

S. Forbes Pearson a fait ses études au Royal College of Science and Technology de Glasgow, à l'Université de Strathclyde et à celle de Glasgow, obtenant un diplôme ARCST et une licence en génie mécanique ; ses études doctorales à l'Université de Glasgow ont porté sur les pertes au niveau des composants dans les compresseurs de petite taille. Pendant sa période de formation dans l'industrie, Forbes Pearson a travaillé chez L. Sterne & Co. Ltd., Rolls Royce Ltd. et Tecumseh Products au Michigan.

Après ses études, le docteur Pearson a été nommé responsable scientifique de l'Unité de recherche Torry à Aberdeen, où il a travaillé pendant 3 ans sur le développement de la congélation du poisson sur les chalutiers. Forbes Pearson est resté ensuite 11 ans chez L. Sterne & Co. Ltd. à Glasgow, devenant directeur de division et ingénieur en chef de la division froid industriel. Lorsque cette division froid industriel a été fermée par Prestcold Ltd., le Dr Pearson et plusieurs de ses collègues ont créé Star Refrigeration Ltd. en 1970.

Chez Star Refrigeration, Forbes Pearson a été responsable du développement des technologies suivantes : une gamme brevetée de congélateurs à soufflage d'air de haute performance ; des systèmes frigorifiques munis de bouteilles basse pression, permettant de suralimenter l'évaporateur sans avoir recours à des pompes ; des vannes à quatre voies pour des cycles de dégivrage ; et l'introduction d'un système breveté à thermosiphon pour le refroidissement des ordinateurs centraux. Il a développé les premiers frigorigènes de remplacement immédiat pour le R-502 et le R-12, et a également breveté des frigorigènes de remplacement immédiat pour le R-22 et le R-12 (dans les compresseurs) et le R-13B1. Ses travaux actuels sont axés sur un frigorigène destiné à remplacer le R-22 tout en augmentant l'efficacité énergétique. Le docteur Pearson est Président de Star Refrigeration Ltd., ancien Président de l'Institute of Refrigeration (IoR) au Royaume-Uni ; il est actuellement Président du Comité technique de l'IoR. Il est également ancien Président du Comité BSI RHE/18 "Refrigeration Safety" (sécurité des systèmes frigorifiques) et du comité européen TC 182 WG2, qui travaille également sur la sécurité des systèmes frigorifiques. Forbes Pearson a reçu la Hall Thermotank Gold Medal de l'IoR en 1991 ; il a été 6 fois le récipiendaire de la Lightfoot Medal. Forbes Pearson a déposé de nombreux brevets portant sur des inventions ayant trait au froid. Il est également l'auteur de nombreuses communications.

Le docteur Pearson est professeur invité à l'Université de Strathclyde. Il a reçu la prestigieuse Médaille Gustav Lorentzen de l'IIF en 2003, lors du 21^e Congrès International du Froid à Washington DC et l'UK Cooling Industry Award lui a également été attribué en 2004. Il est devenu membre honoraire à vie de l'International Institute of Ammonia Refrigeration en 2005.

L'ammoniac – hier, aujourd'hui et pour toujours

par

S. Forbes Pearson

Star Refrigeration Ltd, Thornliebank Industrial Estate,
Glasgow G46 8JW, Royaume-Uni
Fax : 0044 141 638 8111 e-mail : star@star-ref.co.uk

I. INTRODUCTION

L'ammoniac est une substance unique en vertu de ses excellentes propriétés thermodynamiques en tant que frigorigène et du fait de son rôle positif vis-à-vis de l'environnement.

Toute vie dépend du cycle d'azote dans lequel la dégradation des matières naturelles libère de l'ammoniac, qui constitue un élément essentiel.

La quantité d'ammoniac produite de façon naturelle est estimée à trois milliards de tonnes par an, mais certains auteurs estiment que ce chiffre est en réalité beaucoup plus élevé. La production industrielle d'ammoniac est de l'ordre de 140 millions de tonnes par an. En revanche, environ 500 000 tonnes par an sont utilisées dans les applications frigorifiques. Comparée aux quantités d'ammoniac en libre circulation dans l'environnement, cette quantité est insignifiante.

Il est intéressant de noter que la quantité d'ammoniac contenue dans les systèmes frigorifiques aux Etats-Unis revient à environ 5 % du total de l'inventaire américain, mais que la quantité utilisée représente moins de 0,5 %. Cet usage refléterait une perte d'environ 10 % par an, ce qui reste à l'intérieur d'un éventail de 5 à 15 % de pertes annuelles des grandes installations à ammoniac telles qu'elles sont définies et fournies par Anders Lindborg dans une communication non publiée.

C'est en 1872, au Texas (Etats-Unis), que l'ammoniac a été utilisé pour la première fois en tant que frigorigène dans les systèmes à compression de vapeur par David Boyle ; Boyle était originaire de Johnstone dans le Renfrewshire en Ecosse. L'Allemand Carl von Linde a commencé à produire des compresseurs à ammoniac pour les systèmes frigorifiques en 1876. Boyle, un ingénieur praticien, ne semble

avoir publié aucune base théorique pour ses conceptions. En revanche, Linde, un ingénieur méthodique, a apporté à la nouvelle industrie du froid mécanique des bases théoriques scientifiques solides.

Depuis son introduction vers 1870, l'ammoniac n'a jamais cessé d'être utilisé en tant que frigorigène.

C'est en raison de ses propriétés thermodynamiques que l'ammoniac est utilisé encore aujourd'hui. Il est très utile de faire une comparaison entre les propriétés de l'ammoniac et celles du R-134a, le seul HFC à un seul composant encore utilisé aujourd'hui, celles de l'eau, qui est théoriquement un frigorigène idéal et respectueux de l'environnement, et celles du propane, qui est un hydrocarbure inflammable avec des propriétés qui sont, par ailleurs, très

proches de celles de l'ammoniac. Le *Tableau 1* montre que l'eau est une substance qui est très difficile à utiliser en tant que frigorigène à cause du volume important nécessaire. Le R-134a est bien plus difficile à utiliser que l'ammoniac et le propane à cause du volume aspiré spécifique nécessaire, mais son utilisation reste néanmoins possible. Les coefficients de performance selon *l'ASHRAE Handbook, Fundamentals*, publié en 1997, montrent qu'il n'y a pas de grande différence entre ces trois frigorigènes dans la pratique, mais c'est l'ammoniac qui est le plus adapté. L'ammoniac apparaît encore plus favorable lorsqu'on compare les coefficients de performance du système, car ses propriétés de transport et de transfert de chaleur sont meilleures. Le R-134a est le seul frigorigène avec un potentiel de réchauffement planétaire important.

Tableau 1. Quelques propriétés frigorifiques à 0 °C, sauf en cas d'autre indication

Frigorigène	Formule	Température d'ébullition dans des conditions normales	Température critique	Chaleur latente	$\frac{V_s}{L} *$	COP	ODP	GWP
		°C	°C	kJ/kg	$\frac{m^3}{KJ}$	+3-37 °C		
Ammoniac	NH ₃	-33,3	135,0	1262	$2,29 \times 10^{-4}$	7,3	0	0
R-134a	C ₂ H ₂ F ₄	-26,1	101,1	199	$3,48 \times 10^{-4}$	7,0	0	1600
Eau	H ₂ O	100,0	373,9	2501	$823,6 \times 10^{-4}$?	0	0
Propane	C ₃ H ₈	-42,1	96,7	374	$2,58 \times 10^{-4}$	7,1	0	20

* volume aspiré spécifique

II. L'AMMONIAC HIER

La façon dont on a utilisé l'ammoniac en tant que frigorigène a changé avec le temps.

Les premiers compresseurs à ammoniac étaient, dans la plupart des cas, entraînés par des moteurs à vapeur qui fonctionnaient à moins de 60 t/min. (tours par minute) et souvent il n'y avait qu'un seul vilebrequin pour le compresseur et le moteur à vapeur. A l'origine, les condenseurs étaient refroidis par circulation d'eau en utilisant de l'eau provenant d'une rivière puis en employant des condenseurs « atmosphériques » à circulation libre dans

lesquels l'eau coulait au-dessus d'un réseau de tubes interconnectés. Les évaporateurs consistaient normalement en des herbes de tubes alimentés à travers une vanne régulatrice manuelle. De tels systèmes nécessitaient la surveillance constante d'un technicien expérimenté, étant donnée l'extrême précision nécessaire pour le réglage de la vanne régulatrice manuelle et du fait que la constante de temps du système était élevée. Heureusement, ces premiers compresseurs pouvaient supporter une quantité d'humidité importante dans la vapeur aspirée. Une gamme très fiable de compresseurs à ammoniac a été fabriquée par la société DeLaVergne basée à New York. Ces compresseurs étaient uniques car

l'espace mort était rempli d'huile à la fin de chaque course. DeLaVergne partait du principe que le remplissage de l'espace mort avec de l'huile servirait à réduire la détente de l'ammoniac au début de la course d'aspiration, améliorant ainsi le rendement volumétrique. L'injection d'huile était bonne dans ces systèmes lents où l'usure est insignifiante, mais les améliorations attendues en terme d'efficacité ne se sont pas concrétisées. La dissolution de l'ammoniac dans l'huile aux pressions élevées avait tendance à produire des détentes brusques lors de la course d'aspiration, provoquant des rendements volumétriques beaucoup moins élevés que ceux qu'on pouvait obtenir avec des compresseurs « secs ». Un essai comparatif très connu a été réalisé chez l'Eastman Kodak Company. On a soigneusement comparé la performance frigorifique d'un compresseur DeLaVergne avec celle d'un compresseur York. On a démontré que la consommation de carburant était beaucoup plus élevée dans le cas du compresseur DeLaVergne. Suite à cet essai, les compresseurs DeLaVergne ont disparu peu à peu du marché. Pourtant, l'injection d'huile est réapparue beaucoup plus tard sous la forme d'un compresseur à vis à injection d'huile qui n'est plus soumis à la détente et à ses inconvénients.

Le développement de moteurs électriques a donné lieu au lancement d'une nouvelle génération de compresseurs à ammoniac fonctionnant à des vitesses jamais atteintes auparavant et qui pouvaient dépasser les 300 t/min. Les soupapes des compresseurs ont évolué : la soupape-champignon a été abandonnée en faveur de la soupape à ressort qu'on utilise encore aujourd'hui. Le niveau élevé de vitesse acoustique de l'ammoniac permettait l'utilisation de systèmes à course longue qui étaient efficaces lorsqu'on les compare aux compresseurs à grande vitesse modernes. On a vu l'introduction de condenseurs évaporatifs à circulation naturelle et forcée, ainsi que des évaporateurs ventilés aux tubes ailetés ou lisses. La détente des frigorigènes a été régulée par des régulateurs à flotteur et le frigorigène circulait par effet de gravité ou par des pompes volumétriques. La faible densité de l'ammoniac liquide fait qu'il s'agit d'un frigorigène plus adapté à la circulation libre que le R-134a.

Le développement postérieur des systèmes à ammoniac a été influencé par l'adoption d'une alimentation électrique normalisée à courant alternatif et par l'introduction de frigorigènes

synthétiques, commençant par le R-40 (le chlorure de méthyle).

Les compresseurs à ammoniac ont été conçus successivement pour des vitesses de rotation de moteurs à 8, 6 et 4 pôles. Ces systèmes à grande vitesse ont été conçus de façon à fonctionner soit à l'ammoniac, soit aux frigorigènes synthétiques qui venaient d'apparaître sur le marché. Ces derniers étaient non toxiques et ininflammables avec des taux de compression faibles par rapport à l'ammoniac. Ces frigorigènes synthétiques permettaient aux compresseurs de fonctionner à des températures nettement plus basses qu'avec l'ammoniac. Les nouveaux modèles de compresseur n'étaient pas très adaptés à l'usage de l'ammoniac, ayant des courses courtes pour faciliter une section de passage plus grande pour l'utilisation des nouveaux frigorigènes ; les jours de l'ammoniac en tant que frigorigène semblaient donc comptés. La seule gamme de compresseurs conçue principalement pour l'usage de l'ammoniac était celle de Grasso qui employait des structures en acier soudé permettant un refroidissement des cylindres très efficace. Tous les autres compresseurs en fonte avaient les inconvénients de refroidir difficilement et d'avoir tendance à surchauffer rapidement en cas de panne du système de refroidissement ou en cas de fracture d'un clapet de refoulement.

L'ammoniac a été conservé en tant que frigorigène à cause de deux événements sans lien entre eux, ce qui nous amène au domaine de l'ammoniac d'aujourd'hui.

III. L'AMMONIAC AUJOURD'HUI

La première percée qui permettait de prolonger indéfiniment la durée de vie de l'ammoniac en tant que frigorigène a été le développement du compresseur à vis à injection d'huile.

Les compresseurs à vis sont volumétriques et rotatifs mais ne sont pas à piston ; ils peuvent donc assurer un équilibre parfait et tourner à une vitesse élevée.

Le compresseur à vis a été conçu au cours des années 30 en Suède en tant que compresseur de suralimentation pour des turbines à gaz. La société James Howden de Glasgow a breveté ces appareils en 1937 mais elle ne les a pas utilisés avant la fin de la Seconde Guerre mondiale. A l'origine, le compresseur à vis devait tourner à une grande vitesse et le bruit était intolérable.

C'était Duncan Laing chez James Howden qui a découvert que l'injection d'huile directement dans le compresseur permettait d'obturer le jeu autour des rotors et permettait ainsi au système de fonctionner à des vitesses réduites avec des niveaux de bruit acceptables. En outre, l'huile injectée pouvait circuler à travers un refroidisseur et ainsi éviter les températures de refoulement élevées associées aux compresseurs à piston à ammoniac. A partir du moment où l'on constatait le bon fonctionnement des compresseurs à vis à ammoniac munis d'injection d'huile, l'utilisation de l'ammoniac en tant que frigorigène était assurée à terme. Pourtant, l'ammoniac se trouvait toujours sévèrement concurrencé par les frigorigènes synthétiques, qui semblaient plus sûrs et plus faciles à appliquer. Pendant un certain temps, il a semblé que l'ammoniac serait limité aux grandes installations industrielles et que la plupart des applications seraient assurées par les frigorigènes synthétiques. Ces grandes installations à ammoniac fonctionnaient avec des condenseurs évaporatifs à circulation forcée et aux évaporateurs à tubes ailetés pour l'entreposage frigorifique et pour les congélateurs à air pulsé. Des pompes centrifuges hermétiques ont été développées afin de faire circuler l'ammoniac et la régulation électronique des systèmes frigorifiques a été introduite.

La deuxième percée qui a eu un impact sur l'utilisation de l'ammoniac en tant que frigorigène a été la découverte que les frigorigènes contenant du chlore appauvrissaient la couche d'ozone. Cette couche d'ozone protège la surface terrestre du rayonnement ultraviolet, dont l'excès est nuisible à la vie. Grâce à une série d'accords internationaux, suite à une réunion à Montréal, il a été convenu que tous les frigorigènes contenant du chlore seraient éliminés progressivement. On est en train de les remplacer par des frigorigènes synthétiques sans chlore ; pourtant, pour plusieurs raisons, ces frigorigènes sont plus chers et moins efficaces que les frigorigènes synthétiques employés auparavant. Ceci a donné lieu au retour de l'ammoniac dans des applications où on l'avait supprimé et remplacé par des frigorigènes synthétiques. On ne sait pas encore jusqu'à quel point on arrivera à appliquer l'ammoniac dans les systèmes à faible capacité. L'ammoniac n'est pas compatible avec des systèmes hermétiques, mais il serait possible d'utiliser des compresseurs hermétiques à stator externe tels qu'on les utilise déjà dans les pompes à ammoniac.

Les applications frigorifiques actuelles de l'ammoniac comprennent l'entreposage frigorifique, la congélation et les installations de transformation des produits alimentaires, des systèmes de congélation à plaques et les refroidisseurs à eau glycolée. Dans la quasi-intégralité des cas, l'ammoniac est plus performant que d'autres frigorigènes en termes d'efficacité du système. Néanmoins, dans un seul domaine, l'ammoniac en tant que frigorigène a un inconvénient : son point d'ébullition à pression atmosphérique élevé de -33 °C fait en sorte que la plupart des applications basses températures nécessitent l'évaporation des frigorigènes à des pressions en dessous de la pression atmosphérique. Dans ces conditions, l'ammoniac a un volume massique très important, ce qui nécessite l'utilisation de machines de grandes dimensions qui sont coûteuses. La fiabilité des installations est aussi affectée par l'éventualité d'infiltration d'humidité et de non condensables au sein du système frigorifique à travers des fuites du côté basse pression.

La législation en matière de sécurité, qui devient de plus en plus stricte, constitue un autre défi pour l'utilisation de l'ammoniac, et rend ce frigorigène difficile et coûteux à appliquer en présence du public.

Le double défi que constituent la sécurité et les pressions d'évaporation basses peut être surmonté par l'utilisation de l'ammoniac dans les systèmes en cascade avec un frigorigène à haute pression non toxique : le dioxyde de carbone. Ceci offre une solution satisfaisante pour améliorer l'efficacité des systèmes à basse température, ce qui permet de réduire le coût global par une diminution de la quantité des composants et de la taille des réseaux de tuyauterie, et la mise hors de portée du public de l'ammoniac du fait de sa toxicité.

Le renouveau du dioxyde de carbone, un frigorigène classique, en association avec l'ammoniac, constitue une troisième voie de développement qui permet d'assurer l'utilisation de l'ammoniac dans l'avenir.

IV. L'AMMONIAC DEMAIN

Il semble évident que l'ammoniac en tant que frigorigène a de beaux jours devant lui dans un avenir prévisible. Les applications à venir de l'ammoniac ainsi que l'importance de son utilisation vis-à-vis de celle des autres

frigorigènes sont moins évidentes. Dans le cas des systèmes totalement hermétiques de petite taille, l'intérêt de l'ammoniac, qui est un mauvais isolant électrique et possède un faible débit massique et donc n'assure pas un bon refroidissement du moteur, semble discutable. On va probablement continuer à utiliser des hydrocarbures dans de tels systèmes lorsque la réglementation nationale et locale le permet, ou on emploiera les halocarbures là où la réglementation proscrit les hydrocarbures.

L'ammoniac ne paraît pas avoir un rôle à jouer dans les systèmes de conditionnement d'air de type fenêtre ou split. On va probablement continuer à utiliser des halocarbures tant qu'il est légal et réalisable de le faire. Il n'existe pas de raisons techniques empêchant l'utilisation d'hydrocarbures inflammables dans de tels systèmes hermétiques, mais on comprend facilement la réticence à le faire. Dans le long terme, il sera peut-être possible d'utiliser des systèmes transcritiques au dioxyde de carbone dans le conditionnement d'air, mais on ne dispose pas encore de tels systèmes.

Pour les systèmes industriels de grande taille utilisant des températures d'évaporation au-dessus de -33°C dans les lieux fermés au public et aux techniciens non spécialisés, il semble émerger clairement que l'ammoniac constitue le frigorigène de prédilection. Là où les techniciens non spécialisés doivent travailler à proximité du système frigorifique, le choix se porterait plutôt sur un frigoporteur, probablement le dioxyde de carbone, plus un frigorigène primaire pour la production de froid, probablement l'ammoniac.

Pour les températures d'évaporation en dessous de -33°C , je conseillerais l'utilisation d'un système à ammoniac/dioxyde de carbone en cascade. Plus la température d'évaporation est basse, plus le système en cascade sera concurrentiel comparé à un système à ammoniac muni d'un économiseur ou biétagé. Etant donné leur point triple, la limite inférieure des systèmes au dioxyde de carbone simples est de l'ordre de -55°C .

Pour les systèmes de conditionnement d'air de grande taille utilisant un frigoporteur, il est désormais bien établi que l'utilisation du CO_2 en tant que frigoporteur volatil (c'est-à-dire sans compresseur au CO_2) et de l'ammoniac ou d'un autre frigorigène primaire constituera un système beaucoup plus efficace et probablement pas plus onéreux qu'un système avec frigoporteur non

volatil circulant dans des tuyauteries aux dimensions beaucoup plus importantes.

Le secteur commercial constitue l'application pour laquelle il est le plus difficile de savoir si l'ammoniac sera utilisé dans l'avenir. On peut utiliser les systèmes à ammoniac dans les systèmes avec une puissance de quelques kilowatts seulement, et on l'a fait dans le passé. Cependant, il est probablement plus pratique d'utiliser les halocarbures qui ne sont pas toxiques mais sont miscibles.

Dans les systèmes commerciaux de grande taille, tels que ceux utilisés dans les supermarchés, le dioxyde de carbone a été utilisé avec succès, soit en tant que frigoporteur volatil ou en cascade avec un frigorigène primaire qui n'est pas forcément l'ammoniac.

Il ne conviendra jamais d'utiliser des systèmes à ammoniac distribué dans les supermarchés, mais il sera sans doute possible d'utiliser des systèmes à ammoniac de petite taille dans des zones à l'écart du public. Cependant, de tels systèmes seraient beaucoup plus faciles à utiliser si on employait des huiles miscibles. Une autre approche permettant d'augmenter la miscibilité consiste à mélanger l'ammoniac à une substance miscible vis-à-vis du lubrifiant. Un mélange azéotropique d'ammoniac et de diméthyléther (E170) a été soumis à des essais. Il est trop tôt pour savoir si les avantages d'un tel mélange compenseront les inconvénients associés à une inflammabilité accrue de l'ammoniac ainsi qu'à une toxicité à peine diminuée.

V. CONCLUSION

A moins que ne soit développée une technologie frigorifique complètement nouvelle, l'ammoniac continuera à être utilisé tant qu'on aura besoin de froid.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie les directeurs de Star Refrigeration Limited pour l'autorisation de publier cet article. Il remercie également Anders Lindborg et Andy Pearson pour leurs conseils et leur aide pour le schéma.