

IMPACT DE L'UTILISATION DE NOUVEAUX FLUIDES FRIGORIGENES SUR LES PERFORMANCES ENERGETIQUES DES CLIMATISEURS DOMESTIQUES

S. Maalej¹, M.C. Zaghoudi^{1*}, M. Bouchaala²

¹ Institut National des Sciences Appliquées et de Technologie (INSAT), Unité de Recherche Matériaux
Mesures et Applications (MMA), Centre Urbain Nord BP N°676- 1080 Tunis, Tunisie,
chaker.zaghoudi@insat.rnu.tn

² Société de Matériel de Climatisation (SMC-YORK), 71 Rue 8601 Zone Industrielle Charguia I -2035 Tunis-
Carthage, Tunisie,

RESUME

Ce papier présente les résultats de simulation des performances thermodynamiques d'un climatiseur fonctionnant avec de nouveaux fluides frigorigènes destinés au remplacement du R-22 et dont le potentiel de destruction de l'ozone (ODP) est pratiquement nul. Parmi les fluides susceptibles de remplacer le R-22, nous avons sélectionné les fluides suivants : R-123, R-134a, R-141b, R-142b, R-290 (pentane), R-404A, R-407C, R-410A et R-600 (butane). Le R-134a et le R-290 fournissent des performances analogues à celles obtenues avec le R-22. Pour le R-404A, R-407C et le R-410A, les COP sont inférieurs à ceux obtenus avec le R-22. Cependant, les COP obtenus pour le R-123, le R-141b, le R-142b et le R-600 sont plus élevés que ceux obtenus avec le R-22.

1. INTRODUCTION

Les systèmes de climatisation connaissent une forte croissance. Cet engouement peut être lié au souci légitime de nos citoyens pour leur confort en période estivale, et à leur volonté de se prémunir, eux et leurs proches, contre les effets de la canicule. Malheureusement, les appareils climatiseurs ont aussi leurs effets pervers : forte dépense énergétique, émission de polluants et de gaz à effet de serre.

Après la signature du fameux protocole de Montréal en septembre 1987, les ChloroFluoCarbures (CFC) sont destinés à disparaître car ils détruisent la couche d'ozone. Ainsi, des fluides comme le R11, le R113, le R114, le R115 et le R500 ne seront plus utilisés ni en réfrigération (domestique ou commerciale) ni en climatisation. A Londres, en juin 1990, le R13 et le R503 sont ajoutés aux produits précédents. Mais, en plus, l'élimination des HydroChloroFluoroCarbures (HCFC) est envisagée avant 2040. Ainsi, des fluides comme le R12, le R22 et le R502 sont principalement visés. Après plusieurs révisions du protocole initial, les choses se sont bien précisées aujourd'hui puisque les CFC ne sont plus fabriqués depuis le 1^{er} Janvier 1995 (seuls les CFC récupérés pourraient être encore utilisés). Les HCFC bénéficient, pour l'instant, d'un sursis jusqu'en 2015 mais leur utilisation dans les appareils neufs est interdite depuis le 1^{er} janvier 2004. Pendant ce temps, une multitude de nouveaux fluides est apparue sur le marché, soit pour la réalisation d'installations neuves, soit pour permettre de maintenir le fonctionnement des installations existantes.

Pour les installations neuves, il s'agit de nouveaux fluides HFC (HydroFluorocarbures) dont l'action sur l'environnement est négligeable. Parmi ces fluides considérés comme définitifs, les plus connus aujourd'hui sont le R134a, le R404A, le R407C et le R410A. Le R134a est destiné à remplacer définitivement le R12 pour les applications hautes et moyennes température (très utilisé en climatisation automobile). Le R404A est destiné à remplacer définitivement le R502 (et de plus en plus le R12) pour les applications moyennes et basses températures. Le R407C et le R410A sont destinés à remplacer le R22 dans les applications de climatisation.

Pour les installations existantes fonctionnant avec un CFC, on utilise un fluide de transition permettant un minimum de modifications sur l'installation. Parmi ces fluides, on distingue le FX56,

le DP40, le FX10, le HP80, etc. Ces fluides sont des mélanges de fluides HFC et HCFC, ce qui signifie qu'ils sont concernés par la réglementation et qu'ils disparaîtront également à moyen terme. On les utilise donc pour prolonger la vie d'une installation existante à moindre frais.

L'utilisation des nouveaux fluides HFC soulève des problèmes au niveau du montage des installations frigorifiques, de leur maintenance et de leurs performances. La plupart de ces problèmes existaient déjà avec les autres fluides mais ils se trouvent amplifiés par la nature même des HFC.

Ce travail a pour but d'étudier l'impact de l'utilisation de certains nouveaux fluides frigorigènes sur les performances énergétiques des climatiseurs domestiques destinés au marché tunisien.

2. SELECTION DES FLUIDES FRIGORIGNES

Plusieurs études [1-16] ont été effectuées afin de proposer des fluides candidats au remplacement du R-22. Les résultats théoriques et expérimentaux publiés à ce jour permettent de dégager les points suivants :

- Les fluides frigorigènes considérés sont : (i) des fluides purs tels que le R-134a, le R-125, le R-153a, le R-290, le R-600, (ii) des mélanges binaires de fluides tels que le mélange CARE50 (butane+éthane), le mélange (R-32+R-134a) à différentes compositions massiques, le R-410A (R-32 (50%)+R-134a(50%)), et (iii) des mélanges ternaires de fluides tels que le R-407C (R-32 (30%)+R-125(10%)+R-134a(60%)) ou bien le mélange (R-32+R-125+R-134a) à différentes compositions massiques,
- Les performances énergétiques obtenues dépendent de la nature des fluides frigorigènes candidats pour la substitution du R-22,
- Les fluides frigorigènes conditionnent le choix des compresseurs et par conséquent, ils affectent la consommation électrique,
- Certains problèmes techniques, qui surgissent à cause de la substitution du R-22, ne sont pas explicitement présentés (problème de la pression, choix des composants, compatibilité avec les huiles, compatibilité avec les matériaux, etc.),
- Les systèmes étudiés sont très variés (pompes à chaleur essentiellement). Rares sont les essais effectués sur des systèmes commercialisés (peut être ceci est dû à un problème de confidentialité),
- Les essais ne correspondent pas à ceux fixés par les normes et restent des essais de laboratoire,
- Les conditions des essais ne correspondent pas forcément aux conditions de fonctionnement dans des pays ayant un climat chaud tel que le climat tunisien.

L'étude bibliographique a permis de dégager certains nouveaux fluides frigorigènes susceptibles de remplacer le R-22. Dans ce travail, nous avons sélectionné les fluides suivants : R-123, R-134a, R-141b, R-142b, R-290 (pentane), R-404A, R-407C, R-410A et R-600 (butane).

En comparant cette liste à celle trouvée dans la littérature, il est clair que certains fluides n'y figurent pas. On peut citer par exemple le R-123, le R-141b, le R-142b et le R-404A. Nous les avons intégrés parmi les nouveaux fluides susceptibles de remplacer le R-22 en se basant sur leurs propriétés physiques.

Afin d'étudier théoriquement l'impact de ces fluides sur les performances énergétiques du climatiseur, il est judicieux d'analyser le cycle frigorifique et de définir certaines grandeurs fondamentales.

2. MODELISATION DES PERFORMANCES ENERGETIQUES DES CLIMATISEURS

Le climatiseur est modélisé en considérant ses différents composants principaux (Figure1): le compresseur, le condenseur, la ligne liquide, le détendeur, l'évaporateur et le fluide frigorigène. Le fonctionnement du climatiseur est alors simulé en considérant un cycle frigorifique comprenant 11 points correspondant à différents états du fluide frigorigène : (1) l'entrée du fluide frigorigène dans

la cloche du compresseur, (2) l'entrée à la chambre de compression avant compression, (3) sortie de la chambre de compression après compression, (4) l'entrée du condenseur, (5) la phase vapeur saturée dans le condenseur, (6) la phase liquide saturé dans le condenseur, (7) la sortie du condenseur, (8) l'entrée du détendeur, (9) la sortie du détendeur ou l'entrée, (10) la phase vapeur saturée dans l'évaporateur, (11) la sortie de l'évaporateur.

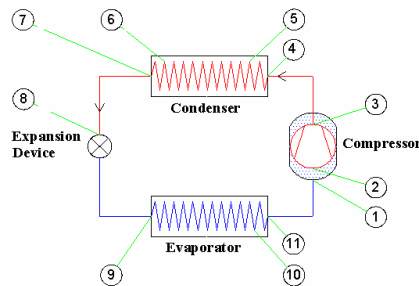


Figure 1. Système modélisé

Les paramètres d'entrée du modèle sont :

- le fluide frigorigène (pur ou mélange),
- la puissance frigorifique : celle-ci est fixée à 9000 BTU/h (2,632 kW),
- le rendement isentropique du compresseur = 0,8 (valeur moyenne obtenue en exploitant les données de différents fournisseurs de compresseurs),
- le rendement volumétrique = 0,82,
- le rendement du moteur électrique = 0,9,
- le glissement au condenseur et à l'évaporateur (pour les mélanges),
- la température d'évaporation T_o : variable entre -5°C et 10°C (pour le fonctionnement en mode chaud du climatiseur), ce qui correspond à des températures extérieures moyennes comprises entre 13°C et 28°C ,
- la température de condensation T_k : variable entre 45° et 60°C (pour le fonctionnement en mode froid du climatiseur), ce qui correspond à des températures extérieures moyennes comprises entre 30°C et 45°C ,
- la surchauffe SC : elle est fixée à 7°C ,
- le sous-refroidissement SR : il est fixé à 5°C .
- Les puissances électriques consommées par les ventilateurs et les organes de contrôle et de régulation :
 - la puissance électrique consommée par le ventilateur intérieur est fixée à 300 W,
 - la puissance électrique consommée par le ventilateur extérieur est fixée à 400 W,
 - la puissance électrique consommée par les organes de régulation et de contrôle est fixée à 100 W,

Les paramètres de sortie sont :

- les températures, les pressions, les enthalpies, les entropies et les titres massiques du mélange liquide-vapeur pour les 11 points du circuit frigorifique modélisé,
- la puissance électrique consommée par le compresseur, $P_{\text{él}}$,
- la puissance électrique consommée par le système, $P_{\text{élesys}}$ (compresseur+ventilateurs+organes de régulation et de contrôle),
- la puissance calorifique rejetée au condenseur P_c ,
- la puissance frigorifique absorbée à l'évaporateur P_f ,
- le coefficient de performance du système $\text{COP}_c = P_c/P_{\text{élesys}}$ (mode chaud) et $\text{COP}_f = P_f/P_{\text{élesys}}$,
- le débit massique du fluide frigorigène,
- le taux de compression $\delta = P_k/P_o$ où P_k et P_o sont respectivement les pressions de condensation et d'évaporation.

La Figure 2 illustre un exemple des résultats obtenus pour le R-22 ($T_k = 45^\circ\text{C}$ et $T_o = 5^\circ\text{C}$). Le cycle frigorifique est tracé sur un diagramme P-h (Pression – Enthalpie). Il comporte : (i) une transformation polytropique (loi de variation de la pression en fonction du volume : $PV^k = \text{constante}$) qui correspond à la phase de compression 2-3. Cette transformation s'effectue dans le compresseur, (ii) une transformation isobare qui correspond aux phases successives suivantes : une désurchauffe du gaz (3-5), une condensation (5-6) et un sous-refroidissement (6-7). Cette transformation s'effectue dans le condenseur, (iii) une détente isenthalpique qui s'effectue dans le détendeur, (iv) une transformation isobare qui correspond à une évaporation (9-10) et une surchauffe (10-1).

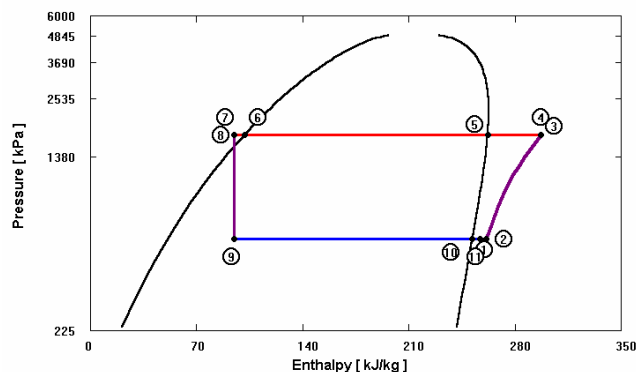


Figure 2 : Cycle frigorifique représenté sur le diagramme (P-h) (R22, $T_k = 45^\circ\text{C}$, $T_o = 5^\circ\text{C}$)

3. RESULTATS ET ANALYSES

3.1 Etude du taux de compression

Sur la Figure 3a sont représentées les variations du taux de compression en fonction de la température d'évaporation T_o . La température de condensation T_k est fixée à 45°C . Le taux de compression diminue lorsque la température d'évaporation augmente. Sur la Figure 3b sont représentées les variations du taux de compression en fonction de la température de condensation. La température d'évaporation est fixée à 5°C . Le taux de compression augmente lorsque la température de condensation augmente. Excepté le R-290, tous les fluides fournissent des taux de compression plus élevés que ceux obtenus avec le R-22. Le R-123, le R-141b, le R-410A et le R-407C fournissent des taux de compressions supérieurs à 5 pour les basses températures d'évaporation (inférieures à 0°C) et les fortes températures de condensation (supérieures à 55°C). Ces fluides nécessitent donc des compresseurs plus gros ou des compresseurs multi-étagés.

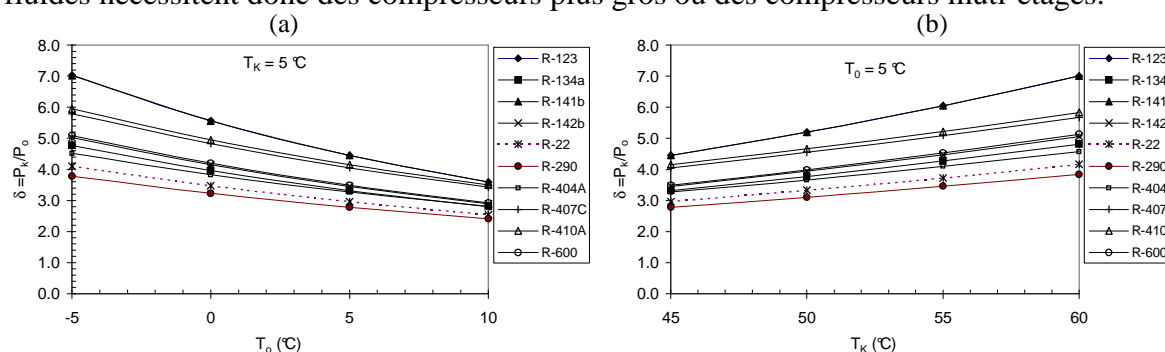


Figure 3. Evolutions du taux de compression δ en fonction de T_o et T_k

3.2 Etude de la puissance électrique consommée

Les évolutions de la puissance électrique consommée par le compresseur sont représentées sur la Figure 4 en fonction respectivement des températures d'évaporation ($T_k = 45^\circ\text{C}$) et de condensation ($T_o = 5^\circ\text{C}$). La puissance électrique diminue avec la température d'évaporation alors qu'elle augmente avec la température de condensation. Les évolutions de l'écart entre la puissance

électrique consommée par un compresseur fonctionnant avec un nouveau fluide frigorigène et celle consommée par un compresseur R-22 sont représentées sur la Figure 5a. Les compresseurs fonctionnant au R-404A, R-407C et R-410A consomment entre 20 et 30 % de plus qu'un compresseur R-22. Cependant, les compresseurs fonctionnant au R-123, R-141b, R-142b et R-600 consomment entre 5 et 15 % moins qu'un compresseur R-22.

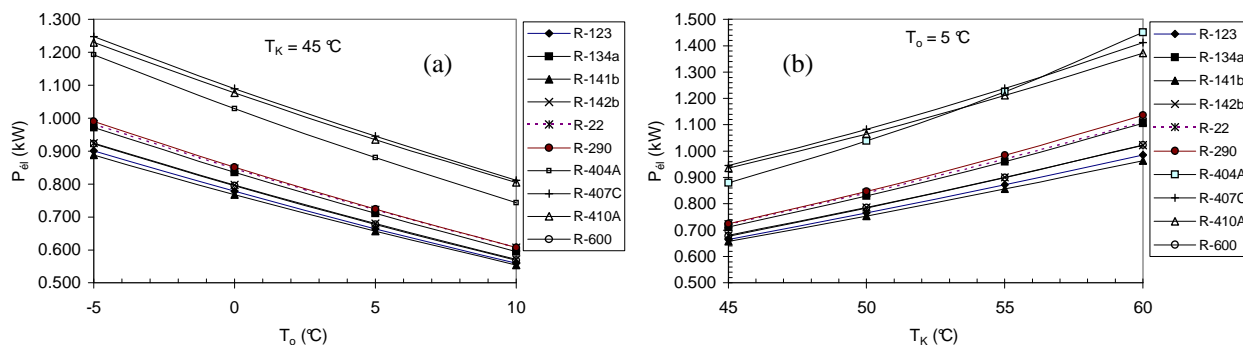


Figure 4. Evolutions de la puissance électrique en fonction de T_o et T_k

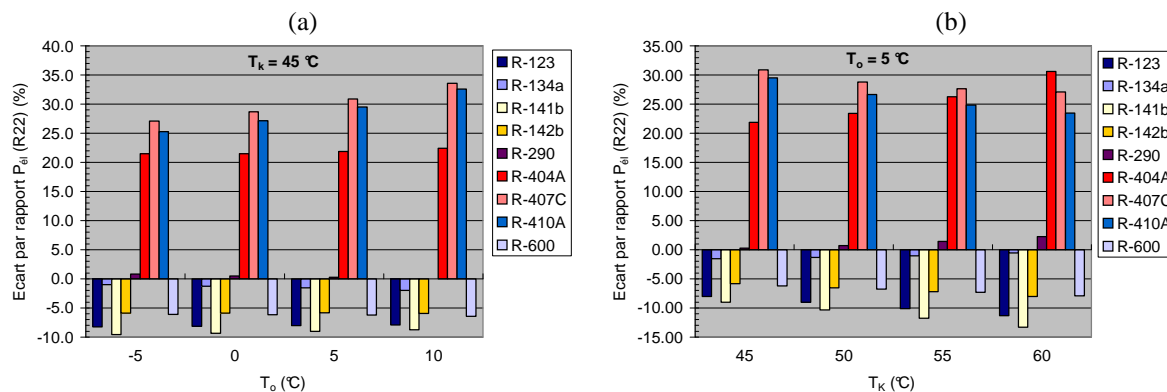


Figure 5. Comparaison des puissances électriques consommées par un compresseur fonctionnant avec un nouveau fluide frigorigène à celles consommées par des compresseurs R-22

3.3 Etude du coefficient de performance

Les évolutions du COP_c en mode chaud sont présentées sur la Figure 6a pour différentes températures d'évaporation ($T_k = 45 \text{ °C}$). Le COP_c augmente lorsque la température d'évaporation augmente. Les évolutions de l'écart entre les COP_c obtenus avec les nouveaux fluides frigorigènes et ceux obtenus avec le R-22 sont représentées sur la Figure 7a. Le R-134a et le R-290 fournissent des COP_c similaires à ceux fournis par le R-22. Les COP_c obtenus avec le R-404A, le R-407C et le R-410A sont inférieurs de 15 à 20% à ceux obtenus avec le R-22. Les COP_c obtenus avec le R-123, le R-141b, le R-142b et le R-600 sont supérieurs de 5 à 8 % à ceux obtenus avec le R-22. Il est à noter que dans ces conditions, le R-407C et le R-404A fournissent les plus faibles COP_c . Les évolutions du COP_f en mode froid sont présentées sur la Figure 6b, pour différentes températures de condensation ($T_o = 5 \text{ °C}$). Le COP_f diminue lorsque la température de condensation augmente. Les évolutions de l'écart entre les COP_f obtenus avec les nouveaux fluides frigorigènes et ceux obtenus avec le R-22 sont représentées sur la Figure 7b. Le R-134a et le R-290 fournissent des COP_f similaires à ceux fournis par le R-22. Les COP_f obtenus avec le R-404A, le R-407C et le R-410A sont inférieurs de 15 à 45% à ceux obtenus avec le R-22. Le R-123, le R-141b, le R-142b et le R-600 permettent d'obtenir des COP_f 5 à 8 % supérieurs à ceux obtenus avec le R-22. Il est à remarquer que, dans ces conditions, le R-404A et le R-410A sont les fluides qui fournissent les plus faibles COP_f .

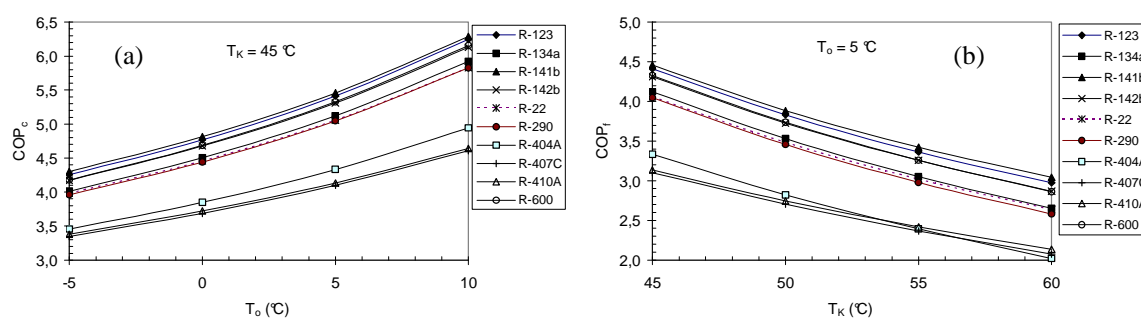


Figure 6. Evolutions du COP_c en fonction de T_o et du COP_f en fonction de T_k

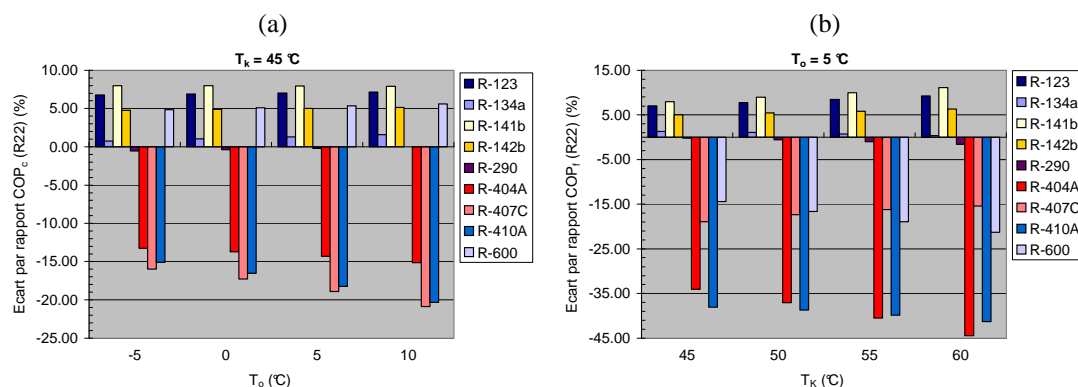


Figure 7. Comparaison des coefficients de performance par rapport à ceux obtenus avec le R-22

4. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons étudié théoriquement l'impact de nouveaux fluides frigorigènes sur les performances énergétiques des climatiseurs. Ces fluides sont : le R-123, le R-134a, le R-141b, le R-142b, le R-290 (pentane), le R-404A, le R-407C, le R-410A, le R-600 (butane). Les conclusions sont les suivantes :

1. le R-134a et le R-290 (pentane) fournissent des performances analogues à celles obtenues avec le R-22. En effet, les puissances électriques consommées par les compresseurs utilisant ces fluides, les COP_c obtenus en mode chaud et les COP_f obtenus en mode froid sont comparables à ceux obtenus avec le R-22. Néanmoins, il faudrait être prudent quant à l'utilisation du R-290. En effet, le R-290 est un hydrocarbure inflammable et des normes de sécurité sévères s'imposent pour l'utilisation de ce fluide.
2. En modes chaud et froid, les compresseurs fonctionnant au R-404A, R-407C et R-410A consomment de 22 à 33 % plus que ceux fonctionnant au R-22. Les COP_c obtenus en mode chaud sont 13 à 21 % inférieurs à ceux obtenus avec le R-22. Les COP_f obtenus en mode froid sont 15 à 45% inférieurs à ceux obtenus avec le R-22. La dégradation des coefficients de performance est notable pour les fortes températures d'évaporation et de condensation.
3. Le R-123, le R-141b, le R-142b et le R-600 paraissent des fluides intéressants. En effet, ces fluides permettent d'obtenir des consommations électriques jusqu'à 13% plus faibles que celles obtenues avec des compresseurs utilisant le R-22. Les COP obtenus avec ces fluides en modes chaud et froid sont 10 % plus élevés que ceux obtenus avec le R-22. Cependant, il faut remarquer le R-600 est un hydrocarbure et les mêmes remarques que celles formulées pour le R-290 sont valables. Par ailleurs, le R-123 et le R-141b permettent d'avoir des faibles pressions dans le circuit frigorifique (en dessous de la pression atmosphérique pour les faibles températures d'évaporation) et il faudrait une tenue importante au vide de ces circuits.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] P.A. Domanski, D.A. Didion, 1993, "Thermodynamic evaluation of R-22 alternatives refrigerants and refrigerant mixtures", *ASHRAE Transactions* 99, Part 2, pp. 636-648.

- [2] S.K. Fischer, J.R. Sand, 1993, "Screening analysis for chlorine free alternative refrigerants to replace R-22 in air conditioning applications", *ASHRAE Transactions* 99, Part 2, pp. 627-635.
- [3] S. Chen, J.F. Judge, R. Groll, R. Radermacher, 1994, "Theoretical analysis of hydrocarbon refrigerant mixtures as a replacement for R-22 for residual uses", *International Refrigeration Conference at Perdue*, Perdue University, West Lafayette, Indiana, USA, D.R. Tree, J.E. Braun (Eds), pp. 225-230.
- [4] D.S. Godwin, 1994, "Alternative refrigerants evaluation program (AREP) compressor calorimeter and system drop-in tests with R-22 alternatives", *Report – Air-Conditioning and Refrigeration Institute*, March, Arlington, Virginia 22203, USA.
- [5] S. Masanobu, O. Akihiro, N. Yoshiyuku, S. Haruki, W. Koichi, K. Noboru, Y. Toshiya, 1994, "Performance of refrigeration cycle with R-32/134a and R-32/R-125 based on the reliable thermodynamic property data", *International Refrigeration Conference at Perdue*, Perdue University, West Lafayette, Indiana, USA, D.R. Tree, J.E. Braun (Eds), pp. 67-72.
- [6] K.N. Mumpower, M.B. Shiflett, 1994, "Calorimeter experiments with SUVA AC9000", *International Refrigeration Conference at Perdue*, Perdue University, West Lafayette, Indiana, USA, D.R. Tree, J.E. Braun (Eds), pp. 61-66.
- [7] M. Barreav, P. Weiss, P. Fauvarque, 1995, "Field testing using R-22 replacements", *Proceedings of International CFC and Halon Alternatives Conference and Exhibition*, pp. 21-30.
- [8] D.B. Bivens, A. Yokozeki, 1996, "Thermodynamics and performance potential of R-410A", *International Conference on Ozone Protection Technologies*, Washington, D.C., USA, pp. 28-36.
- [9] T.J. Ritter, 1996, "Experiences with hydrocarbon blends in the UK market, Applications for natural refrigerants", *Refrigeration Science and Technology Proceedings*, IIF-IIR-Commissions B1, B2, E1 and E2, Aarhus, Denmark, pp. 451-452.
- [10] Y. Ryuzaburo, D. Nobumo, T. Sigeharu, T. Isamu, 1997, "Selections and applications of new refrigerants for air-conditioners", *International Conference on Ozone Protection Technologies*, November 12-13, Baltimore, MD, USA, pp.82-85
- [11] D. Jung, Y. Song, B. Park, 2000, "Performance des mélanges de frigorigènes utilisés pour remplacer le HCFC22", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 23, pp. 466-474.
- [12] S. Devotta, A.V. Waghmare, N.N. Sawant, B.M. Domkundwar, 2001, "Alternatives to HCFC-22 for air conditioners", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 21, pp. 703-715.
- [13] C. Aprea, A. Greco, 2003, "Performance evaluation of R-22 and R-407C in a vapor compression plant with reciprocating compressor", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, pp. 215-227.
- [14] R. Cabello, E. Torrella, J. Navarro-Esbri, 2004, "Experimental evaluation of a vapor compression plant performance using R-134a, R-407C and R-22 as working fluids", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, pp. 1905-1917.
- [15] S. Devotta, A.S. Padalkar, N.K. Sane, 2005, "Performance assessment of HCFC-22 window air conditioner retrofitted with R-407C", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, N°17-18, pp. 2937-2949.
- [16] D.B. Jabaraj, P. Avinash, D. Mohan Lal, S. Renganarayan, 2006, "Experimental investigation of HFC407C/HC290/HC600a mixture in a window air conditioner", *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, N°15-16, pp. 2578-2590.