

# La climatisation des autobus

## Impacts consommation et pollution

Laurent GAGNEPAIN

DONNÉES ET RÉFÉRENCES

Octobre 2007

### Introduction

La climatisation des autobus est un plus pour l'attractivité des transports en commun, en répondant à une demande de confort des usagers. Néanmoins, les groupes de climatisation installés dans les autobus ne sont malheureusement que très peu optimisés, car le plus souvent, ce sont des systèmes prévus pour les autocars qui fonctionnent en interurbain, qui sont alors adaptés aux autobus. La diffusion de l'air est par ailleurs peu performante d'où une température intérieure pas toujours très homogène et par conséquent, un confort des passagers quelquefois très relatif.

L'impact sur la consommation, le confort et les émissions de gaz à effet de serre, de trois types de climatisation, seront présentés. Des solutions permettant de réduire les effets négatifs sur l'environnement des systèmes de climatisation des autobus seront ensuite proposées. Enfin, quelques conseils seront donnés aux réseaux de bus afin d'une part, de les guider dans leur choix de type de climatisation et de matériel, et d'autre part, de leur permettre d'optimiser l'exploitation de leurs bus climatisés.

### Impact sur la consommation et le confort

#### Consommation au banc à rouleaux

Des mesures réalisées à l'UTAC sur banc à rouleaux, avec le concours de la RATP et de l'Ecole des Mines de Paris, ont permis d'évaluer la surconsommation due au fonctionnement de la climatisation<sup>1,2,3</sup>. Les essais ont été réalisés avec une température extérieure de  $32^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , sans ensoleillement artificiel, suivant le cycle de roulage ADEME/RATP (Fig.1).

Afin de simuler les charges solaires et l'apport thermique des passagers, dix convecteurs électriques ont été répartis à l'intérieur du bus. Dans le cadre de ces essais, deux charges thermiques internes ont été appliquées : 7,5 et 3,75 kW, simulant respectivement la présence de 50 et 20 personnes avec un fort ensoleillement.

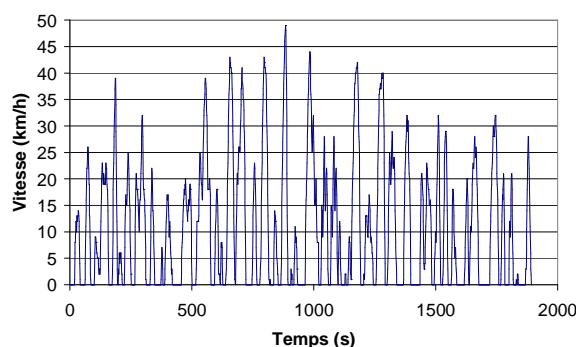


Figure 1 - cycle de roulage ADEME/RATP

Trois types de climatisation actuellement sur le marché ont été testés :

- Clim A : ce système, fonctionnant en air neuf et recyclé, est une adaptation des groupes de climatisation équipant les autocars de tourisme.

**ADEME**



DÉPARTEMENT TRANSPORTS ET MOBILITÉ

C'est le système actuellement le plus vendu. L'air chaud du bus est aspiré au niveau du toit. L'air rafraîchi est soufflé à travers les voussiers métalliques, contre les vitres. La régulation de la température interne est effectuée par une sonde de température située à l'aspiration d'air au niveau de l'évaporateur

- Clim B : ce dispositif fonctionne en tout air recyclé. L'air à l'intérieur du bus est aspiré au niveau des voussiers, rafraîchi puis soufflé le long du vitrage.
- Clim C : ce système est une modification du système de ventilation mécanique forcée placé en partie haute de l'habitacle, suivant l'axe du bus. Un évaporateur a été placé dans chacune des cinq unités de toit. Le fonctionnement s'effectue en tout air neuf.

Les résultats des mesures de surconsommation sont présentés Figure 2.

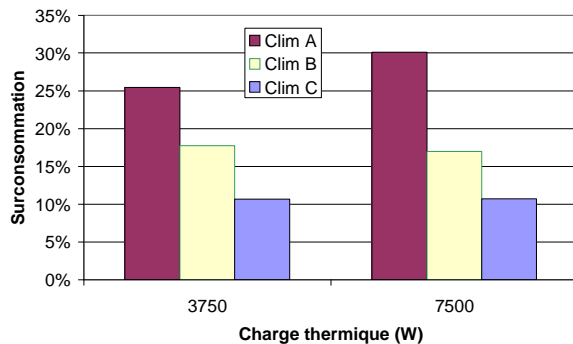


Figure 2 – Comparaison des surconsommations des trois systèmes de climatisation

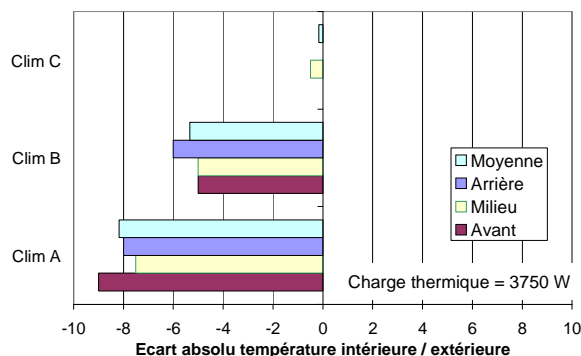


Figure 3 – Écart de température entre l'intérieur et l'extérieur du bus avec une charge thermique de 3750 W

La Clim A entraîne une surconsommation de 25 et 30 %, respectivement pour les charges thermiques modérée et forte. Pour la Clim B, la surconsommation en carburant est de l'ordre de 17 % et pour la Clim C de 11 %, quelle que soit la charge thermique appliquée.

Les deux derniers systèmes de climatisation délivraient leur puissance maximale dans les deux configurations, ce qui explique la stabilité de la surconsommation.

### Confort

Pour évaluer les performances d'un système de climatisation, il est nécessaire de regarder en plus de la surconsommation, le confort apporté, et notamment les températures obtenues à l'intérieur du bus<sup>1,2,3</sup>. Figures 3 et 4 sont présentés, pour les deux charges thermiques, les écarts de température entre l'intérieur et l'extérieur du bus, à différentes positions dans le bus : arrière, milieu et devant.

Dans le cas de la charge thermique modérée, les Clim A et Clim B permettent de maintenir la température intérieure moyenne du bus respectivement 8 et 5°C en dessous de la température de l'air ambiant. À charge thermique forte, l'écart de température est ramené autour de 5°C, pour les deux systèmes, avec une moins grande homogénéité des températures. Par ailleurs, il apparaît clairement que si, dans le cas de la charge thermique modérée, la Clim C parvient à maintenir la température à l'intérieur du bus au niveau de la température ambiante, avec la forte charge thermique, cela n'est plus le cas.

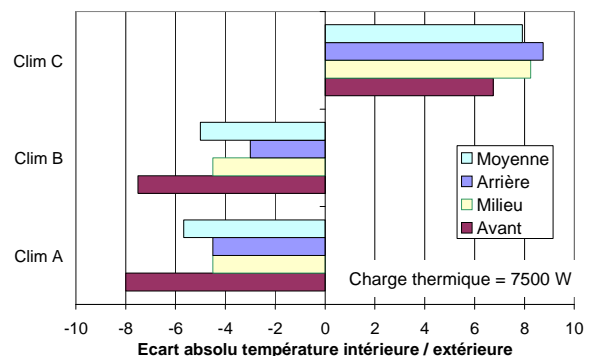


Figure 4 – Écart de température entre l'intérieur et l'extérieur du bus avec une charge thermique de 7500 W

Notons qu'à forte charge thermique, pour arriver à des niveaux de températures à l'intérieur du bus tout à fait comparable, la Clim B présente une surconsommation quasiment deux fois moins importante que la Clim A. Deux explications peuvent être apportées. Premièrement, les pertes thermiques sont beaucoup plus importantes dans le fonctionnement de la Clim A par rapport à la Clim B, notamment dans les voussoirs. Deuxièmement, la Clim B travaille en tout air recyclé alors que la Clim A admet une proportion variable d'air neuf chaud.

### Surconsommation annuelle

L'évaluation de la surconsommation annuelle d'un bus climatisé par rapport au même modèle qui ne l'est pas, est relativement compliquée car elle nécessite de connaître :

- les données météorologiques : température et ensoleillement tout au

long de l'année en fonction des heures de la journée

- les taux moyens d'utilisation et de remplissage du bus en fonction des heures de la journée
- la distance annuelle parcourue et la consommation annuelle sans la climatisation

À partir des mesures de consommation obtenues avec les Clim A et Clim C et en prenant des hypothèses qui restent à consolider avec des exploitants de réseaux, sur les taux moyens d'utilisation et de remplissage, une estimation de la surconsommation annuelle a été réalisée pour deux villes ayant des conditions climatiques différentes : Paris et Nice. Ce premier calcul donne une surconsommation annuelle avec la Clim C de l'ordre de 1% à Paris et 1,5% à Nice, et avec la Clim A de 3% à Paris et 4,5% à Nice.

## Impact sur les émissions de gaz à effet de serre

L'effet de serre est un phénomène naturel qui permet d'avoir sur Terre une température permettant d'y vivre. Il est dû à la présence de gaz dits "à effet de serre" dans l'atmosphère, dont les quantités sont augmentées par les activités humaines, ce qui perturbe très gravement le climat de la planète.

La climatisation intervient à double titre dans les émissions de gaz à effet de serre. Premièrement, quand elle fonctionne, elle provoque une surconsommation de carburant et donc des émissions accrues de CO<sub>2</sub>. Deuxièmement, qu'elle fonctionne ou pas, elle rejette une partie du fluide frigorigène (HFC-134a) présent dans le circuit de la climatisation. Ce fluide est un gaz à fort potentiel d'effet de serre, 1 300 fois plus important que le CO<sub>2</sub>.

Le tableau 1 présente la surémission totale de CO<sub>2</sub> due à la climatisation pour les Clim A et

Clim C. Les cas de Paris et Nice ont été considérés pour l'impact de la surconsommation de carburant à partir des données du paragraphe précédent. Par ailleurs, il a été pris comme hypothèse un kilométrage annuel moyen de 50 000 km et une consommation moyenne de carburant, sans climatisation, de 50 l/100 km. Enfin, concernant les émissions de fluides frigorigènes, les boucles de climatisation des autobus ne sont pas particulièrement étanches, les fuites sont de l'ordre de 1 à 2 kg par an. La prise en compte des émissions dans l'atmosphère de réfrigérant lors d'accident du véhicule, de défaillance du matériel ou de fausse manœuvre lors d'une opération de maintenance, porte les rejets de R-134a à environ 3 kg par an et par bus<sup>4</sup>. Ainsi, suivant les conditions climatiques et les systèmes de climatisation utilisés, la surémission de CO<sub>2</sub> due à la climatisation varie entre 7 et 10,5 %.

Motorisation	Diesel			
	Clim A	Clim C	Clim A	Clim C
Type de climatisation				
Lieu de roulage	Paris		Nice	
Kilométrage annuel (km)	50 000,00	50 000,00	50 000,00	50 000,00
Conso moyenne sans climatisation (l/100 km)	50,00	50,00	50,00	50,00
Emission CO <sub>2</sub> sans climatisation (g/km)	1 332,50	1 332,50	1 332,50	1 332,50
Surconso annuelle due à l'usage de la climatisation	3,0%	1,0%	4,5%	1,5%
Fuite réfrigérant (accidents et défaillances inclus) (g/an)	3 000,00	3 000,00	3 000,00	3 000,00
GWP HFC-134a	1 300,00	1 300,00	1 300,00	1 300,00
<b>Emissions annuelles de CO<sub>2</sub> (kg/an)</b>	<b>72 523,75</b>	<b>71 191,25</b>	<b>73 523,13</b>	<b>71 524,38</b>
Roulage sans climatisation	66 625,00	66 625,00	66 625,00	66 625,00
Climatisation	5 898,75	4 566,25	6 898,13	4 899,38
Usage clim	1 998,75	666,25	2 998,13	999,38
Réfrigérant	3 900,00	3 900,00	3 900,00	3 900,00
<b>Surémission de CO<sub>2</sub> due à la climatisation</b>	<b>8,9%</b>	<b>6,9%</b>	<b>10,4%</b>	<b>7,4%</b>

Tableau 1

## Quelles solutions pour diminuer l'impact de la climatisation sur les émissions de gaz à effet de serre ?

Pour réduire l'impact de la climatisation sur les émissions de gaz à effet de serre plusieurs voies peuvent être explorées :

- réduction des charges thermiques
- amélioration de la distribution de l'air à l'intérieur du bus
- optimisation du fonctionnement du système de climatisation

### Réduction des charges thermiques

#### Vitrage athermique

Étant donné que la surface vitrée des autobus ne cesse de s'accroître pour donner une plus grande sensation d'espace et de liberté aux passagers, une des principales stratégies pour réduire les charges thermiques est d'utiliser des vitrages performants thermiquement. Il existe plusieurs types de vitrage : clair, teinté, surteinté et réfléchissant (athermique).

Le flux solaire absorbé par un vitrage non réfléchissant entraîne l'augmentation de sa température et peut donc provoquer une sensation de chaleur pour les personnes proche de la vitre. Par ailleurs, un vitrage clair ou peu teinté laisse passer plus de flux lumineux qui se transforme en chaleur à l'intérieur du bus. Les vitrages réfléchissants, dit athermiques, sont les plus performants dans la réduction du flux solaire entrant. Ils réfléchissent 33 % du rayonnement

énergétique, au lieu de 8 % pour un verre clair, avec une transmission lumineuse équivalente à celle d'un vitrage absorbant teinté, de l'ordre de 77 %, contre 89% pour une vitre claire<sup>3,5</sup>.

Ainsi, l'utilisation de vitrages athermiques permet de diminuer la charge thermique et donc de réduire la demande de puissance frigorifique et par conséquent la consommation de carburant du véhicule.

#### Recirculation d'air

Comme il a été constaté dans le paragraphe sur l'impact sur la consommation, la recirculation d'air habitacle permet de réduire la consommation de carburant. En effet, lorsque la température de l'air recyclé (air intérieur) est inférieure à la température de l'air extérieur, le besoin en refroidissement est plus faible et donc le système de climatisation est moins sollicité.

#### Amélioration de la distribution de l'air

Une bonne distribution de l'air doit permettre d'avoir une température à l'intérieur du bus la plus homogène possible au niveau des passagers, aussi bien assis que debout, avec de faibles vitesses d'air du haut vers le bas. À puissance frigorifique égale, une distribution d'air vers les passagers constitue l'option la

plus efficace. L'École des Mines de Paris, avec le soutien de la RATP et de l'ADEME, a développé un concept innovant de diffusion de l'air<sup>5,6</sup>. Un système prototype a été réalisé puis installé sur un bus qui a roulé en exploitation. Les mesures en termes de confort et de surconsommation ont donné des résultats satisfaisants.

## Optimisation du fonctionnement du groupe froid

Un certain nombre de voies sont explorées comme le délestage du compresseur de climatisation sur les phases d'accélération du bus (ECG d'Hispacold France) ou les systèmes de refroidissement à boucle indirecte.

### ECG – Hispacold France

La société Hispacold France (<http://www.hispacold.fr/francais/presentation.htm>) a développé et breveté un système appelé ECG : Ecogestion du système d'air conditionné pour autobus. Ce dispositif repose sur un système de pilotage électrique et mécanique du circuit de climatisation. Le système est constitué d'une électrovanne, d'un clapet anti-retour, de capteurs et d'un boîtier de commande. Afin de ne pas entraîner une dégradation rapide de l'embrayage électromagnétique, l'ordre de commande est transmis directement à l'électrovanne qui court-circuite le compresseur. La pression est maintenue haute grâce au clapet anti-retour. Ce système permet notamment, lors des phases de forte demande de puissance mécanique (accélération, démarrage en côte, sortie de rond-point ...), d'avoir la pleine puissance du moteur thermique car le compresseur est court-circuité. Hispacold France revendique que son système offre des gains en consommation de carburant et en mobilité.

Connex, devenu depuis Veolia Transports, et l'ADEME ont testé à Nice, de juillet à septembre 2004, sur deux autobus articulés GNV Euro III, le système ECG<sup>7</sup>. Au terme de cette campagne d'essais sur site, les conclusions suivantes ont pu être tirées. En période chaude, avec une température extérieure moyenne proche de 30°C, les mesures de consommation n'ont pas montré

d'écart significatif entre la configuration avec et sans ECG. En revanche, le système ECG a conduit à une réduction de la production de froid se traduisant par une augmentation moyenne de la température de soufflage d'environ 1°C. En mi-saison (température moyenne de 25°C), un écart de consommation de 10 % est apparu en faveur des bus équipés de l'ECG sans dégradation de la température habitacle.

Hispacold France a ensuite retravaillé les lois de commande du système ECG. Ainsi, une deuxième évaluation, actuellement en cours, a été lancée avec la RATP et l'ADEME. Cette étude comprend une campagne de mesures sur site, ainsi que des essais sur piste, pour quantifier les écarts d'accélération, et sur banc à rouleaux, pour mesurer les gains en consommation<sup>8</sup>. Les mesures d'accélération, ont permis d'identifier une amélioration des performances de l'ordre de 2 et 1 % respectivement sur un 50 m départ arrêté et un 0 à 50 km/h avec le système ECG<sup>9</sup>. Par ailleurs, une diminution de 3 % de la consommation de carburant a été enregistrée sur un bus Diesel de 12 m, lors de mesures sur banc à rouleaux à l'UTAC, suivant le cycle ADEME/RATP, avec une température d'essai de 30°C, une température de consigne de 23°C et une charge thermique à l'intérieur du bus simulant la mi-charge<sup>10</sup>.

### Boucle indirecte

Comme nous l'avons vu précédemment, les rejets de fluides frigorigènes peuvent avoir sur l'effet de serre un impact supérieur à celui de la surconsommation de carburant. Par conséquent, pour limiter les fuites de réfrigérant et leur quantité embarquée qui est de l'ordre de 7 à 9 kg pour un bus de 12 m, des études sont menées sur des boucles indirectes. L'idée est de ne plus faire circuler, du compartiment moteur où se situe le compresseur, jusqu'à l'avant du véhicule, un fluide frigorigène mais un fluide frigoporteur, par exemple de l'eau glycolée. La boucle de climatisation est alors beaucoup plus compact, le volume de réfrigérant sensiblement plus faible et les fuites mieux maîtriser. L'évaporateur n'échange plus avec l'air qui va être soufflé dans l'habitacle, mais avec le fluide frigoporteur qui assurera le refroidissement de l'air habitable à l'aide d'échangeurs appelés aérofrigifères (Figures 5 et 6).

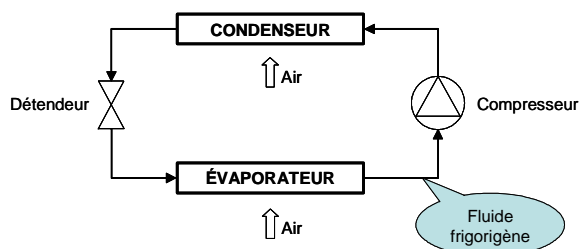


Figure 5 – Système classique de climatisation

### Solution alternative : la climatisation évaporative

L'air extérieur chaud et sec est filtré, rafraîchi et réhydraté grâce à l'évaporation d'eau puis diffusé dans la cabine. Cette technologie présente la particularité de fonctionner en tout air neuf, sans recyclage de l'air intérieur, tout en apportant une filtration et une purification de l'air extérieur introduit. D'un point de vue

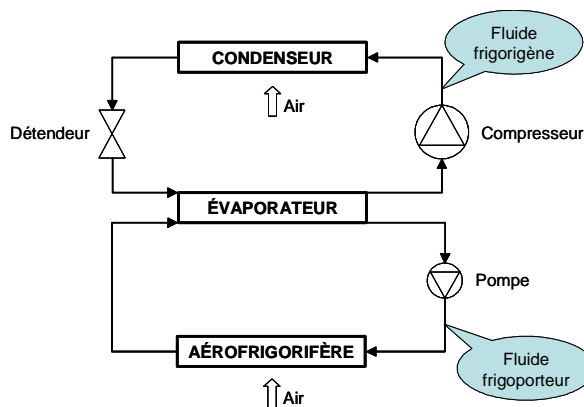


Figure 6 – Système de climatisation indirect

environnemental, la technologie évaporative présente les avantages cumulés de n'utiliser aucun fluide frigorigène agissant sur la couche d'ozone et/ou sur l'effet de serre et de diminuer la surconsommation de carburant due au fonctionnement de la climatisation<sup>11</sup>. L'abaissement de température est cependant, en général, plus faible qu'avec une climatisation classique.

## Conseils aux réseaux de bus

Quelques conseils peuvent être donnés aux gestionnaires de réseaux d'autobus avant leur prise de décision d'acheter un bus climatisé et lors de son exploitation.

### Avant l'acquisition d'un bus climatisé

Concernant l'achat d'un bus climatisé, il est nécessaire de considérer que non seulement son coût à l'achat sera supérieur à celui d'un bus qui ne l'est pas, mais également que les coûts d'exploitation seront plus élevés : surconsommation de carburant, maintenance du système, achat de fluide frigorigène. Ces coûts supplémentaires doivent bien évidemment être mis en regard de l'attractivité apportée au bus et donc l'augmentation de sa fréquentation qui peut en découler.

D'autre part, il est préférable de faire le choix d'un système de climatisation ayant une boucle de régulation sur la température à l'intérieur du bus, afin que le groupe froid produise le juste froid nécessaire. Par ailleurs, comme il a été vu dans le paragraphe traitant de la surconsommation, il est souhaitable d'avoir une climatisation pouvant fonctionner en air recyclé. N'oublions pas qu'en

exploitation un bus voit son air intérieur se renouveler en partie par la simple ouverture des portes qui est très fréquente.

Dernier point, comme nous l'avons écrit précédemment, le choix du vitrage peut également avoir son importance.

### En exploitation

Le réglage de la température de consigne habitable a une forte influence sur la surconsommation. En effet, si elle est trop basse, le groupe de climatisation fonctionnera beaucoup plus souvent en pleine charge. De plus, en termes de confort, il n'est pas forcément souhaitable que les gens rentrent dans un bus avec une sensation de fraîcheur trop importante ; les écarts chaud-froid peuvent être jugés désagréables.

Les émissions de fluides frigorigènes, notamment au niveau des fuites sur la boucle sont très importantes (1 à 2 kg/an). Ceci a non seulement un impact sur l'environnement (rejet de gaz à effet de serre) mais également un coût pour l'exploitant qui est obligé, régulièrement, de recharger en fluide

frigorigène la boucle de climatisation. Avant toute recharge de fluide frigorigène, il est absolument nécessaire de contrôler l'étanchéité du circuit. Toute fuite détectée devra alors être réparée, la recharge en fluide frigorigène n'étant effectuée qu'ensuite. Le décret n°2007-737 du 7 mai 2007, relatif à certains fluides frigorigènes utilisés dans les équipements frigorifiques et climatiques, donne notamment des dispositions concernant la prévention des fuites de fluides frigorigènes. Il est précisé que seuls les opérateurs possédant une attestation de capacité, délivrée par un organisme agréé, peuvent procéder à la

charge en fluide frigorigène, à la mise en service des équipements ou tout autre opération nécessitant une intervention sur le circuit contenant des fluides frigorigènes. Par ailleurs, lorsque la charge en fluide frigorigène est supérieure à 2 kg, ce qui est le cas dans les bus, lors de sa mise en service puis tous les ans, les exploitants doivent faire procéder à un contrôle d'étanchéité par un opérateur habilité. Les résultats du contrôle d'étanchéité et les réparations effectuées ou à effectuer sont inscrits sur une fiche d'intervention. Ces fiches d'intervention doivent ensuite être conservées pendant au moins cinq ans.

## Conclusions

Pour un bus équipé du système de climatisation le plus communément installé, notre estimation de la surémission de gaz à effet de serre est de l'ordre de 9 et 10,5 %, pour respectivement des climats de type Paris et Nice, soit près de 6 et 7 tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> par an. Plusieurs solutions techniques permettant de réduire cet impact environnemental ont été décrites : vitrages athermiques, recirculation de l'air, meilleure distribution de l'air frais, système ECG et boucle indirecte. Enfin, quelques conseils ont

été donnés aux exploitants, avec notamment un éclairage sur le décret du 7 mai 2007 relatif à l'utilisation de fluides frigorigènes et au contrôle d'étanchéité des boucles de climatisation dont la charge est supérieure à 2 kg. L'avenir nous dira si l'application de ce décret aura permis de réduire sensiblement les rejets dans l'atmosphère de fluides frigorigènes, et donc, de réduire significativement l'impact de la climatisation des bus sur l'effet de serre.

<sup>1</sup> rapport UTAC n°02/02435 : Mesure de la consommation volumique sur un autobus urbain RENAULT AGORA - 2002

<sup>2</sup> rapport UTAC n°03/00405 : Influence de deux systèmes de climatisation sur la consommation volumique de carburant de deux autobus urbains RENAULT AGORA - marché ADEME n° 03.66.010, 2003

<sup>3</sup> Y. Riachi, F. Cherqui et D. Clodic – État des lieux sur le niveau de confort et la consommation énergétique de la climatisation des bus de la RATP – Préconisations pour un confort et une consommation énergétique acceptables – convention ADEME n° 02.66.019, 2003

<sup>4</sup> S. Barrault, L. Palandre, S. Saba et D. Clodic – Inventaires des fluides frigorigènes et de leurs émissions, France année 2004 – marché ADEME n°06.74.C0060, 2006

<sup>5</sup> Y. Riachi – Étude et simulation d'un système de climatisation pour bus de transports en commun. Conception et réalisation d'un démonstrateur – Thèse de doctorat de l'École des Mines de Paris, 2005

<sup>6</sup> Y. Riachi, D. Clodic – Reconcepton de la distribution d'air et amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes de climatisation des bus de la RATP. Validations expérimentales – convention ADEME n°04.66.C0034, 2005

<sup>7</sup> J.-L. Gauducheau – Test du système ECG de gestion de la climatisation pour autobus mis au point par la société Hispacold France pour deux bus GNV – Rapport d'expérimentation – convention ADEME n°04.66.C0056, 2005

<sup>8</sup> Évaluation de l'impact du système ECG sur la limitation de la surconsommation de la climatisation dans les autobus – convention ADEME n°06.66.C0050, en cours

<sup>9</sup> rapport CERAM n°D-06-110a-Ra01 : Essais de performances (départs arrêtés) avec et sans système ECG – marché ADEME n°06.66.C0089, 2006

<sup>10</sup> rapport UTAC n°07/07652-1 : Impact du système ECG sur la consommation de carburant d'un autobus urbain Renault de type Agora équipé d'une climatisation – marché ADEME n°06.66.C0049, 2007

<sup>11</sup> L. Gagnepain – La climatisation des véhicules industriels et des transports en commun de personnes – Comparatif de la climatisation évaporative par rapport à la climatisation "classique" par compression – Données et Références – Décembre 2005

**ADEME**



Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie  
Département Transports et Mobilité  
500, route des Lucioles – 06560 Valbonne