

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

Laurent GAGNEPAIN

DONNÉES ET RÉFÉRENCES

Décembre 2005

La climatisation qui n'est presque plus une option pour les voitures particulières tend également à se diffuser rapidement aux niveaux des véhicules industriels (camions, machines agricoles, engins de travaux publics ...) et des véhicules de transport en commun de personnes (autobus, autocar ...). Cet équipement qui est sans conteste un élément de confort et indirectement de sécurité n'en est pas moins responsable d'une augmentation des émissions des gaz à effet de serre du secteur des transports pour deux raisons. Premièrement, le fonctionnement de la climatisation nécessite l'entraînement d'un compresseur par le moteur thermique du véhicule ce qui accroît la consommation de carburant de ce dernier. Deuxièmement, les boucles de climatisation ne sont pas parfaitement étanches et les fluides frigorigènes utilisés ont un très fort potentiel de réchauffement global (PRG) : entre 1 000 et 3 000 fois plus important que le CO₂.

En dehors des voitures particulières et des véhicules utilitaires légers, une solution alternative à la climatisation "classique" par compression existe, il s'agit de la climatisation évaporative.

Nous présentons dans cette note les enjeux en termes d'impact sur l'effet de serre de cette technologie par rapport à la climatisation "classique". Cette évaluation s'appuie sur les données du parc français de véhicules climatisés de 2002. Son but n'est pas de présenter une étude fine et détaillée mais de donner au décideur des repères significatifs pour éclairer ses choix et de lui donner les raisons et les moyens de hausser son niveau d'exigence environnementale quant à la climatisation, lors de la rédaction de ses prochains cahiers des charges.



Source : John Deere



Source : Rousseau



Source : Caterpillar



Source : Irisbus



Source : Massey Ferguson

A D E M E



Deux solutions technologiques

Pour les secteurs des **engins agricoles et industriels** (tracteurs et machines agricoles, tracteurs d'entretien routier (parcs DDE), engins de travaux publics, de manutention, de carrières ...), des **véhicules lourds** (camions porteurs et semi-remorques, bennes à ordures ménagères ...), et des **transports en commun de personnes** (autocars, autobus, minibus, transports scolaires, transports de personnes handicapées ...), deux technologies de climatisation sont sur le marché :

- **La climatisation "classique" par compression**, avec compresseur et fluide frigorigène, technologie traditionnelle, jusqu'à ce jour largement diffusée par les constructeurs en première monte,
- **La climatisation évaporative**, sans compresseur ni fluide frigorigène, technologie innovante alternative, qui a fait l'objet de récents développements soutenus par l'ANVAR et par l'ADEME.

La climatisation "classique" fonctionne sur le même principe qu'un réfrigérateur, les températures mises en jeu sont simplement différentes. La production du froid est obtenue par évaporation d'un fluide frigorigène, c'est-à-dire le changement d'état de la phase liquide à la phase vapeur à température et pression constantes. Pour s'évaporer un fluide a besoin d'un apport de chaleur et le principe des climatisations "classiques" est de venir prélever cette chaleur à l'air ambiant et en partie à l'air intérieur en mode recyclage. Cet air est ainsi refroidi en traversant un échangeur appelé évaporateur à l'intérieur duquel circule le fluide frigorigène.

Dans le cas de 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. Ce dernier point est tout particulièrement intéressant pour une utilisation dans des environnements poussiéreux (carrière ...) ou toxiques (pulvérisation de pesticides ...). Ce type de climatisation, notamment développé en France par la société AEREL¹ a fait l'objet de tests de validation tant en situation qu'en laboratoire par le CETIAT (Centre Technique des Industries Aérouniques et Thermiques)^{2, 3}, ainsi que de plusieurs centaines de mises en application en situation réelle, depuis plusieurs années, qui révèlent la satisfaction de ses utilisateurs. D'un point de vue 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 comme nous le présentons dans le chapitre suivant.

Impact environnemental

Émissions de fluides frigorigènes

La tendance à la généralisation de la climatisation "classique" multiplie la diffusion d'équipements dont chacun est porteur d'une charge de fluide frigorigène dont l'impact sur l'effet de serre est très important. Cette quantité de fluides frigorigènes représente un risque potentiel croissant pour l'environnement. Il croît dans l'espace par la quantité de fluides frigorigènes disséminée dans des installations de plus en plus nombreuses, et il croît dans le temps par le vieillissement des équipements, qui les rend progressivement mais inéluctablement moins fiables, moins étanches et moins contrôlés.

Dans le tableau ci-après nous présentons pour trois catégories de véhicules : machines agricoles, camions ainsi que bus et cars, les charges unitaires en fluide frigorigène, le parc de véhicules climatisés de 2002 ainsi que les volumes totaux de fluides frigorigènes disséminés dans ces véhicules⁴. 20 % du parc climatisé de bus, cars, camions et machines agricoles fonctionnent avec du R-22 dont le PRG⁵ vaut 1 700 et 80% avec du R-134a (PRG = 1 300). La climatisation évaporative, quant à elle n'utilise aucun fluide frigorigène.

Types de véhicule	Climatisation "classique" par compression				Climatisation évaporative
	Charge unitaire moyenne de réfrigérant (kg)	Parc climatisé / Parc total (%)	Parc climatisé	Masse totale de réfrigérants disséminés (t)	Masse totale de réfrigérants disséminés (t)
Machines agricoles	0,95 kg	4%	62 800	11,9 t R-22 47,7 t R-134a	0
Camions	0,95 kg	10%	56 800	10,8 t R-22 43,2 t R-134a	0
Bus et Cars	15 kg	10%	8 100	24,3 t R-22 97,2 t R-134a	0
TOTAL				47,0 t R-22 188,1 t R-134a	0

Masses de réfrigérants mises en jeu pour les climatisations par compression et évaporative

Intéressons-nous maintenant aux émissions de fluides frigorigènes. Ces rejets dans l'atmosphère sont liés aux fuites inhérentes au système, aux pertes lors des opérations de maintenance et en fin de vie du véhicule. Les taux de fuite pour les véhicules industriels et les bus et cars sont estimés respectivement à 15% et 25% et celui lors des opérations de maintenance à 50%⁴. Nous avons ainsi évalué les émissions annuelles de fluides frigorigènes en 2002 pour le parc des machines agricoles, des camions et des bus et cars climatisés, les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Type de Véhicule	Climatisation "classique" par compression					Climatisation évaporative
	Charge unitaire moyenne de réfrigérant	Taux annuel d'émissions globales	Émissions annuelles de réfrigérant par équipement		Émissions annuelles totales de réfrigérant du parc climatisé en kt équivalent CO ₂	Émissions annuelles totales de réfrigérant du parc climatisé en kt équivalent CO ₂
			En masse de R-22 ou de R-134a	En équivalent CO ₂		
Machines agricoles	0,95 kg	24,2%	0,23 kg	R-22 : 0,4 t R-134a : 0,3 t	19,9 kt. éq. CO₂	0
Camions	0,95 kg		0,23 kg	R-22 : 0,4 t R-134a : 0,3 t	18,0 kt. éq. CO₂	0
Bus et Cars	15 kg	37,5%	5,63 kg	R-22 : 9,6 t R-134a : 7,3 t	62,1 kt. éq. CO₂	0
TOTAL					100,0 kt. éq. CO₂	0

Émissions fugitives annuelles de gaz à effet de serre pour les climatisations par compression et évaporative

La climatisation évaporative n'utilise aucun fluide frigorigène. Ainsi sa généralisation sur l'ensemble des véhicules considérés permettrait un gain sur les émissions de gaz à effet de serre, exprimées en équivalent CO₂, de 19,9 kt pour les machines agricoles, de 18,0 kt pour les camions, et de 62,1 kt pour les bus et cars, soit une économie totale de 100,0 kt équivalent CO₂ par an.

Surconsommation de carburant

Pour la climatisation "classique" par compression, la surconsommation annuelle de carburant (entraînement du compresseur) et donc la surémission de CO₂ associée sont estimées en moyenne sur l'année à 5%. Les surémissions de CO₂ due à la climatisation "classique" sur l'ensemble du parc de véhicule climatisé et par véhicule sont présentées dans le tableau ci-après.

Selon le laboratoire du CETIAT, la climatisation évaporative présente une efficacité énergétique près de trois fois supérieure à la climatisation "classique" par compression³. Il en résulte une énergie consommée trois fois moindre pour la technologie évaporative et une réduction, dans la même proportion, des surémissions de CO₂. Le tableau ci-dessous donne la comparaison entre les surémissions de CO₂ respectives des deux technologies ("classique" par compression et évaporative) pour chacun des parcs considérés, au niveau global et au niveau d'un équipement.

		Surémissions annuelles dues au fonctionnement de la climatisation			
		Climatisation "classique" par compression		Climatisation évaporative	
Types de véhicule	Émissions globales du secteur en Mt CO ₂ / an	Parc en kt CO ₂ / an	Par équipement en t CO ₂ / an	Parc en kt CO ₂ / an	Par équipement en t CO ₂ / an
Machines agricoles	8,7 Mt	17,4 kt	0,3 t	5,8 kt	0,1 t
Camions	34,5 Mt	171,6 kt	3,0 t	57,2 kt	1,0 t
Bus et Cars	2,4 Mt	11,9 kt	1,5 t	4,0 kt	0,5 t

Surémission annuelle de CO₂ due au fonctionnement des climatisations par compression et évaporative

La combustion de 1 litre de gazole produit 2 665 g de CO₂. Ainsi, l'économie annuelle de consommation de gazole apportée par la climatisation évaporative par rapport à la climatisation "classique", par équipement et pour l'ensemble du parc de véhicules industriels et de bus et cars climatisés est la suivante :

Types de véhicule	Gain potentiel de consommation de carburant	
	par équipement et par an	pour l'ensemble du parc climatisé et par an
Machines agricoles	69 l / an	4 340 m³ / an
Camions	756 l / an	42 935 m³ / an
Bus et Cars	369 l / an	2 990 m³ / an
Total gain consom. gasole		50 265 m³ / an

Gain potentiel de consommation de carburant de la climatisation évaporative par rapport à la climatisation "classique" par compression

Ce différentiel de consommation de carburant entre la climatisation évaporative et la climatisation "classique" par compression génère un gain économique pour l'utilisateur. Notons que, s'agissant d'un gain de consommation de gazole ou de gazole agricole, cette économie est directement liée au cours du pétrole. L'intérêt économique ici démontré ne peut donc que s'accroître au fur et à mesure du renchérissement du pétrole.

Impact global sur l'effet de serre

Nous avons synthétisé dans le tableau ci-dessous les émissions globales de gaz à effet de serre (fonctionnement du système et émissions fugitives de fluides frigorigènes) générées par les deux technologies de climatisation : par compression et évaporative.

Types de véhicule	Climatisation "classique" par compression			Climatisation évaporative			Différentiel d'impact global entre les climatisations par compression et évaporative par équipement et par an
	par équipement et par an en équivalent CO ₂						
	Emissions fugitives de réfrigérants	Usage	Impact global	Emissions fugitives de réfrigérants	Usage	Impact global	
Machines agricoles	0,3 t	0,3 t	0,6 t éq. CO ₂ / an	0	0,1 t	0,1 t éq. CO ₂ / an	0,5 t éq. CO ₂ / an
Camions	0,3 t	3,0 t	3,3 t éq. CO ₂ / an	0	1,0 t	1,0 t éq. CO ₂ / an	2,3 t éq. CO ₂ / an
Bus et Cars	7,7 t	1,5 t	9,2 t éq. CO ₂ / an	0	0,5 t	0,5 t éq. CO ₂ / an	8,6 t éq. CO ₂ / an

Comparaison de l'impact global sur l'effet de serre des climatisations par compression et évaporative

L'enjeu global de la substitution de la climatisation évaporative à la climatisation "classique" par compression se mesure ainsi en termes de gain sur l'effet de serre :

Types de véhicule	Gain potentiel sur l'effet de serre de la climatisation évaporative par rapport à la climatisation "classique" par compression	
	par équipement et par an	pour le parc climatisé et par an
Machines agricoles	0,5 t éq. CO ₂ / an	31,5 kt éq. CO ₂ / an
Camions	2,3 t éq. CO ₂ / an	132,4 kt éq. CO ₂ / an
Bus et Cars	8,6 t éq. CO ₂ / an	70,1 kt éq. CO ₂ / an
TOTAL		234,0 kt éq. CO₂ / an

Gain potentiel sur l'effet de serre de la climatisation évaporative par rapport à la celle par compression

Conclusions

La climatisation représente un enjeu important en termes d'impacts environnementaux. Deux technologies concurrentes sont à la disposition des décideurs, dont les impacts respectifs sont significativement différents aux plans de la réduction des gaz à effet de serre, des économies d'énergie, et des économies de charges pour le gestionnaire.

Pour l'ensemble des secteurs objets de la présente étude (machines agricoles, camions, autobus et autocars), l'enjeu global en termes de gains environnementaux au chapitre de la réduction des émissions de gaz à effet de serre est une économie potentielle de **234 000 tonnes de CO₂ par an**, et au chapitre de la consommation d'énergie, une économie potentielle de **50 265 m³ de carburant pétrolier** (gazole / gazole agricole) par an, soit **42 200 tep** (tonne équivalent pétrole) par an.

Pour le seul secteur des **machines agricoles**, ces gains potentiels sont de 31 500 tonnes CO₂ / an et de 4 340 m³ de carburant / an (3 650 tep par an),

soit, **par équipement : 0,5 t CO₂ / an et 69 l de gazole agricole / an**

Pour le seul secteur des **camions**, ces gains potentiels sont de 132 400 tonnes CO₂ / an et de 42 935 m³ de gazole / an (36 000 tep par an),

soit, **par équipement : 2,3 t CO₂ / an et 756 l de gazole / an**

Pour le seul secteur des **autobus** et **autocars**, ces gains potentiels sont de 70 100 tonnes CO₂ / an et de 2 990 m³ de gazole / an (2 500 tep par an),

soit, **par équipement : 8,6 t CO₂ / an et 369 l de gazole / an**

NOTA: Les enjeux ci-dessus n'ont été chiffrés que pour le parc français.

Conseils aux gestionnaires de parcs de véhicules

Afin d'être en mesure d'effectuer ses choix dans un contexte de préoccupations environnementales et de développement durable, il appartient au décideur, lors de ses consultations et appels d'offres, d'exiger de la part de ses fournisseurs potentiels une proposition dans chacune des deux technologies concurrentes : cabine équipée de la climatisation "classique" par compression, et cabine équipée de la climatisation évaporative en faisant apparaître les points suivants :

- nature du fluide frigorigène utilisé
- quantité mise en jeu dans chaque équipement (charge nominale)
- puissance mécanique absorbée pour le fonctionnement de la climatisation
- et pour les engins de travail : Certificat d'Engagement de Performances Sanitaires et de conformité à la Réglementation (CEPSR)

Dans le cas des engins destinés à travailler en atmosphère susceptible de présenter un ou des risques sanitaires pour l'opérateur (poussière, odeurs, vapeurs, pesticides...), les exigences réglementaires de santé et de sécurité au travail engagent la responsabilité civile et pénale de l'employeur dans son choix d'un équipement "adéquat". La réglementation impose à l'employeur l'obligation d'assurer au travailleur des conditions de travail qui préservent sa santé et sa sécurité. C'est pourquoi la proposition commerciale du fournisseur de climatisation doit être accompagnée du Certificat d'Engagement de Performances Sanitaires et de conformité à la Réglementation (CEPSR).

Il appartiendra ensuite au décideur, étant en possession de ces éléments, de se déterminer en fonction du poids qu'il attribue aux aspects environnementaux, et d'imposer son choix à son fournisseur.

¹ Société AEREL – ZA Les Chapelles – 72310 Bessé-sur-Braye - France

² Campagne de mesures sur un système de rafraîchissement d'une cabine d'engin et exploitation des résultats – Rapport CETIAT NTV 94099, octobre 1994

³ Campagne d'essai en laboratoire du système Climatop pour le rafraîchissement de cabines d'engin et la protection respiratoires des conducteurs – Rapports CETIAT n°9580040 et 9590120 de septembre et novembre 1995.

⁴ Source : Inventaires et émissions de fluides frigorigènes – Année 2002, École des Mines de Paris – Centre Énergétique, marché ADEME n°04.74.C0009, août 2004

⁵ PRG : Potentiel de Réchauffement Global ; PRG du R-22 de 1 700 signifie que 1 g de R-22 rejeté dans l'atmosphère est équivalent à 1 700 g de CO₂

A D E M E



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