennes importantes de ces voitures conduisent à un coût d'utilisation au kilomètre fort élevé qui, avec le fonctionnement de l'air conditionné, se voit davantage renforcé.

Afin de réduire certains coûts, il semble que de nombreux propriétaires de 4x4 fassent passer leur voiture comme un véhicule utilitaire pour évincer la taxe de mise en circulation. Néanmoins, les frais liés à la forte consommation de ces véhicules de même que les surcoûts liés à la climatisation subsistent et il serait dès lors, intéressant de calculer la différence entre l'économie d'impôt réalisée par ce subterfuge et le surcoût de consommation de ces véhicules lié notamment au fonctionnement du système d'air climatisé.

Dans le cadre d'une campagne de sensibilisation, il serait pertinent d'essayer d'atteindre le public au moyen de ces deux arguments.

Pour terminer ce chapitre nous allons présenter synthétiquement les principaux résultats issus de notre analyse.

F. Synthèse et conclusions

Dans ce chapitre, l'ensemble des coûts liés à l'utilisation d'un système d'air conditionné dans un véhicule a été répertorié. Il s'agit d'une part des coûts directs endossés par l'utilisateur du système (achat du système, coût d'opportunité de l'investissement, coûts des entretiens, etc.) et, d'autre part, des coûts externes engendrés par les fuites de fluide réfrigérant à diverses étapes de sa production, de son utilisation et de la fin de vie du système d'air conditionné (émissions directes), par les surémissions dues au fonctionnement de l'air conditionné (émissions « tank-to-wheel ») et par la surconsommation de carburant provoquée par ce fonctionnement (émissions « well-to-tank »).

Trois scénarios d'utilisation ont été développés afin de représenter trois profils typiques d'utilisateur d'un véhicule muni d'un système d'air conditionné : utilisation intense, normale et faible. Le tableau ci-dessous reprend, de manière plus détaillée, les principales hypothèses déterminant les trois scénarios envisagés.

Scénario d'utilisation du véhicule	Kilométrage annuel moyen	Durée d'utilisation envisagée	Durée de vie totale du véhicule	Utilisation de l'air conditionné (50% en cycle urbain et 50% en cycle extra-urbain)
Intense	20.000 km/an	5 ans	Diesel : 200.000 km Essence : 150.000 km	27% du temps d'utilisation du véhicule
Normale	15.000 km/a	7 ans	Diesel : 200.000 km Essence : 150.000 km	27% du temps d'utilisation du véhicule
Faible	10.000 km/an	10 ans	Diesel : 200.000 km Essence : 150.000 km	27% du temps d'utilisation du véhicule

Tableau 52: Hypothèses des scénarios de référence

Suite à l'analyse des coûts, il ressort que les systèmes d'air conditionné peuvent nécessiter un budget annuel atteignant jusqu'à 265-420 €/an si le système a été acheté en option.

La part des coûts externes dans ce total est relativement faible, de sorte que la plus grande part des dépenses est supportée par l'utilisateur. Toutefois, les coûts externes additionnés d'un parc de véhicules peuvent rapidement atteindre des sommes importantes qui devront être prises en charge d'une manière ou d'une autre par la société dans son ensemble.

Une étude de sensibilité a permis d'identifier les paramètres essentiels dans la détermination du montant des coûts totaux liés à l'utilisation d'un système d'air conditionné dans un véhicule. Le tableau ci-dessous illustre les diverses hypothèses qui ont été testées.

Hypothèse(s) testée(s)			Justification
Prix d'achat de l'airco ramené à 1€			Voir pratique marketing et généralisation de l'airco de série
Introduction d'une taxe sur le fluide réfrigérant	13,5 €/litre	31 €/litre	Voir expériences danoise et norvégienne
Introduction redevance type Récupel sur le système airco	21 €	50 €	Voir expérience japonaise
Hausse prix du carburant	+ 10%	+ 20%	Importance dans la détermination du coût pour l'utilisateur
Intensification de l'utilisation de l'airco	41% de la durée d'utilisation du véhicule	54% de la durée d'utilisation du véhicule	Importance dans la détermination du coût pour l'utilisateur et des impacts environnementaux adjacents

Tableau 53: Hypothèses de l'analyse de sensibilité

Parmi les paramètres essentiels figurent le prix du carburant, le degré d'utilisation de l'air conditionné et le prix d'achat du système.

Toutefois, même si ce dernier est ramené à 1 € symbolique par une campagne de marketing ou suite à l'achat d'un véhicule équipé de série, la facture annuelle pour le consommateur est loin d'être négligeable : 115-250 €/an.

Elle s'alourdira d'autant plus que le prix du carburant et que le degré d'utilisation du système se renforceront.

Ensuite, les coûts externes s'accroissent principalement dans le cas d'une utilisation plus intense du système d'air conditionné (cf. émissions « well-to-tank » et « tank-to-wheel ») et

plus particulièrement dans le cas des véhicules diesel (cf. surémission de particules très importante).

Enfin, l'analyse de sensibilité a montré également que l'introduction d'une taxe, sur le fluide réfrigérant ou d'une redevance de type Récupel sur le système, ne grèverait pas significativement le budget du consommateur et participerait à une démarche d'internalisation des coûts externes. Par ailleurs, une redevance de type Récupel permettrait non seulement d'aider les professionnels du secteur à respecter la mise en œuvre de l'arrêté du 15/04/2004 sur la récupération des fluides dans les véhicules en fin de vie, mais aussi de réduire de manière importante les émissions directes de fluide réfrigérant et les coûts externes adjacents à ces émissions.

De l'analyse qui précède, il ressort nettement que l'équipement et le fonctionnement de l'air conditionné automobile constitue un coût relativement important sur le budget du consommateur. Même dans l'hypothèse d'une annulation du prix d'équipement, les coûts variables liés à l'entretien et à la surconsommation restent conséquents.

Les trois scénarios de référence, ainsi que l'analyse de sensibilité, ont permis de mettre clairement en évidence que le coût direct total de l'air conditionné automobile est relié à l'utilisation qui en est faite et à la consommation moyenne initiale du véhicule.

Ainsi, les coûts annuels totaux sont plus importants pour une utilisation courte et intensive d'un véhicule que pour une période plus longue avec un kilométrage annuel plus réduit.

En ce qui concerne la consommation moyenne, il importe, dans le cadre d'une campagne de sensibilisation, de conseiller au consommateur d'y être particulièrement attentif lors de l'achat du véhicule et d'insister sur les avantages financiers découlant d'une voiture moins énergivore en termes de roulage et en termes de fonctionnement de l'air conditionné.

Sur l'ensemble des scénarios, les coûts externes totaux sont relativement faibles. Les expériences déjà entreprises à l'étranger (Japon, Danemark, Norvège) indiquent qu'il est relativement aisé de les internaliser via une taxe ou une redevance.

Dans la double optique d'internalisation des coûts externes et de diminution des émissions directes de HFC 134a, il semble que la redevance constitue l'instrument le plus adéquat de par sa plus grande efficacité ainsi que par la solution plus équitable qu'elle offre sur les plans économique et environnemental.

Après avoir étudié les aspects techniques, les effets négatifs sur la santé et l'environnement ainsi que les coûts financiers relatifs aux systèmes d'air conditionné automobile, nous allons terminer cette étude par les conclusions et recommandations qui découlent des principaux résultats de notre analyse.

XV. Conclusions

Les différents aspects de l'air conditionné automobile traités dans cette étude ont mené aux conclusions suivantes.

Les principaux avantages offerts par l'air conditionné automobile se situent essentiellement au niveau du confort de conduite et d'une plus grande sécurité routière.

Mais face à ces quelques avantages, l'équipement présente également des inconvénients en termes sanitaires, entraîne des coûts financiers non négligeables pour le consommateur et porte atteinte à l'environnement en termes d'émission de gaz à effet de serre et de qualité de l'air.

Les fluides réfrigérants actuels n'ont pas d'impact sur la couche d'ozone contrairement aux fluides utilisés dans le passé comme les HFC. Néanmoins, ils présentent un effet nettement plus marqué en terme de changement climatique.

Dans ce sens, l'adoption de fluides réfrigérants alternatifs (ex : R-744 et hydrocarbures), permettrait d'atteindre une forte réduction des impacts dus aux émissions directes. Ces alternatives conduiraient cependant à un accroissement des émissions indirectes, mais dans l'ensemble l'effet global resterait positif.

Pour ce faire, des systèmes d'air conditionné plus complexes sont nécessaires (entre autres par la nécessité d'avoir un double circuit de refroidissement), ce qui influence également le prix d'achat.

En ce qui concerne les émissions directes de gaz réfrigérants, les fuites normales s'échappant tout au long de la phase d'utilisation du système d'air conditionné (34,1 %), de même que les émissions lors des entretiens (16,1 %), représentent la majorité des émissions directes (voir figure ci-dessous).

Afin d'obtenir une réduction des émissions durant les phases de maintenance et de fin de vie, il est nécessaire d'édicter des directives claires, d'organiser une formation obligatoire du personnel en charge de l'entretien ou du traitement en fin de vie, ainsi que de mettre en place un système de contrôle structuré de la mise en application des directives.

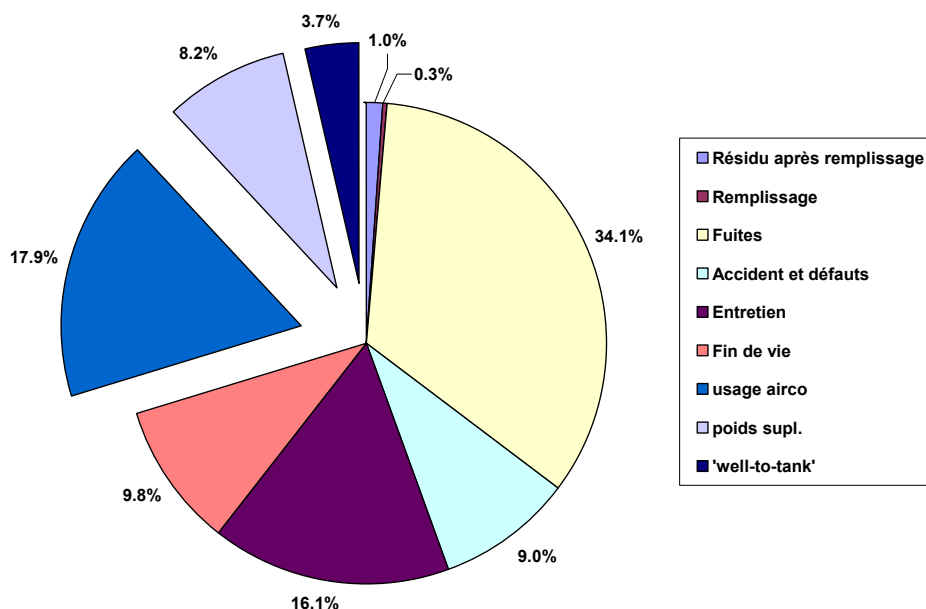


Figure 18 : Répartition du TEWI et du « well-to-wheel »

Les émissions indirectes dues au fonctionnement de l'air conditionné automobile regroupent la surconsommation, les surémissions liées à la surconsommation ainsi que les émissions « well-to-tank » (production et acheminement du carburant surconsommé).

La surconsommation induite par le fonctionnement de l'air conditionné est importante (17,8 %) mais fortement dépendante des conditions climatiques, du cycle parcouru (urbain, extra-urbain) et du type de véhicule (diesel, essence). Par exemple, la surconsommation dans un contexte urbain varie entre 12 % et 43 %, selon le type de motorisation et le type de cycle parcouru (vitesses, accélérations, etc.).

Les émissions adjacentes (CO, hydrocarbures et NO_x) à la surconsommation et leurs impacts sont également significatifs, principalement dans un environnement urbain, et sont encore plus différenciés selon que le véhicule roule au diesel ou à l'essence.

La surconsommation due au surpoids de l'installation d'air conditionné est limitée (8,2 %) mais non négligeable étant donné qu'elle est présente en continu lors de l'utilisation du véhicule.

Les émissions « well-to-tank » liées à la production et à l'acheminement du carburant surconsommé pour faire fonctionner l'air conditionné ne sont pas négligeables (3,7%) mais sont rarement prises en compte.

Des résultats issus de l'étude de cas réalisée pour la Région de Bruxelles-Capitale, où la surconsommation a été calculée annuellement en fonction des variations climatiques enregistrées à Bruxelles, il ressort que le véhicule consomme en moyenne de 2 % à 3,5 % de carburant en plus avec un système d'air conditionné au R-134a.

Les systèmes intelligents et l'adoption de compresseur muni d'un contrôle externe qui tient compte de la gestion du moteur et de ses conditions de fonctionnement peuvent limiter cette surconsommation et les surémissions adjacentes. L'adoption d'un compresseur à

motorisation électrique pourrait réduire l'influence de l'utilisation de l'air conditionné sur les conditions de fonctionnement du moteur.

Il ressort également de la présente étude, que l'air conditionné automobile génère un impact négatif sur la santé humaine, de manière soit directe, soit indirecte.

Les **effets directs sanitaires** dus à l'air conditionné automobile ont été très peu étudiés jusqu'à présent, néanmoins nous sommes parvenus à identifier trois sources de pathologies : la **biocontamination** du système d'aération, les pathologies générées par les **chocs thermiques** et le **risque d'exposition** au liquide réfrigérant. Notons que l'occurrence de ce dernier est minime. Les pathologies associées aux deux premières sources se caractérisent principalement par des réactions allergiques, des maladies respiratoires ainsi que des symptômes de refroidissement.

Les **effets sanitaires néfastes indirects** sont causés par la surconsommation du moteur induite par le fonctionnement de la boucle de froid. Cette surconsommation génère une surémission de polluants (CO, CO₂, SO₂, NO_x, HC, COV, O₃) dans l'atmosphère qui dégrade la qualité de l'air accroissant ainsi les pathologies liées à la pollution atmosphérique. Pour les voitures diesel, on a noté une réduction des émissions de CO et de HC lors du fonctionnement du système, mais celle-ci n'est pas suffisante pour contrebalancer l'impact négatif de l'accroissement des autres émissions.

Les problèmes posés par les systèmes d'air conditionné sont d'autant plus importants que le taux d'équipement réel du parc automobile belge ne cesse de croître. Ainsi, pour l'année 2005, il est prévu que ce taux atteigne 48 % et selon une projection basée sur une hypothèse basse du taux d'équipement des véhicules neufs, ce même taux pourrait atteindre en Belgique les 80 % du parc à l'horizon 2020. Il faut ajouter à cela le fait que la marge de choix du consommateur lors de l'achat d'un véhicule s'amenuise de plus en plus. En effet, on observe depuis quelques années une progression continue du taux d'équipement de série des voitures neuves sur l'ensemble des modèles offerts.

Afin de mettre en évidence l'ensemble des coûts qui découlent de l'équipement et du fonctionnement de l'air conditionné automobile, nous avons entrepris une analyse détaillée des coûts financiers, portant sur les coûts directs fixes et variables ainsi que sur les coûts indirects (dans ce cas-ci il s'agit uniquement des coûts externes).

Les **coûts fixes** engendrés par l'achat d'un système d'air conditionné peuvent être répartis en deux catégories selon le moment où l'équipement d'air conditionné est monté sur le véhicule.

Le **prix d'achat** d'origine, correspondant au prix payé en option lors de l'achat d'un véhicule neuf, peut varier entre 283 € et 2.125 € selon le modèle de voiture et le mode de fonctionnement du système.

Les prix d'installation de deuxième monte, lorsque l'équipement est placé ultérieurement à l'achat du véhicule, sont nettement plus élevés et se situent entre 1.000 € et 3.025 €.

Le marché de la deuxième monte, essentiellement centré sur les voitures destinées à l'exportation dans les pays du Sud européen et d'Afrique du Nord, est voué à disparaître progressivement suite à la généralisation de l'équipement en série de l'air conditionné sur les nouveaux véhicules.

Les **coûts variables** couvrent les postes relatifs aux opérations d'**entretien** et à la **surconsommation**. Il faut, également, ajouter à ces coûts, les frais liés aux **réparations** des systèmes, mais, par manque de connaissance sur la fréquence et la gravité des pannes et

défectuosités inhérentes à ce type de système, nous ne sommes pas parvenus à les inclure dans la présente analyse.

L'entretien du système comprend diverses opérations, principalement le contrôle du niveau de gaz réfrigérant et sa recharge dans le système, le remplacement du dessiccateur, le changement du filtre à air et la désinfection du système.

Sur la Région Bruxelles-Capitale, nous avons identifié auprès des divers opérateurs une forte divergence entre les prix et les forfaits pour ce service, ainsi qu'au niveau de la maîtrise des connaissances nécessaires à la manipulation du circuit du froid.

Sur base des prix minima ressortis de notre enquête, nous avons estimé que le coût annuel lié à l'entretien peut varier entre 50 € et 135 € pour les voitures retenues dans l'analyse en fonction du type d'utilisation du véhicule.

Cet entretien régulier est nécessaire afin de maintenir l'efficacité de la boucle du froid, de prévenir certaines fuites dues à l'usure des flexibles et de garantir la qualité de l'air à l'intérieur de l'habitacle.

Par ailleurs, le fonctionnement de l'air conditionné induit une demande énergétique supplémentaire au moteur, générant ainsi une surconsommation de carburant. Dans le cadre des véhicules repris pour l'analyse des coûts, les voitures diesel présentent des taux de surconsommation nettement supérieurs⁴⁰ à ceux des voitures essence, mais la faiblesse du prix du carburant diesel parvient parfois à compenser cet écart au niveau des dépenses supportées par le consommateur. Ainsi pour une utilisation annuelle de 100 heures de l'air conditionné, les coûts de surconsommation pour les voitures sélectionnées dans le cadre de cette étude varient sur un cycle urbain entre 45 € et 101 € pour les voitures essence et entre 44 € et 80 € pour les véhicules diesel.

Les **coûts indirects** liés à l'air conditionné automobile représentent les **coûts externes** environnementaux et sanitaires répartis selon trois sources : **émissions directes** de gaz réfrigérant, émissions liées à la surconsommation de carburant (« **tank-to-wheel** ») et émissions liées à la production et à l'acheminement des carburants surconsommés (« **well-to-tank** »).

Les coûts sanitaires n'ont pu être monétarisés dans le cadre de ce travail. Les coûts externes dont il est fait mention ne concernent donc que les coûts environnementaux.

Dans l'ensemble, il ressort que les coûts externes annuels sont plus élevés pour les voitures diesel que pour celles à essence.

En effet, la fourchette des coûts externes annuels totaux pour les voitures essence se situe entre 7 € (urbain) et 14 € (extra-urbain) et pour celles alimentées au diesel entre 16 € (extra-urbain) et 47 € (urbain). Cet écart s'explique essentiellement par des coûts externes de surémissions beaucoup plus conséquents pour les voitures diesel suite à la surémission de particules. Les montants par véhicule sont relativement faibles mais à l'échelle d'un parc de véhicules tel que celui de la Région de Bruxelles-Capitale, on peut atteindre des sommes non négligeables à charge de la société (sur le plan local, national et dans des pays tiers).

Les expériences déjà entreprises à l'étranger (Japon, Danemark, Norvège) indiquent qu'il est relativement aisé d'internaliser ces coûts externes via une taxe ou une redevance.

Dans la double optique d'internalisation des coûts externes et de diminution des émissions directes de HFC 134a, il semble que la redevance constitue l'instrument le plus adéquat de

⁴⁰ Comme l'indiquent les résultats de la Vrije Universiteit Brussel, ces taux de surconsommation pour les différents type de motorisations peuvent varier en fonction de l'âge du véhicule, les conditions de son utilisation, le cycle de roulage et les conditions climatiques.

par sa plus grande efficacité (financement d'infrastructures, contrôle et suivi) ainsi que par la solution plus équitable qu'elle offre sur les plans économique et environnemental (principe du pollueur-payeur).

De ce qui précède, il ressort nettement que l'équipement et le fonctionnement de l'air conditionné automobile constitue un coût relativement important pour le budget du consommateur. Même dans l'hypothèse d'une annulation du prix d'achat de l'équipement (cf. promotion, de série, etc.), les coûts variables liés à l'entretien et à la surconsommation restent conséquents.

Les trois scénarios de référence, ainsi que l'analyse de sensibilité, ont permis de mettre clairement en évidence que le coût direct total de l'air conditionné automobile est relié à l'utilisation qui en est faite et à la consommation moyenne initiale du véhicule.

Ainsi, les coûts annuels totaux sont plus importants pour une utilisation courte et intensive d'un véhicule que sur une période plus longue avec une utilisation annuelle du véhicule et de l'air conditionné plus réduite.

En ce qui concerne la consommation moyenne, il importe, dans le cadre d'une campagne de sensibilisation, de conseiller au consommateur d'y être particulièrement attentif lors de l'achat du véhicule et d'insister sur les avantages financiers découlant d'une voiture moins énergivore en termes de roulage et en termes de fonctionnement de l'air conditionné.

XVI. Recommandations

Compte tenu des principaux enseignements de l'étude, il est permis de dégager des recommandations sur les mesures potentielles de réduction des émissions dues à l'utilisation de l'air conditionné automobile ainsi que des arguments prioritaires à aborder dans le cadre d'une campagne de sensibilisation.

Les mesures potentielles

Sur base des données bibliographiques, ainsi qu'à partir des calculs et des simulations effectués, plusieurs possibilités de réduction se distinguent.

- **Technologie : Un meilleur design du système d'air climatisé**

Par meilleur design, on entend une réduction des fuites directes de fluide réfrigérant grâce au recours à des systèmes plus hermétiques. Les compresseurs électriques sont très prometteurs de ce point de vue, étant donné que les fuites 'habituelles' sont la principale source de déperditions durant le cycle de vie d'un système d'air climatisé.

- **Technologie : Contrôle et réglage du système d'air conditionné**

Un meilleur contrôle ou réglage du système d'air climatisé se révèle également être un paramètre important. Les compresseurs à course variable combinés à un contrôle externe permettent de minimiser la surconsommation et d'améliorer le confort de conduite.

- **Maintenance : Entretien**

L'entretien est une source importante de fuites. Des consignes précises (ex : guides de bonnes pratiques), des outils adaptés ainsi qu'une meilleure formation et une plus grande sensibilisation des personnes responsables de l'entretien sont nécessaires afin de réduire les émissions. L'introduction de formations spécialisées, comme le propose la FEBIAC, peuvent être considérées comme un pas dans la bonne direction.

- **Innovation : Fluides réfrigérants alternatifs**

De même, l'utilisation de réfrigérants alternatifs est très prometteuse. Le système R-744 est intéressant grâce à son impact très faible sur l'effet de serre par rapport aux réfrigérants actuels.

- **Comportement : Etiquetage**

Les constructeurs automobiles doivent informer les clients des coûts et de la consommation supplémentaires engendrés par l'installation d'un système de climatisation dans leur véhicule.

- **Comportement : Utilisation plus rationnelle de l'air conditionné**

La manière dont le système d'air conditionné est utilisé a une influence primordiale sur la surconsommation et les surémissions. Il faut insister sur le fait que :

- l'utilisation de l'air conditionné doit absolument se faire avec les fenêtres fermées ;
- la ventilation de l'habitacle doit se faire avant d'enclencher l'air conditionné si la température est trop élevée (ex : quand la voiture est restée longtemps au soleil) ;
- l'utilisation de la recyclage de l'air est utile lorsque l'on désire refroidir rapidement l'habitacle ;
- le choix d'une voiture de couleur claire et l'adoption de vitres teintées permettent de réduire le recours à l'air conditionné.

- **Politique : Redevance de type Récupel**

L'introduction d'une redevance de type Récupel à l'achat d'un véhicule équipé d'un système d'air conditionné permettrait une meilleure garantie du respect de la mise en œuvre de l'arrêté du 15/04/2004 sur la récupération des fluides dans les véhicules en fin de vie, et ainsi une réduction importante des émissions directes de fluide réfrigérant et des coûts externes adjacents à ces émissions.

En effet, l'application de cette redevance permettrait d'internaliser le coût externe des ces émissions de façon plus équitable en respect du principe du « pollueur-payeur ». Ainsi, le financement de la mise à la norme n'incomberait plus aux seuls professionnels du secteur des véhicules hors d'usage, mais aux consommateurs, principaux utilisateurs et donc responsables. Cela conduirait à une meilleure acceptabilité des nouvelles contraintes de récupération en fin de vie.

Par rapport aux mesures et aux obligations prévues par l'arrêté du 15/04/2004, cette mesure présente également une plus grande efficacité de par la structure de contrôle et de suivi mise en place parallèlement au système Récupel.

- **Politique : Incitation à la recherche en Santé Publique concernant les effets directs sanitaires liés à l'air conditionné automobile**

Il existe très peu d'informations et d'études portant sur les effets sanitaires directs induits par l'air conditionné automobile. Face au développement de ce marché et aux populations potentiellement exposées, il serait indispensable d'approfondir les connaissances scientifiques concernant les risques sanitaires liés à l'exposition aux biocontaminants, aux chocs thermiques, ... dus à l'air conditionné des voitures particulières.

- **Politique : Information des consommateurs**

La politique devrait être focalisée sur l'information des consommateurs à l'achat d'un véhicule pour leur expliquer l'influence du fonctionnement de l'air conditionné sur la consommation et les surémissions du véhicule.

- **Politique : Formation**

La formation, l'information et le contrôle du personnel en charge de l'entretien ou du traitement en fin de vie du système d'air conditionné est indispensable pour réduire l'ensemble des émissions.

- **Politique : Promotion de nouvelles technologies**

La promotion des technologies plus modernes appliquées aux systèmes d'air conditionné (entre autres les systèmes basés sur le R-744) est également importante.

Les thèmes de sensibilisation

Dans le cadre d'une campagne de sensibilisation nous recommanderions d'insister en particulier sur les quatre domaines suivants.

- **Financier**

En premier lieu, il importe d'éclairer l'acquéreur potentiel d'un véhicule équipé avec la climatisation sur le fait que, même si l'investissement de départ semble être gratuit ou insignifiant, les frais inhérents à l'utilisation (surconsommation) et au bon entretien du système peuvent être conséquents. D'après les estimations effectuées, les coûts directs variables annuels (entretien et surconsommation) peuvent se situer entre 110 € et 250 € par an suivant l'utilisation du véhicule, du type de motorisation et du prix du carburant.

Afin de limiter les coûts d'utilisation liés à la surconsommation, le consommateur doit lors de la décision d'achat être particulièrement attentif à la consommation moyenne ainsi qu'au type de motorisation du véhicule. En effet, à puissance égale, un moteur diesel surconsomme plus qu'un moteur essence et, sur le plan économique, la différence de prix par litre de carburant ne compense pas toujours ce phénomène.

- **Entretien**

Préalablement à la décision d'achat, il faut informer le consommateur sur la nécessité d'effectuer un entretien régulier (annuel) du système. Selon le type de voiture, sa cylindrée, sa marque ainsi que la durée d'utilisation du véhicule, ces frais peuvent varier entre 65 € et 135 € par an.

Cet entretien est nécessaire, d'une part, afin de vérifier le niveau de gaz dans le système et ainsi prévenir un dysfonctionnement du circuit du froid et, d'autre part, pour procéder au remplacement de certains éléments (filtre à air, bouteille déshydratante) afin de garantir le bon fonctionnement et la qualité de l'air à l'intérieur de l'habitacle.

Un autre aspect important concernant l'entretien porte sur le choix de l'opérateur de ce service. Il est primordial que le consommateur ne se focalise pas uniquement sur le prix du service, mais s'assure également de la qualité du service payé (cf. description de la tâche de désinfection du système dans le chapitre sur la santé).

A cette fin, il faudrait qu'une information quant à l'expérience et à la formation du prestataire du service soit disponible pour le consommateur afin qu'il puisse bénéficier d'une garantie sur la qualité du service presté.

Enfin, le meilleur entretien, selon l'avis des professionnels de l'air conditionné automobile, est de faire tourner le système d'air conditionné pendant cinq minutes toutes les semaines afin de se prémunir de frais d'entretien et de réparation supplémentaires.

- Santé

Malgré les avantages offerts en termes de bien-être et de confort, il semble indispensable d'informer le public sur les effets sanitaires néfastes que génère l'air conditionné automobile suite à une biocontamination, aux chocs thermiques et à la sécheresse de l'air.

Pour le premier cas de figure, si des odeurs émanent du système d'aération ou si des réactions allergiques se manifestent chez certains passagers suite à une exposition à l'air conditionné, il convient dès lors de faire désinfecter le système auprès d'un garage spécialisé pour ce type d'opération.

Dans un cadre idéal, il serait intéressant que les propriétaires de véhicules contaminés les fassent analyser auprès de laboratoires afin de mieux identifier les contaminants, ce qui permettrait ainsi de compléter les données concernant cet aspect sanitaire lié à la climatisation automobile. Néanmoins, cette initiative est peu réaliste étant donné qu'elle est fort coûteuse et requiert l'immobilisation dudit véhicule pendant un certain temps.

Dans une perspective de prévention des pathologies induites par les chocs thermiques, les experts mentionnent qu'il importe d'indiquer au consommateur de bien veiller à ne pas dépasser un gradient de température supérieur à 10°C entre l'air de l'habitacle et le milieu extérieur.

Les effets sanitaires négatifs indirects sont liés à la surconsommation du moteur pour l'alimentation du compresseur du circuit du froid. Le fonctionnement de l'air conditionné génère ainsi une surémission de polluants qui détériore la qualité de l'air et est responsable d'une aggravation de la mortalité et de la morbidité dues aux maladies respiratoires et cardio-vasculaires, surtout en milieu urbain.

- Environnement

Il est crucial de rappeler au consommateur que le fonctionnement de l'air conditionné automobile exerce un impact négatif sur l'environnement de façon directe et indirecte.

D'une part, les systèmes d'air conditionné actuels sont alimentés avec du HFC 134a qui possède un pouvoir de réchauffement potentiel 1300 fois supérieur au CO₂. Ces systèmes souffrent toute leur vie durant de fuites de gaz qui s'échappent dans l'atmosphère, qui accroît les GES et intensifiera vraisemblablement les risques liés au réchauffement planétaire et au changement climatique.

D'autre part, l'air conditionné automobile conduit indirectement à la dégradation de notre environnement par une contribution à la pollution atmosphérique suite à la surconsommation de carburant, issu de ressources non renouvelables, que son fonctionnement engendre.

XVII. Bibliographie

- [1] SCHWARZ W., HARNISCH J., *Establishing the Leakage Rates of Mobile Air Conditioners*, European Commission (DG Environment), 17th April 2003.
- [2] BROWN, J. S.; YANA-MOTTA, S. F.; DOMANSKI, P. A., *Comparative analysis of an automotive air conditioning systems operating with CO2 and R134a*, International Journal of Refrigeration, Vol. 25, No. 1, 19-32, 2002.
- [3] CEPA, *Mobile Air conditioning systems – direct emissions technology assessment*, California environmental protection agency air resources board, 21st July 2004.
- [4] CITROËN, *Documentation Après-Vente Automobiles Citroën*, Citroën C8 Diagnostic, mai 2002.
- [5] COMMISSION EUROPEENNE, *Note d'information 13630/04 Conseil de l'union Européenne, annexe B : Proposition de directive du parlement européen et du conseil concernant les émissions provenant des systèmes de climatisation des véhicules à moteur, et modifiant la directive 70/156/CEE du Conseil*.
- [6] BROTHIER J-Ph., *La climatisation automobile*, Edition Technique pour l'Automobile et l'Industrie (ETAI), Boulogne 1999, 60 pages.
- [7] KUMMAR P., MARIER R., LEECH S., *Hypersensitivity pneumonitis due to air car conditioner*, The New England Journal of Medecine, Vol. 305, 1980, pp. 1531-1532.
- [8] KUMMAR P., MARIER R., LEECH S., *Respiratory allergies related to automobile air conditioners*, The New England Journal of Medecine, Vol. 311, N°25, 1984, pp. 1619-1621.
- [9] KUMAR P., LOPEZ M., FAN W., CAMBRE K., ELSTON R.C., *Mold contamination of automobile air conditioner systems*, Annals of Allergy, 64 (2 part 1), 1990, pp. 174-177.
- [10] SANTILI J., ROCKWELL W., VAUGHAN W., *Health effects of a mold-contaminated automobile*, Journal of Allergy and Clinical Immunology, Vol.113, Issue 2, supplement 1, pp. S59.
- [11] SIMMONS RB., NOBLE JA., ROSE L., PRICE DL., *Fungal colonization of automobile air conditioning systems*, Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, Vol. 19, 1997, pp.150-153.
- [12] RIPPON J.W., *Medical Mycology: the pathogenic fungi and the pathogenic actinomycetes*, 3rd edition, W.B. Saunders, Philadelphia, 1988, 797 pages.
- [13] CAEKELBERGH K., Dr LAMOTTE M., Prof. ANNEMANS L., *Épidémiologie et coût de l'asthme et de la broncho-pneumopathie chronique obstructive en Belgique*, IBES Briefing, N°38, Bruxelles, Novembre 2002, 5 pages.
- [14] COPPETIERS Y., BAZELMANS C., *L'asthme en Belgique*, Fiches sanomètre 35, URL : <http://homepages.ulb.ac.be/~ndacosta/promes/sano35.html>
- [15] MAGE D.T., ZALI O., *Véhicules à moteur et pollution atmosphérique : impact sur la santé publique et mesures d'assainissement*, OMS et ECOTOX, 1922, 256pages.
- [16] SOCIETE FRANÇAISE DE SANTE PUBLIQUE, *La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique : bilan de 15 ans de recherche internationale*, SFSP, 1996,251 pages.

- [17] FEDERAUTO MAGAZINE, *Les immatriculations de voitures neuves : les trois premiers trimestres de 2004*, N°91, Nov/déc 2004., pp. 22-28.
- [18] FEBIAC, *Rapport exercice 2003*, FEBIAC, 2004, 159 pages.
- [19] FEBIAC, *Statistiques Febiac 2003: Parc des voitures par marque*,
URL : <http://www.febiac.be/fr/statistics/xls/PARC9.xls>
- [20] FARRINGTON R, *Fuel Consumption and associated CO₂ emissions due to MACs*, Mac Summit 2003, 10th Februari 2003.
- [21] BENOULI J, et.al., "*Fuel Consumption of mobile air conditioning – method of testing and results*"
- [22] BARBUSSE S., CLODIC D., ROUMEGOUX J.P. *Climatisation automobile, énergie et environnement*, Recherche transport sécurité n°60 (1998).
- [23] BENOUALI J., CLODIC D., *Méthode de mesures et mesures des surconsommations de climatisations automobile*, Center for Energy Studies ENSMP, Mola S., Lo Presti G., Magini M., Malvicino C.A. Fiat Research Center, intermediate report for ADEME december 2002.
- [24] BARBUSSE S., GAGNEPAIN L., *La climatisation automobile : impact énergétique et environnemental*, ADEME, Valbonne, mai 2003, 159 pages.
- [25] GENSE, N.L.J.; "*Driving style, fuel consumption and tail pipe emissions*"; Delft, TNO Wegtransportmiddelen, maart 2000.
- [26] BARRAULT S et.al. "*Analysis of the economic and environmental consequences of a phase out or considerable reduction leakage of mobile air conditioners*", European Commission, ARMINES 2003.
- [27] ETEC, CEESE, "*Schone voertuigen*", VERSLAG WP1 "*Definitie van het begrip Schone Voertuigen*", ETEC-Vrije Universiteit Brussel & CEESE-ULB, januari 2002
- [28] JOURMARD R., *Methods of Estimation of atmospheric Emissions from Transport: European Scientist Network and Scientific State-of-the-art*, Final Report, LTE 9901 report, action COST 319, Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS), France, March 1999, 83pg.
- [29] KLEIN, J. et al., "*Methoden voor de berekening van de emissies door mobiele bronnen in Nederland*", Rapportagereeks MilieuMonitor, Nr. 4, januari 2002
- [30] VAN MIERLO J. et.al. "*Involed van het rijgedrag op de verkeersemissies: kwantificatie en maatregelen*", eindverslag AMINAL/aminabel/bvo/twol2000/mbp2-14/1, april 2002.
- [31] HENSELMANS R., *Global trends in Mobile A/C*, Conference on options to reduce greenhouse gases due to mobile air conditioning, European Commission, 11-13th February 2003.
URL: <http://europa.eu.int/comm/environment/air/mac2003/pdf/henselmans.pdf>
- [32] FISCHER, *Comparison of global Warming Impacts of Automotive air conditioning concepts*, Proceedings of the International CFC and halons alternatives conference 1995, pp.508-515.
- [33] FRIEDRICH R., BICKEL P. (Eds.) (2001). *Environmental External Costs of Transport*, University of Stuttgart – Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy. Springer Verlag
- [34] EUROPEAN COMMISSION (1999) *ExternE Vol.10 – National Implementation*. EUR18528, European Commission DG XII Science, Research and Development.

- [35] PILKINGTON A. (1996). *A preliminary Evaluation of the health effects of 'new' pollutants in transport studies*, Institute of occupational medicine (IOM), Edingburgh, UK, review paper for ExternE
- [36] VERMOOTE S., DE NOCKER L. (2003). *Valuation of environmental impacts of acidification and eutrophication*, Work executed by VITO in NewExt project – DG Research, 5th framework programme. Not yet published.
- [37] CLARKSON R., DEYES K., *Estimating the social cost of carbon emissions*, Department for Environment, Food & Rural Affairs, London, January 2002, 57 pages.
- [38] ETEC-VUB, VITO, CESE-ULB, '*Bepalen van een ecoscore voor voertuigen en toepassing van deze ecoscore ter bevordering van het gebruik van milieuvriendelijke voertuigen*', AMINAL, januari 2004 – maart 2005.