

ARTICLE DE SYNTHESE

André Stumpf a obtenu son diplôme de Génie Mécanique à L'INSA de Lyon en 1974. Après une année passée dans l'industrie, il s'est investi dans l'enseignement supérieur et la recherche au sein du département Génie Thermique et Energie à Lorient (Université de Bretagne Sud). Ses travaux en thermique du bâtiment, lui ont permis d'obtenir le diplôme de Docteur Ingénieur en Mécanique des Fluides et Transferts Thermiques en 1986 à ENSM de Nantes.

Il s'est par la suite orienté vers l'industrie dans le domaine de la réfrigération commerciale et du transport frigorifique.

Son investissement au sein des équipes Engineering de Carrier Transicold et de Bonnet Réfrigération lui a permis de développer de nombreux produits et d'écrire de nombreux articles sur l'évolution de la technologie dans le domaine de la réfrigération.

Il est actuellement reconnu comme Expert Technique et Juridique en Réfrigération au niveau international et représente notamment Carrier au sein des associations professionnelles qui sont chargées de l'évolution des normes : IIF, Uniclimate, DIN, CEN, Transfrigoroute et CNEFIC.



Christopher Repice a obtenu une licence en génie mécanique à Clarkson University à Potsdam, NY, aux Etats-Unis, et une maîtrise en génie mécanique à Syracuse University à Syracuse, NY, aux Etats-Unis.

Il a plus de 16 ans d'expérience chez Carrier Corporation. Il a démarré sa carrière chez Carrier en tant que chercheur dans le domaine du développement des produits de pointe. Christopher a été chargé de la conception des produits, avec l'accent tout particulièrement mis sur les nouvelles technologies dans le domaine du transfert de chaleur dans un grand éventail de gammes de produits résidentiels et commerciaux. Il travaille à la division Carrier Transicold depuis 2002, et ses travaux portent sur les systèmes de conditionnement d'air et les systèmes frigorifiques utilisés dans le transport. Il est chef de projet dans le domaine du génie et responsable des produits destinés au transport frigorifique.



L'efficacité énergétique dans le transport frigorifique

par

Christopher Repice^(a), André Stumpf^(b)

Carrier Corporation, Transicold Division

^(a)Syracuse, NY 13221 Etats-Unis. e-mail : chris.repice@carrier.utc.com
^(b)Franqueville, France. e-mail : andre.stumpf@carrier.utc.com

L'industrie du transport frigorifique a besoin de critères permettant d'évaluer la consommation de carburant. Cet article, initialement présenté sous forme de communication lors du 22^e Congrès International du Froid de l'IIF tenu à Pékin du 21 au 26 août 2007, décrit un modèle permettant d'évaluer la consommation de carburant selon les diverses manières dont les utilisateurs emploient les équipements. Les concepts de réduction de consommation d'énergie seront exposés. Les résultats de cette étude seront également utilisés pour proposer un plan d'étiquetage énergétique en Europe.

I. INTRODUCTION

L'efficacité énergétique dans le transport frigorifique prend de plus en plus d'importance dans toutes les régions du monde. Les prix croissants du carburant et les préoccupations environnementales créent un besoin de mieux quantifier l'utilisation de carburant dans la chaîne du froid de la distribution. Les procédures d'évaluation qui existent actuellement varient selon les régions, mais il s'agit typiquement d'évaluations de la puissance en régime permanent, sans réelle information concernant l'utilisation du carburant. Ces critères d'évaluation des systèmes, tout en fournissant une base cohérente pour quantifier la puissance frigorifique, ne sont pas représentatifs de la véritable consommation de carburant par le produit en question. L'application par les utilisateurs d'équipements de transport frigorifique varie énormément, et l'efficacité nette de chaque système diffère de façon significative.

Les décalages notés plus haut entre (a) les applications dans le monde réel et les évaluations en régime permanent ; et (b) entre les applications elles-mêmes, démontrent tous deux la nécessité d'une procédure d'évaluation réaliste de l'efficacité des produits utilisés dans le transport frigorifique. Un tel système d'évaluation serait en mesure de fournir aux consommateurs les moyens de mieux comprendre la consommation de carburant selon chaque application spécifique.

Un passage en revue des facteurs influençant l'efficacité des produits utilisés dans le transport frigorifique sera effectué. Celui-ci sera suivi d'une évaluation des données réelles concernant les systèmes de transport frigorifique. Ces données seront utilisées pour projeter les variations de consommation de carburant basées sur les variations entre les applications, à la différence d'un système d'évaluation à partir d'un critère unique.

II. VUE D'ENSEMBLE

Comme la [Figure 1](#) l'illustre, le marché des systèmes de transport frigorifique est divisé en trois segments principaux :



Figure 1. Segments du marché des systèmes de transport frigorifique

Les groupes des petits camions sont entraînés directement par le moteur du véhicule, alors que ceux des grands camions et des semi-remorques fonctionnent grâce à un moteur diesel indépendant. Dans cette étude, l'accent est mis sur les semi-remorques frigorifiques, mais les résultats devraient permettre le développement d'une approche globale couvrant tous les types de transport frigorifique. La consommation de carburant est définie comme la quantité de carburant utilisée par le moteur diesel pour assurer les besoins de froid et de chaleur du système frigorifique.

L'efficacité des systèmes de transport frigorifique dépend de nombreux facteurs. La connaissance de ces facteurs, et les variations potentielles entre les utilisateurs, illustrent clairement la nécessité d'un protocole d'évaluation de l'efficacité.

II.1. Performance des groupes frigorifiques

Les méthodes d'évaluation des groupes frigorifiques se réfèrent généralement à la production frigorifique maximale du groupe sous deux conditions de fonctionnement. La première concerne les produits périssables, tels que les laitages, les viandes fraîches, les fruits et légumes, etc. La seconde est relative à des articles tels que les crèmes glacées et d'autres produits congelés.

Les conditions exactes de fonctionnement, pour l'évaluation, varient légèrement, selon le marché où s'effectuent les opérations. Sur le marché nord-américain, on utilise l'évaluation de l'ARI,¹ tandis que le marché européen a recours à l'évaluation ATP,² comme le montre le [Tableau 1](#).

Tableau 1. Critères d'évaluation de l'ARI et ATP

	Périssable		Congelé	
	Température du caisson	Température ambiante	Caisson	Température ambiante
Marché nord-américain (ARI)	1,7 °C	37,8 °C	-17,8 °C	37,8 °C
Marché européen (ATP)	0,0 °C 32 °F	30,0 °C 86 °F	-20,0 °C -4 °F	30,0 °C 86 °F

La procédure d'évaluation existante prend uniquement en compte la puissance frigorifique maximale à ces deux points de consigne. Cette pratique ne représente pas de façon exacte le profil de puissance de fonctionnement réelle du système au cours d'une année typique.

Il est à noter que l'efficacité du système frigorifique, en termes de consommation de carburant, est absente de la procédure d'évaluation existante. Mais une évaluation de l'efficacité dans ces conditions de fonctionnement ne représenterait pas l'efficacité réelle des systèmes lors du fonctionnement. De plus, des critères de mesure de la consommation du carburant doivent être définis. Les variations entre les diverses procédures des laboratoires et les techniques de mesures du carburant se traduiraient par un niveau d'incertitude important.

II.2. Types d'application par les utilisateurs

Les utilisateurs emploient les groupes frigorifiques de transport d'une façon très variée, mais ces applications peuvent généralement être divisées en deux segments principaux :

- **La distribution urbaine** : les utilisateurs ont habituellement des arrêts multiples au cours de la journée, avec un grand nombre de livraisons chaque jour. Ces utilisateurs ont un nombre d'ouvertures de porte élevé au cours d'un cycle quotidien habituel. Voir la [Figure 2](#).
- **Le transport longue distance** : dans ce cas, les utilisateurs effectuent de longs trajets sans accéder au chargement. Voir la [Figure 3](#).

L'évaluation de ces profils d'utilisation indique clairement que la consommation d'énergie dans chacun d'entre eux dépend de nombreux facteurs et varie de façon significative.

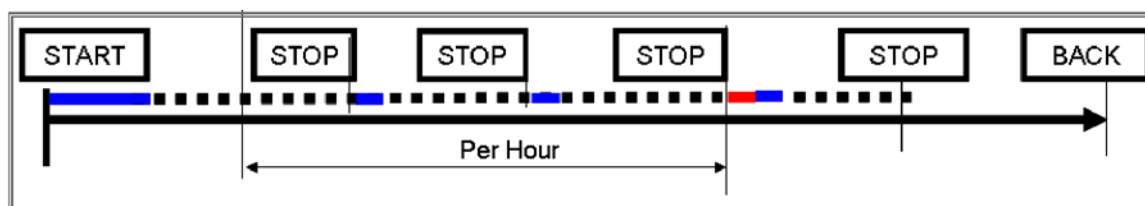


Figure 2. Profil typique de la distribution urbaine

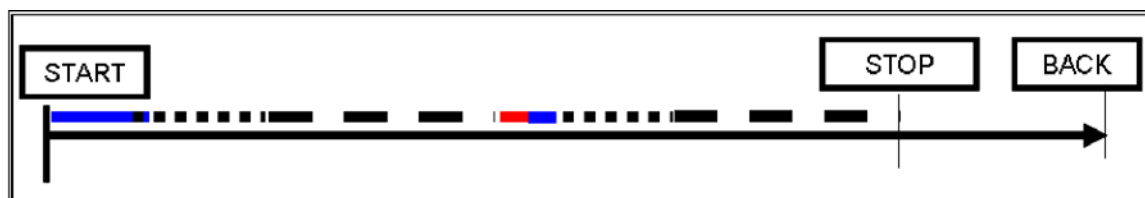


Figure 3. Profil typique du transport longue distance

II.3. Modes de fonctionnement

Dans le transport, le groupe frigorifique fonctionne selon plusieurs modes différents au cours d'un cycle annuel de fonctionnement typique. Pour chaque condition d'exploitation, le moteur et le compresseur peuvent fonctionner à divers niveaux de production de froid. Voir dans le [Tableau 2](#) la description des divers modes de fonctionnement. L'utilisateur peut sélectionner le mode de fonctionnement (« marche-arrêt » ou « régulation »), qui pourrait se traduire par une efficacité nette en termes de carburant, variant de façon significative dans un cycle de fonctionnement donné.

Tableau 2. Modes de fonctionnement des groupes

Descente en température	Fonctionnement habituel du moteur à grande vitesse pour abaisser le plus rapidement possible la température à l'intérieur de la remorque jusqu'au point de consigne
Marche-arrêt	Maintien de la température à l'intérieur de la remorque à un point de consigne inférieur à la température ambiante grâce à un cycle marche-arrêt
Mode « régulation »	Maintien de la température à l'intérieur de la remorque à un point de consigne inférieur à la température ambiante grâce au fonctionnement « régulation » du système frigorifique et un cycle alternant entre modes de refroidissement et de chauffage
Chauffage	Maintien de la remorque à un seuil déterminé supérieur à la température ambiante grâce au chauffage
Dégivrage	Le système de refroidissement s'arrête pour dégivrer le serpentin de l'évaporateur

II.4. Autres facteurs

D'autres paramètres d'application et de fonctionnement peuvent avoir un impact significatif sur l'efficacité en termes de consommation de carburant, comme le montre le [Tableau 3](#).

Tableau 3. Application du système et paramètres de fonctionnement

Caractéristiques remorque	Paramètres tels que : la taille des remorques, la qualité de l'isolation et le taux de fuite
Taille et type de cargaison	Le type et l'importance de la charge dans la remorque produit des variations de masse de masse thermique, de chaleur de respiration, et de charge latente
Climat	Profil de la température ambiante et de l'humidité
Régulation de la température	Le mode de fonctionnement « régulation » ou « marche-arrêt » sera sélectionné par l'utilisateur selon les exigences concernant l'exactitude de la régulation de la température
Paramètres marche-arrêt	Périodes minimales de marche et d'arrêt
Type de produit	Certains produits nécessitent une régulation plus stricte de la température que d'autres pour maintenir la qualité des produits alimentaires

III. QUANTIFICATION DE L'UTILISATION REELLE

Il est clair que la conception et l'application du groupe frigorifique peuvent toutes deux avoir un effet significatif sur la consommation d'énergie annuelle. Afin de quantifier les véritables caractéristiques de la performance d'un groupe pour semi-remorque, une étude a été menée afin d'obtenir des données sur le fonctionnement des systèmes sur le terrain. Les données ont été collectées à partir d'un total de 189 groupes sur le terrain. Ces groupes étaient strictement destinés à des applications de transport longue distance sur le marché nord-américain.

III.1. Température ambiante

La [Figure 4](#) illustre la distribution des températures de l'air ambiant rassemblées à partir de toutes les données disponibles. Cette distribution représente l'ensemble des trajets effectués par les 189 semi-remorques entre diverses régions d'Amérique du nord. Le profil de la température ambiante moyenne suivait une distribution normale, centrée autour de 22 °C. Comme prévu, ce chiffre est significativement inférieur aux conditions d'évaluation de l'ATP (30,0 °C) et de l'ARI (37,8 °C), ce qui se traduit par un niveau de consommation de carburant inférieur.

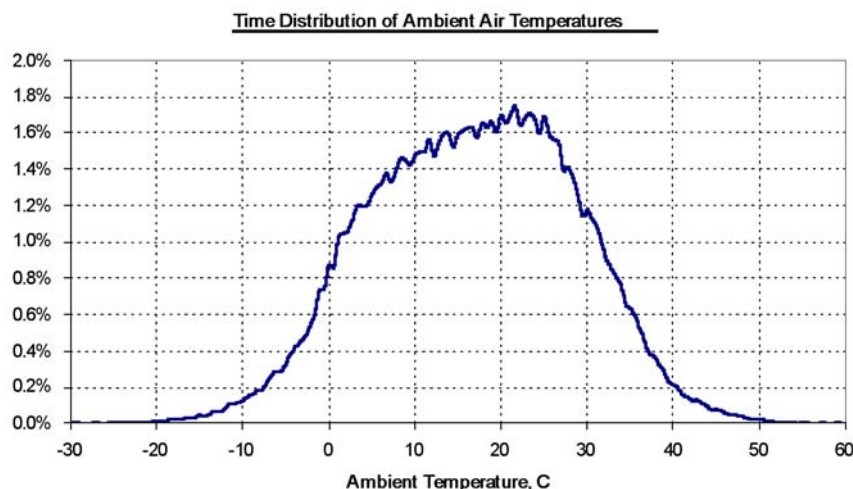


Figure 4. Distribution dans le temps de la température de l'air ambiant

III.2. Température des points de consigne

La [Figure 5](#) montre la distribution dans le temps des températures des points de consigne obtenus à partir de toutes les données disponibles. La distribution est dominée par un pic du point de consigne dans la région de la congélation à -23 °C qui représente environ 40 % de toute la durée de fonctionnement des groupes. Plusieurs groupes de points de consigne dans la région de la température des produits périssables fonctionnaient dans la gamme des -2 à 3 °C, ce qui représente l'essentiel des autres résultats de l'opération. Ces points de consigne sont proches des conditions d'évaluation de l'ARI/ATP. A noter, le faible nombre de points de consigne inférieurs à -23 °C.

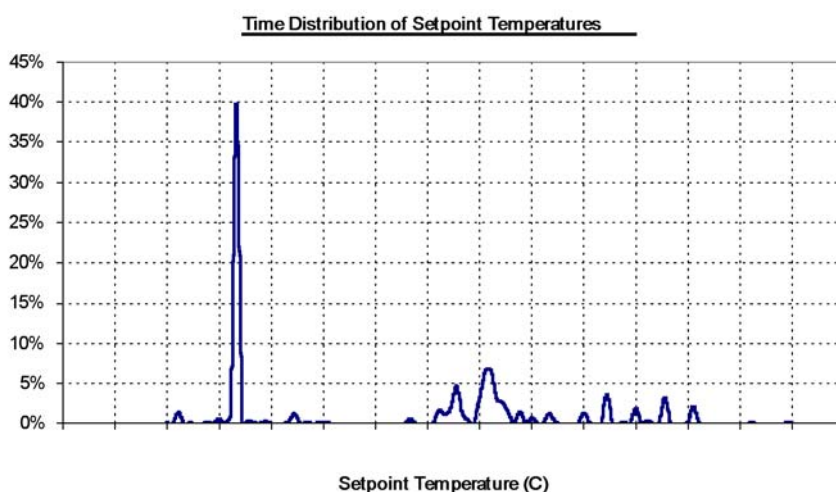


Figure 5. Distribution dans le temps des points de consigne

III.3. Différence entre la température ambiante et celle du caisson

La [Figure 6](#) montre la distribution dans le temps de la différence de température entre la température ambiante extérieure et la température à l'intérieur du caisson frigorifique. Ceci est une indication de la charge thermique du groupe frigorifique, basée sur les pertes ou les gains de chaleur entre le caisson frigorifique et l'extérieur. La différence de température la plus fréquente entre le milieu ambiant et le caisson était de 22 °C en mode de fonctionnement « régulation » et de 35 °C en mode marche-arrêt. A noter que les conditions d'évaluation de l'ARI/ATP prévoient des différences de température supérieures de 50 % à celles observées dans l'utilisation habituelle. Alors que ces niveaux de différence de température extrêmes sont observés sur le terrain, ils ne sont pas pour autant représentatifs des conditions de fonctionnement habituelles.

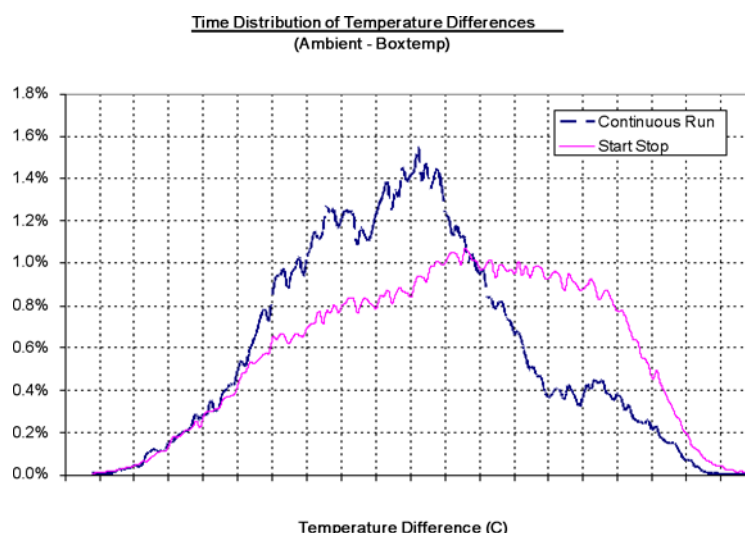
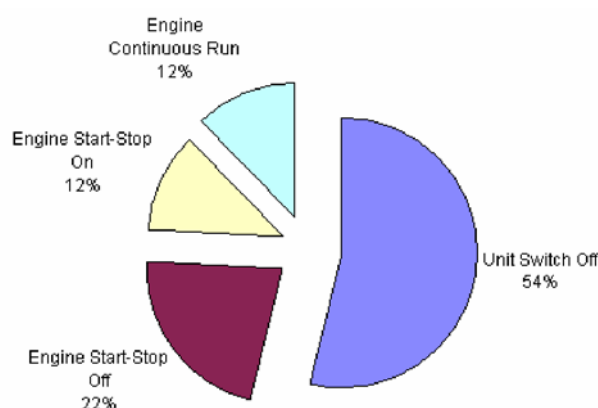


Figure 6. Distribution dans le temps des différences de température (ambiante/caisson frigorifique)

III.4. Modes de fonctionnement des systèmes

La [Figure 7](#) montre la répartition des données concernant les modes de fonctionnement du système. A noter qu'en mode « marche-arrêt » le moteur est à l'arrêt environ 65 % du temps.



Modes de fonctionnement des systèmes	Pourcentage annuel	Heures/an
Groupe en position « arrêt »	54 %	4730
Groupe en mode « marche-arrêt », moteur à l'arrêt	22 %	1928
Groupe en mode « marche-arrêt », moteur en marche	12 %	1051
Groupe en mode « régulation »	12 %	1051
Total	100 %	8760

Figure 7. Modes de fonctionnement des systèmes

III.5. Modes de régulation

Le [Tableau 4](#) montre une répartition des modes de régulation « marche-arrêt », « régulation » et combinés.

Tableau 4. Données sur le mode de régulation

Modes de fonctionnement des systèmes	Marche-arrêt		Régulation	
	Pourcentage	Heures	Pourcentage	Heures
Moteur à l'arrêt	64 %	1910	0 %	0
Mode de refroidissement, faible vitesse	11 %	312	94 %	991
Mode de refroidissement, vitesse élevée	23 %	685	4 %	42
Mode chauffage	2 %	72	2 %	18
Total	100 %	2979	100 %	1051

IV. CORRELATION DU CYCLE D'UTILISATION AVEC L'UTILISATION INTEGREE DE CARBURANT

Un modèle a été créé pour mettre en corrélation le cycle moyen d'utilisation d'un groupe frigorifique avec la consommation annuelle de carburant. Ce modèle tient compte des caractéristiques de fonctionnement du groupe frigorifique, ainsi que des applications spécifiques recensées lors de l'analyse sur le terrain. Cette information a été collectée sur une année, prenant en compte la consommation supplémentaire de carburant pour des fonctions telles que la descente en température et le dégivrage. En utilisant ce modèle, il est possible de calculer la répartition pour l'application de transport longue distance comme le montre la [Figure 8](#). Il apparaît que le mode « marche-arrêt » dans le transport de denrées congelées représente plus de la moitié de la consommation annuelle de carburant, suivie par ordre d'importance par le mode « régulation/périssable » ainsi que la descente en température.

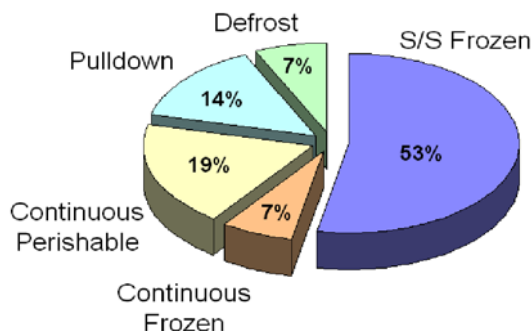


Figure 8. Profil annuel d'utilisation : transport longue distance

IV.1. Ecart entre l'efficacité du mode d'évaluation ATP et les conditions réelles

Le profil typique de fonctionnement du système n'est pas représenté par les conditions d'évaluation ATP pour la vitesse élevée. De même, un système d'évaluation de l'efficacité du carburant aux conditions ATP ne représenterait pas de façon précise la consommation réelle. Le [Tableau 5](#) montre la consommation de carburant en plusieurs modes de fonctionnement et les conditions ambiantes normalisées par rapport aux conditions d'évaluation ATP.

Tableau 5. Consommation de carburant normalisée

Mode de fonctionnement	30 °C ambiant	20 °C ambiant	2 °C ambiant
« Marche-arrêt », denrées congelées	0,50	0,34	0,15
« Régulation », denrées congelées	0,52	0,48	0,43
« Régulation », denrées périssables	0,50	0,44	0,43
Refroidissement maximal (descente en température)	1,00*	0,97	0,93

*1,0 = consommation de carburant selon l'évaluation ATP (0 à 30 °C)

Ces données montrent que la condition ATP correspondant à 0 à 30 °C représente la consommation de carburant du groupe dans le cas le plus défavorable. La consommation de carburant du groupe est nettement inférieure dans les conditions de fonctionnement habituelles.

IV.2. Variation dans la consommation de carburant par application

La documentation provenant de l'application de transport longue distance étaye le concept selon lequel l'application du groupe et les conditions de fonctionnement auront une incidence sur la consommation annuelle de carburant. La [Figure 8](#) peut être utilisée pour examiner une application évaluée pour une application de livraison urbaine. Le cycle d'utilisation varie comme il est montré dans le [Tableau 6](#), mais les heures totales de fonctionnement seront considérées comme constantes sur l'année. Comme le montre le [Tableau 6](#), on projette une augmentation de la consommation de carburant de 16 % pour l'estimation pour la livraison urbaine, en raison d'un fonctionnement supplémentaire en mode « régulation », une consommation accrue pour les descentes en température et les dégivrages plus nombreux, en raison des ouvertures plus fréquentes des portes.

Tableau 6. Consommation comparée de carburant : transport longue distance/livraison urbaine

Modes de fonctionnement du système	Longue distance	Livraison urbaine
Mode marche-arrêt point de consigne congélation	53 %	2 %
Mode « régulation », point de consigne congélation	7 %	18 %
Mode « régulation », point de consigne périssables	19 %	28 %
Refroidissement maximal (descente en température)	14 %	40 %
Dégivrage	5 %	10 %
Chauffage	2 %	2 %
Consommation annuelle de carburant normalisée	1.00	1.16

V. CONCLUSION

Cet article a été rédigé afin d'exposer les variables pouvant affecter l'efficacité des groupes frigorifiques utilisés dans le transport. Le cycle d'utilisation d'un système frigorifique pour semi-remorque a été présenté, sur la base d'une étude menée sur le terrain. Il a été démontré que ce cycle d'utilisation varie significativement par rapport aux conditions d'évaluation de l'ARI et ATP. Un modèle a été créé pour évaluer la consommation annuelle de carburant pendant ce cycle habituel d'utilisation. A partir de là, il a été établi que les évaluations à partir de points de consigne fixes n'étaient pas représentatifs du véritable fonctionnement suivi au cours d'une année complète. De plus, on a montré que les variations entre les applications de transport longue distance et de livraison urbaine pouvaient avoir un impact significatif sur la consommation annuelle de carburant.

Les modèles de simulation sont faciles à ajuster, mais il est nécessaire d'avoir une connaissance précise des divers modes de fonctionnement des systèmes. Des essais spécifiques en laboratoire doivent être développés puis appliqués pour déterminer la consommation d'énergie spécifique de tous les modes de fonctionnement. Il est nécessaire de considérer que l'algorithme de régulation est de plus en plus sophistiqué, de façon à répondre à tous les aspects du fonctionnement du produit.

Néanmoins, la principale difficulté sera de simuler l'utilisation véritable du système et d'établir un cycle d'utilisation normalisé. Le processus a été lancé avec des données réelles provenant de 189 groupes pour semi-remorque ; il est clair que le processus deviendra plus précis avec un plus grand nombre de données obtenues sur le terrain. Cette approche a le mérite de créer un lien étroit avec nos clients et les utilisateurs finaux de façon à établir une simulation qui représente la vie réelle des groupes frigorifiques. Un des problèmes les plus importants est la mise en place de technologies de suivi efficaces permettant de télécharger des données obtenues sur le terrain. Cette technologie est disponible, mais actuellement, les utilisateurs ne sont pas motivés pour rassembler ces données. Cette technologie devrait être adaptée pour contrôler la consommation d'énergie de façon directe ou indirecte. Nous sommes convaincus que cette approche est scientifiquement robuste et pourrait contribuer à l'amélioration des critères futurs des essais (ATP, JIS et ARI) qui ont traditionnellement été mis en place pour les essais calorimétriques.

La mise en œuvre de nouvelles réglementations visant à résoudre des problèmes d'économies d'énergie (par exemple la Directive Européenne concernant les produits consommateurs d'énergie, l'EuP) va s'intensifier. Les pressions politiques s'adressent au problème dans son ensemble, mais les données actuelles disponibles concernant la charge totale ne seront pas suffisamment robustes pour contribuer à trouver des solutions. Seuls les données exactes et des essais sur les niveaux d'efficacité reflétant la réalité seront en mesure d'offrir une contribution en vue d'une solution, telle qu'un plan d'étiquetage énergétique. Sans cela, la validité de l'étiquetage énergétique ou de toute autre information pédagogique concernant l'efficacité énergétique des produits destinés aux consommateurs serait discutable et contreproductive dans une politique d'efficacité énergétique.

Nous espérons que les informations présentées dans cet article serviront à convaincre les autorités que notre entreprise soutiendra des politiques en faveur de l'efficacité énergétique. De cette manière, les utilisateurs finaux seront mieux informés sur l'efficacité lors du fonctionnement des produits qu'ils achètent et utilisent.

REFERENCES

1. Air Conditioning and Refrigeration Institute, 2001. *Standard 1110: Mechanical Refrigeration Transport Units*.
2. ATP, 2003. *Agreement on the International Carriage of Perishable Foodstuffs and on the Special Equipment to be Used for such Carriage*.
3. Japanese Standards Association, 1994. *Testing Method for Mechanical Transport Refrigeration Units*.