

# *Bulletin* de l'Institut International du Froid of the International Institute of Refrigeration



## 2004-2

*Abstracts and News*  
**Analyses et Informations**

### Article de synthèse

**La cryogénie et la  
séparation des gaz au  
service de l'humanité**

**Walter F. Castle**

### 17e Note d'information

**Comment améliorer  
l'efficacité énergétique  
des équipements  
frigorifiques**

### Review Article

**Cryogenics and Gas  
Separation Processes  
Serve Mankind**

**Walter F. Castle**

### 17th Informatory Note

**How to Improve Energy  
Efficiency in Refrigerating  
Equipment**

VOLUME LXXXIV

BIMESTRIEL/ PUBLISHED BI-MONTHLY

ISSN - 0020 69-70

**Walter F. Castle** a été Président de la Commission A2 (Liquéfaction et séparation des gaz) de l'IfF jusqu'en 2003. Titulaire d'une licence de l'Université de Londres, il est chimiste-expert, membre de la Royal Society of Chemistry, de la Society of Chemical Industry et de la British Cryogenics Society. Il est également ancien élève de la London Business School.

Il a travaillé pendant 48 ans au sein du groupe BOC dans le domaine des installations cryogéniques avant de devenir consultant pour ce même groupe pendant 5 ans. Il a occupé divers postes : Directeur de la Technologie, Directeur des Ventes et du Marketing, Directeur Technique et des Projets, et Directeur de la Conception et du Développement. Lorsqu'il était consultant pour BOC, il était conseiller en matière de brevets - procédés et interprétation des descriptions des brevets et état de l'art. Il travaille aujourd'hui en tant que consultant indépendant dans le domaine de la cryogénie.

Il a présenté de nombreuses communications techniques lors de conférences internationales, traitant de divers aspects de la conception et du développement des installations de séparation des gaz de l'air, de la conception technique et de la sélection d'installations spécifiques pour répondre aux besoins des utilisateurs.

## La cryogénie et la séparation des gaz au service de l'humanité

par

**Walter F. Castle**

Consultant, 1 The Meadow, Ystradowen,  
Cowbridge, Vale of Glamorgan, CF71 7TR, Royaume-Uni.  
Tel: +44 (0)1446 771800, e-mail: w.f.castle@btinternet.com

### INTRODUCTION

Les techniques cryogéniques et de séparation des gaz sont utiles pour l'humanité, comme l'illustrent certains exemples issus de l'industrie. Les avancées de ces technologies valorisent leur rôle pour la société.

Les procédés cryogéniques et de séparation des gaz sont utilisés dans quelques-uns des principaux secteurs industriels et contribuent entre autres à faire progresser les domaines suivants : l'énergie, la métallurgie, les procédés chimiques, les atmosphères protectrices et l'environnement.

Cet article n'abordera pas les applications scientifiques, telles que la supraconductivité, les systèmes fonctionnant à l'hélium liquide ou à l'hydrogène et la recherche nucléaire, etc., même si la cryogénie et la séparation des gaz y jouent également un rôle décisif.

Parmi les grandes installations cryogéniques, on peut citer les installations de gaz naturel liquéfié (GNL) et les grandes installations de séparation d'air utilisées pour produire l'azote qui est injecté dans les puits pour optimiser la récupération du pétrole, et pour produire l'oxygène utilisé lors de la gazéification des combustibles lourds ou la fabrication de l'acier. A l'autre extrémité de la gamme, des petites unités cryogéniques sont utilisées pour le traitement des eaux usées ou la production d'azote de très grande pureté pour l'industrie des puces électroniques.

Les procédés de séparation des gaz permettent de séparer l'hélium des sources de gaz naturel et de purifier les sources d'hydrogène. Pour les petits volumes, on utilise des méthodes non cryogéniques pour la production d'azote et d'oxygène et pour la purification de l'hydrogène.

Cet article présente brièvement les progrès dans les procédés industriels rendus possibles grâce à la cryogénie et à la séparation des gaz, progrès qui sont bénéfiques pour notre société. De nos jours, les avancées technologiques se basent sur des principes déjà bien établis et sur les travaux du siècle dernier, mais l'inventivité des chercheurs contribue encore à l'amélioration de l'efficacité et à la réduction des coûts des procédés, créant ainsi une base solide pour la pérennité de leur compétitivité.

### I. ENERGIE

#### 1.1 Installations de GNL

Les installations de GNL comptent parmi les plus grandes installations cryogéniques. Elles servent à purifier et liquéfier le gaz naturel (le plus souvent du méthane) pour qu'il puisse être transporté vers d'autres sites puis utilisé comme carburant propre. L'Australie par exemple exporte du GNL vers le Japon, ce dernier n'ayant que peu de ressources naturelles (couvrant seulement 2% des besoins). L'utilisation du gaz naturel n'engendre pas de pollution, car il est vaporisé après transport par voie maritime, puis

utilisé comme combustible. Certains pays tels que l'Algérie, le Nigeria, Oman, le Qatar, l'Indonésie et Trinidad ont des ressources en gaz naturel, qu'ils exportent, après liquéfaction, par voie maritime vers des pays qui ont un déficit énergétique et/ou manquent de carburants propres.

Les avancées dans le domaine des installations de GNL incluent l'utilisation de détendeurs de liquide fonctionnant avec une turbine plutôt qu'un détendeur Joule-Thomson.<sup>12</sup> L'énergie ainsi récupérée par la turbine est utilisée pour minimiser le cycle de fabrication, permettant soit une réduction de la consommation énergétique du processus de liquéfaction de 3 à 6%, soit une augmentation du rendement pour une même consommation énergétique. Le cycle en cascade utilisant un mélange de frigorigènes compte également parmi les avancées récentes.<sup>3</sup> Comme son nom l'indique, ce procédé prend la forme de cycles successifs de refroidissement utilisant des mélanges de frigorigènes. L'un des procédés de liquéfaction de GNL les plus répandus est le cycle utilisant un mélange de frigorigènes pré-refroidi à l'aide d'un dispositif frigorifique indépendant fonctionnant au propane. Une variante récente de ce système est le cycle utilisant un mélange de frigorigènes avec condensation intermédiaire du mélange.<sup>4</sup>

Au-delà des variantes de cycles, les installations de GNL que l'on conçoit aujourd'hui sont de plus en plus grandes. La capacité de production actuelle des installations s'élève à 5 millions de tonnes de GNL/an, alors que des capacités atteignant 7 millions de tonnes/an sont désormais envisagées. Les réservoirs de stockage, qui peuvent aujourd'hui contenir entre 120 000 et 160 000 m<sup>3</sup> de liquide, atteindront 180 000 m<sup>3</sup>.<sup>5</sup> L'augmentation de la taille des installations et des réservoirs de stockage vise à réduire les coûts unitaires. Les coûts de la liquéfaction qui s'élevaient à 560 USD/tonne entre 1986 et 1995 sont descendus à 230 USD/tonne entre 1996 et 2000. Un navire de transport de GNL coûtait 220 millions d'USD en 1996 mais seulement 155 millions d'USD en 2000. Actuellement, un complexe de GNL coûte entre 2 et 5 milliards d'USD.<sup>6</sup>

On estime que l'approvisionnement mondial en GNL s'élève aujourd'hui à 100 millions de tonnes/an. Le gaz naturel constituerait 24% des ressources énergétiques mondiales, et environ 6,5% du gaz naturel est fourni sous forme de GNL. Le commerce mondial de GNL augmente de près de 7% par an. L'augmentation de l'efficacité et de la taille des installations permet-

tra de réduire le coût spécifique du produit et de conduire à des économies dans ce secteur, ce qui à son tour engendrera une augmentation des ventes de ce carburant propre.

## 1.2 Amélioration de la récupération de pétrole

L'azote à très haute pression est utilisé pour optimiser la récupération de pétrole dans les puits. Le pétrole ainsi récupéré représente généralement un peu moins de 50% des réserves. Moins la pression naturelle du puits de pétrole est grande, plus la production diminue. En injectant de l'azote à très haute pression, le puits appauvri en pétrole peut produire davantage.

Au Mexique, quatre centrales cryogéniques de séparation d'air, produisant chacune 10 000 tonnes/jour d'azote, sont utilisées à cet effet. Ces centrales de séparation d'air comptent parmi les plus grandes dans le monde.<sup>7</sup> La séparation d'air par voie cryogénique est bien adaptée aux applications de grande ampleur; elle est avantageuse du point de vue des coûts d'investissement et des frais de fonctionnement.

## 1.3 Gazéification

La gazéification du charbon ou du pétrole lourd à l'aide d'oxygène est très répandue pour obtenir un produit plus propre - appelé gaz naturel de synthèse (GNS), et pour produire des carburants liquides plus faciles à transporter. Le principal exemple est le complexe SASOL en Afrique du Sud, qui comprend actuellement 15 installations de production d'oxygène. Le charbon est gazéifié à l'aide d'oxygène et de vapeur pour produire à la fois du gaz naturel de synthèse (hydrogène ou monoxyde de carbone) et des carburants liquides par le procédé de Fischer-Tropsch. Initialement conçu dans un cadre stratégique pour protéger les sources de carburant automobile en Afrique du Sud, le complexe continue de s'agrandir. La dernière unité de production d'oxygène à avoir été ajoutée au complexe a une capacité nominale de 3550 tonnes/jour d'oxygène avec une pureté de 98,5%.

De nombreux autres projets de gazéification sont en cours de développement, en taille réelle ou en laboratoire d'essai, pour produire du GNS. De telles installations sont conçues pour produire de l'oxygène de grande pureté - de 99,5 à 99,8% - de façon à réduire la concentration de gaz inerte dans le GNS en améliorant ainsi sa valeur calorifique.

La plupart des installations de production d'oxygène par gazéification appliquent le principe de la pompe à liquide, qui consiste à pomper





**Photo 1.** Quatre grandes centrales au Mexique produisent de l'azote sous haute pression afin d'améliorer la récupération du pétrole par injection dans les puits

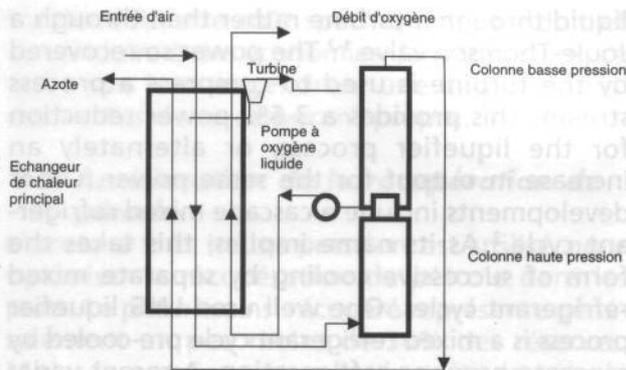
Four large separation units in Mexico produce high-pressure nitrogen for enhanced oil recovery by well injection

l'oxygène liquide jusqu'à obtenir la pression requise et à le vaporiser par échange de chaleur avec de l'azote ou un flux d'air<sup>8</sup> (Figure 1). Ce procédé permet d'éviter le recours à un compresseur d'oxygène coûteux, qui constituerait le seul autre moyen d'obtenir la pression requise.

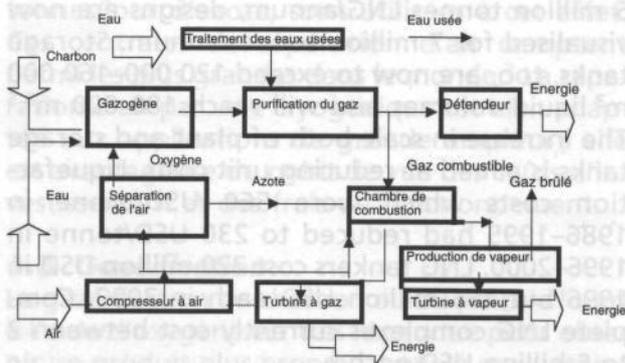
D'autres procédés de gazéification, comme par exemple le cycle combiné avec gazéification intégrée [IGCC] (Figure 2), sont conçus pour produire de l'électricité. Ce cycle combine différentes étapes pour obtenir un procédé global efficace. Dans ce procédé, le compresseur d'air, par exemple, fournit à la fois de l'air à l'installation de séparation et à la chambre de combustion. Le compresseur libère l'air à la pression requise pour la combustion, mais cette pression est plus élevée que celle nécessaire à la séparation d'air. Ce dernier aspect devrait peser sur l'efficacité, mais en réalité la combinaison des étapes permet de réaliser des économies significatives sur l'ensemble du procédé.<sup>9,10</sup>

#### 7.4 L'hydrogène liquide et le GNL en tant que carburants automobiles

L'utilisation d'hydrogène liquide en tant que carburant automobile est actuellement à l'étude. Un certain nombre de programmes ont été mis en œuvre pour tester les infrastructures nécessaires et la technologie liées aux carburants automobiles. L'hydrogène liquide et le gaz naturel liquéfié sont tous deux des carburants propres qui, contrairement à l'essence et au gazole, permettent d'éviter l'émission de contaminants par le biais des gaz d'échappement.



**Figure 1.** Schéma d'une installation utilisant le principe de la pompe à liquide



**Figure 2.** Schéma d'un procédé IGCC

Au cours des dernières années, un système global d'alimentation des véhicules à hydrogène liquide a été développé, et certaines automobiles utilisent de l'hydrogène en tant que carburant.<sup>11</sup>

En outre, certains systèmes et véhicules utilisent depuis longtemps le GNL en tant que carburant. L'hydrogène comprimé et le gaz naturel comprimé sont tous deux des alternatives pour les véhicules.

## II. METALLURGIE

### 2.1 Acier

L'oxygène est couramment utilisé pour la production d'acier. En 2002, la production mondiale d'acier s'élevait à 900 millions de tonnes, dont 58% ont utilisé de l'oxygène.<sup>12</sup> Pour produire de l'acier à l'aide d'oxygène, on estime que 6 à 8 tonnes d'oxygène sont nécessaires pour produire 100 tonnes d'acier. En se basant sur ces chiffres, on en déduit que 35 à 45 millions de tonnes d'oxygène sont utilisées pour produire l'acier dans le monde.



L'oxygène est également utilisé pour enrichir l'air soufflé dans le haut fourneau lors de la production d'acier brut à l'état liquide. La teneur en oxygène de l'air soufflé peut aller jusqu'à 28%, ce qui permet de réduire la consommation de coke.<sup>13</sup>

Lors de la production d'acier, pour obtenir de l'acier de grande qualité, la teneur en azote de l'oxygène doit être extrêmement faible. Actuellement, la teneur en azote de l'oxygène utilisé pour la production d'acier est limitée à 40 parties par million. L'analyse du rendement et de la pureté requise conforte l'utilisation d'un procédé cryogénique pour la production d'oxygène.

La disponibilité de l'oxygène en grande quantité à partir des années 1950 a engendré un développement rapide de la production d'acier en utilisant l'oxygène. L'oxygène permet à la fois une consommation réduite de combustible, grâce à la réaction exothermique, à un rendement plus élevé, aux cycles de production plus courts, et à une meilleure qualité de l'acier.

L'unité de séparation d'air peut facilement produire de l'azote et de l'argon de grande pureté. L'azote peut être utilisé en tant qu'atmosphère inerte, parfois combiné à de l'hydrogène, pour recuire les bandes d'acier. Lorsqu'il est mélangé à de l'oxygène, l'argon est utilisé pour éliminer le carbone de l'acier liquide : l'oxygène oxyde le carbone contenu dans le liquide tandis que l'argon élimine le carbone sous forme de monoxyde de carbone. Une consommation d'argon atteignant 2,5 tonnes pour 100 tonnes de métal liquide a été rapportée.

L'utilisation d'oxygène pour l'extraction de métaux, tels que le cuivre, le nickel, le cobalt et le zinc, ne nécessite, contrairement à l'air, que le traitement d'un cinquième du volume gazeux, en raison de l'absence d'azote. Les composants du procédé peuvent ainsi être en quantités plus faibles et les exigences énergétiques moins importantes en raison d'une plus grande réactivité de l'oxygène en l'absence du diluant azote.

### III. PRODUITS CHIMIQUES

Comme pour les procédés métallurgiques, l'avantage d'utiliser l'oxygène, plutôt que l'air, en tant qu'oxydant, est la réduction du volume des flux de fabrication, de l'apport énergétique (les pressions partielles des substances réactives étant plus élevées sans azote), et du volume de gaz. Ce dernier facteur réduit l'impact sur l'environnement dû aux émissions de gaz contaminants; les deux premiers facteurs réduisent respectivement les coûts d'investissement et les frais de fonctionnement liés au procédé chimique. Un coût supplémentaire, qui doit toutefois être signalé, correspond soit à l'unité de production d'oxygène, soit à l'achat d'oxygène d'origine extérieure. L'oxygène étant très répandu pour les traitements chimiques, l'analyse des coûts favorise son utilisation.

Pour certains procédés, il peut s'avérer nécessaire de diluer légèrement l'oxygène avec de l'azote ou de l'air afin de contrôler les vitesses de réaction.

Le *Tableau 1* donne un aperçu des paramètres requis pour différents procédés chimiques. Voir aussi un autre article écrit par l'auteur.<sup>14</sup>

La cryogénie est utilisée de manière plus directe dans d'autres procédés, parmi lesquels<sup>16</sup>:

- la récupération et la purification d'hydrogène;
- la récupération de GPL (gaz de pétrole liquéfié) à partir du gaz rejeté par les raffineries;
- la récupération d'éthylène et d'éthane à partir du gaz rejeté par les unités de craquage catalytique de fluides (FCCU);
- la purification du monoxyde de carbone;
- le traitement du gaz naturel pour récupérer les GNL (gaz naturels liquides, par exemple le propane) et/ou l'hélium;
- la purification de l'azote à partir de l'ammoniac de synthèse.

Chacun de ces procédés, et d'autres, utilisent les techniques cryogéniques pour purifier, séparer ou liquéfier des composants ayant un bas

**Tableau 1.** Consommation spécifique en oxygène des principaux procédés chimiques<sup>15</sup>

Procédé	Consommation spécifique en tonnes d'O <sub>2</sub> /tonne de produit	Taille moyenne d'une installation à oxygène en tonnes/jour
Oxyde d'éthylène	1,0-1,3	300-1000
Oxyde de propylène	0,6	300-800
Méthanol	0,4	1000
Ammoniac (pour gaz de synthèse)	0,6-0,8	1000
Claus (pour éliminer le soufre)	0,4 (t/t soufre)	500-1250

point d'ébullition. Prenons l'exemple de la purification de l'azote à partir de l'ammoniac de synthèse : le monoxyde de carbone et le méthane sont éliminés de la source d'hydrogène, car ce sont des poisons catalytiques pour la synthèse, puis l'azote et l'hydrogène sont mélangés dans des proportions stœchiométriques pour permettre la synthèse.

Avant d'appliquer le procédé cryogénique, on oxyde partiellement des combustibles lourds à l'aide de l'oxygène produit par une unité de séparation d'air et de vapeur pour produire de l'hydrogène, du monoxyde de carbone, du dioxyde de carbone et des hydrocarbures résiduels. Le monoxyde de carbone est converti en dioxyde de carbone pour ne laisser que des traces de monoxyde de carbone. Le mélange gazeux est ensuite traité dans une unité de Rectisol pour éliminer le dioxyde de carbone et l'eau. Le gaz, à une température de  $-50^{\circ}\text{C}$  et haute pression, pénètre dans l'une des cuves à tamis moléculaire (utilisées en alternance) pour éliminer les dernières traces de dioxyde de carbone, d'eau et de méthanol. Il est ensuite refroidi par les écoulements du dispositif de purification de l'azote puis est purifié avec de l'azote liquide dans la colonne. On retrouve le monoxyde de carbone dans l'azote liquide situé dans le puisard de la colonne et le méthane au niveau de l'alimentation. Le distillat de tête de la colonne comprend un mélange d'hydrogène et d'azote, qui est chauffé jusqu'à température ambiante dans l'échangeur de chaleur. De l'azote supplémentaire issu de l'unité de séparation d'air est ajouté au mélange azote-hydrogène pour obtenir la proportion de 3  $\text{H}_2$  pour 1  $\text{N}_2$  nécessaire à la synthèse.

Un autre traitement cryogénique associé à la synthèse d'ammoniac concerne la récupération d'argon à partir du gaz purgé au cours du cycle de synthèse. En accumulant de l'argon combiné avec de l'oxygène et de l'azote, les pressions partielles des gaz réactifs seront réduites, ralentissant ou diminuant ainsi la conversion. Le gaz purgé est ensuite traité pour éliminer et récupérer l'argon puis le gaz restant est réintroduit dans le cycle de synthèse. L'argon est une substance très utile, que ce soit en métallurgie, pour le soudage ou pour les ampoules.

La production annuelle d'ammoniac atteint près de 88 millions de tonnes, dont 85% sont utilisés sous forme d'engrais, de phosphate d'ammonium ou d'urée. L'ammoniac est produit dans 80 pays, et l'urée dans 60 pays.<sup>17</sup> L'intérêt de la synthèse d'ammoniac pour la production d'engrais est bien illustré par ces chiffres.

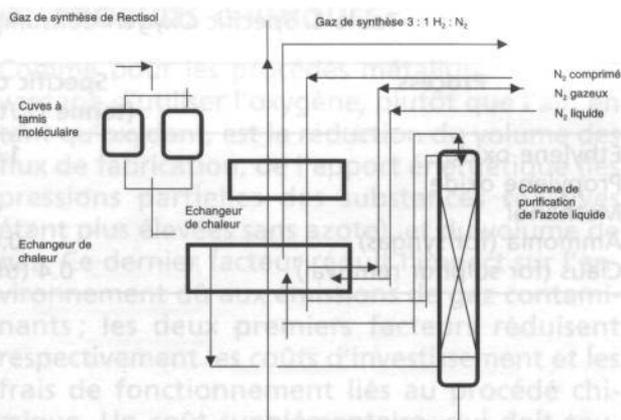


Figure 3. Procédé de purification de l'azote liquide de l'ammoniac de synthèse

#### IV. ATMOSPHERES PROTECTRICES

Les unités cryogéniques de séparation d'air peuvent permettre d'obtenir de l'azote de haute pureté, que ce soit en tant que sous-produit de la production d'oxygène ou en tant que produit principal des générateurs d'azote.<sup>7</sup> Etant relativement inerte, l'azote est souvent utilisé en tant qu'atmosphère protectrice qui permet de prévenir l'oxydation.

Ses applications comprennent :

- la fabrication de verre flotté ;
- la fabrication de puces électroniques ;
- la pressurisation des matériaux volatils et combustibles.

Pour la fabrication du verre flotté, on recouvre le verre fondu, flottant sur de l'étain liquide, avec une atmosphère contrôlée à base d'azote et d'hydrogène pour éviter toute contamination susceptible d'engendrer des défauts du verre.

La fabrication des puces électroniques est encore plus exigeante en terme de pureté de l'atmosphère protectrice, qui est indispensable pour maintenir le rendement élevé des circuits. Pour les applications électroniques, l'azote doit impérativement répondre aux critères de pureté suivants : < 1 partie par milliard d'eau et < 0,1 partie par milliard d'oxygène, de dioxyde de carbone et de méthane. Le niveau de pureté requis conforte la production d'azote par voie cryogénique, même si elle peut être combinée à d'autres dispositifs de purification pour l'obtention du produit fini.

#### V. ENVIRONNEMENT

L'une des applications notables des techniques cryogéniques et de séparation des gaz



bénéfiques pour l'environnement est le traitement des eaux usées, des lacs et des rivières. Pour ces applications, on produit de l'oxygène, soit dans des unités cryogéniques de séparation d'air, soit, pour les plus petits volumes, par adsorption par alternance de pression et vide (VPSA). La Figure 4 schématise une unité VPSA.

Après avoir été comprimé, l'air pénètre dans l'un des deux adsorbants à tamis moléculaire, dans lesquels l'oxygène est moins adsorbé et traverse donc le lit d'adsorbant avant d'être recueilli dans le ballon-tampon. Lorsqu'un lit d'adsorbant est proche de la saturation en azote, l'air est envoyé vers l'autre lit. Le premier lit est ensuite dépressurisé et par conséquent soumis au vide pour se régénérer, ce qui permet au cycle de se poursuivre.

Pour la plupart des applications, les unités VPSA peuvent s'adapter à la capacité requise, jusqu'à hauteur de 150 tonnes d'oxygène/jour, mais dans certains cas, la capacité requise peut être suffisamment élevée pour justifier l'utilisation d'une unité cryogénique.

Dans les lacs et rivières, l'eau est parfois tellement polluée que la population naturelle de poissons est considérablement réduite. En Angleterre, la Tamise est traitée avec de l'oxygène : le dernier stade du traitement est appliqué par deux appareils à adsorption par variation de pression montés sur deux péniches pouvant chacun injecter jusqu'à 30 tonnes d'oxygène par jour directement dans la rivière. Ces péniches sont appelées 'Thames Bubbler' et 'Thames Vitality'.<sup>18</sup> La rivière est traitée lorsque la charge en eau de ruissellement et l'amenée d'eaux usées sont maximales. Le traitement à l'oxygène est plus avantageux que le traitement à l'air, car la pression partielle de l'oxygène est plus élevée, permettant ainsi une meilleure dissolution du gaz, malgré sa faible solubilité.

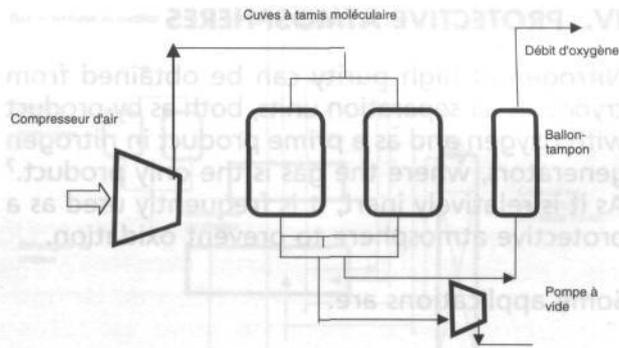


Figure 4. Unité VPSA

Le traitement à l'oxygène des lessives de pâte à papier est devenu plus fréquent depuis le milieu des années 1970. Pour le blanchiment, l'oxygène remplace le chlore et les hypochlorites utilisés autrefois. La consommation mondiale annuelle de papier avoisine 260 millions de tonnes. Actuellement, environ 55-60% de la production de pâte à papier utilise un agent de blanchiment à base d'oxygène. L'ozone et l'eau oxygénée sont souvent utilisés conjointement à l'oxygène. L'objectif ultime est de développer une usine de pâte à papier non polluante. L'utilisation de ces nouveaux agents de blanchiment pour remplacer les produits chimiques utilisés précédemment, a permis de réduire à la fois les émissions polluantes et la consommation d'eau fraîche.

## VI. CONCLUSIONS

Ce bref aperçu des procédés cryogéniques et de séparation des gaz permet d'illustrer l'étendue de l'utilisation actuelle de ces techniques. Les applications industrielles de la cryogénie et de la séparation des gaz couvrent tant de domaines et d'applications qu'elles n'ont pu être évoquées ici.

Les bénéfices pour l'humanité des applications industrielles des techniques cryogéniques et de séparation des gaz ont été illustrés.

## 17e Note d'information

# Comment améliorer l'efficacité énergétique des équipements frigorifiques

### INTRODUCTION

Les technologies du froid apportent une contribution majeure à l'humanité dans de multiples domaines, tels que la conservation des denrées alimentaires, la maîtrise de la qualité de l'air intérieur, la liquéfaction des gaz, la maîtrise des procédés industriels, la production des denrées alimentaires et des boissons, et le refroidissement des équipements informatiques. Sans les techniques frigorifiques, la société moderne ne pourrait exister. Environ 15% de la consommation mondiale d'électricité est utilisée pour l'alimentation des systèmes frigorifiques et de conditionnement d'air. Une utilisation peu efficace de l'énergie constitue un véritable gaspillage de ressources précieuses et contribue au réchauffement de la planète. L'impact des systèmes frigorifiques sur le réchauffement planétaire est principalement dû à la production de l'énergie requise pour les alimenter; il n'est qu'en très faible partie dû aux émissions de certains frigorigènes. Cette note d'information décrit comment l'efficacité énergétique des systèmes frigorifiques peut être optimisée afin de minimiser leur impact sur le réchauffement planétaire.

### PRINCIPES FONDAMENTAUX

Le froid peut être défini comme la science permettant de transférer la chaleur d'une température basse à une température haute. Un système frigorifique extrait la chaleur de la substance à refroidir (source froide) et la rejette dans l'ambiance à une température plus élevée (source chaude) comme l'indique la *Figure 1*. Ce procédé est similaire au pompage de l'eau vers un réservoir surélevé. La consommation énergétique d'un réfrigérateur est approximativement proportionnelle au taux d'extraction de la chaleur (quantité d'eau pompée) et à l'écart de température (hauteur à laquelle l'eau est pompée).

L'efficacité énergétique d'un système frigorifique est généralement exprimée à l'aide du coefficient de performance (COP), qui est le rapport entre la quantité de chaleur extraite et la quantité d'énergie consommée.

Quel que soit le type de système frigorifique utilisé, il est fondamental de minimiser l'extraction

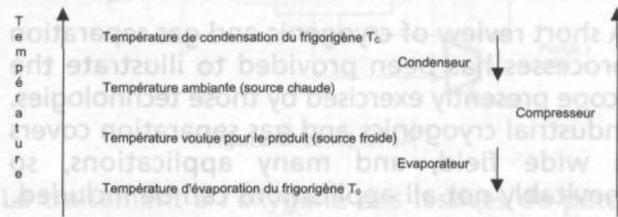


Figure 1. Schéma des températures et des flux thermiques d'un système frigorifique

de chaleur requise et de réduire le plus possible la différence entre  $T_C$  (température de condensation) et  $T_0$  (température d'évaporation). On peut minimiser l'extraction de chaleur en isolant l'enceinte frigorifique et les zones à basse température du système frigorifique, en réduisant les infiltrations d'air ambiant (dus par exemple aux ouvertures de portes et aux manques d'étanchéité) et en diminuant la consommation énergétique liée aux applications frigorifiques (par exemple ventilateurs et chariots élévateurs). On peut réduire  $(T_C - T_0)$  en maximisant la performance des transferts de chaleur au niveau du condenseur et de l'évaporateur et en minimisant les pertes de charge du frigorigène dans les tuyauteries d'aspiration et de refoulement.

### DESCRIPTION D'UN SYSTÈME FRIGORIFIQUE À COMPRESSION DE VAPEUR

Le système frigorifique à compression de vapeur le plus courant fonctionne grâce à un frigorigène situé dans un circuit fermé comprenant un compresseur, un condenseur, un organe de détente, un évaporateur et des tuyauteries de raccordement (*Figure 2*). La vapeur de frigorigène comprimée à haute pression est condensée à haute température dans le condenseur par transfert de chaleur vers le milieu environnant. La pression du frigorigène à l'état liquide est réduite dans le détendeur. A basse pression et basse température, le frigorigène se vaporise, ce qui permet d'extraire la chaleur de la substance à refroidir. Pour compléter le cycle, à la sortie de l'évaporateur, la vapeur de frigorigène à basse pression est comprimée et portée à haute pression par le compresseur. La chaleur totale rejetée au niveau du condenseur correspond à la somme de la chaleur extraite à l'évaporateur et de l'énergie consommée par le compresseur.

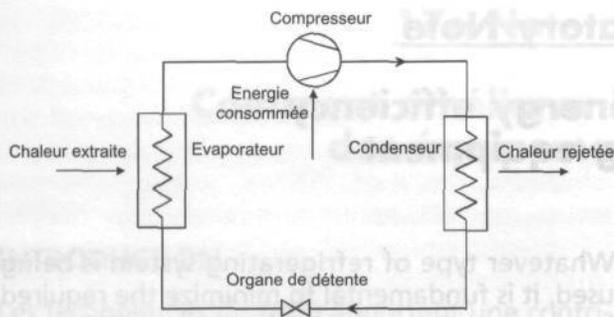


Figure 2. Schéma d'un système frigorifique à compression de vapeur simple

La perte de frigorigène du circuit frigorifique ayant un impact très néfaste sur la fiabilité du système, il est donc très important de s'assurer que les systèmes sont les plus étanches possible. Les réfrigérateurs domestiques individuels, dont le nombre est supérieur à un milliard, contiennent chacun une très faible quantité de frigorigène. On attend de ces systèmes qu'ils fonctionnent pendant au moins 20 ans sans ajout de frigorigène. L'impact de ces réfrigérateurs sur le réchauffement planétaire est significatif, mais essentiellement en raison du dioxyde de carbone émis lors de la production de l'électricité requise pour leur fonctionnement.

## IMPACT DES COMPOSANTS DU SYSTÈME SUR L'EFFICACITÉ

### Frigorigène

Peu de substances ont les caractéristiques requises pour être utilisées en tant que frigorigènes et, parmi celles-ci, peu d'entre elles ont résisté à l'épreuve du temps et sont encore utilisées aujourd'hui. La Figure 3 montre l'évolution de l'utilisation en tant que frigorigènes de certaines substances au cours de l'histoire.

Il n'existe pas de frigorigène parfait. La sélection d'un frigorigène résulte d'un compromis entre plusieurs facteurs, parmi lesquels la facilité de production, le coût, la toxicité, l'inflammabilité, l'impact sur l'environnement, la corrosivité et les propriétés thermodynamiques, ainsi que l'efficacité énergétique. Un paramètre clé est le rapport entre la pression et la température. D'une manière générale, pour une bonne efficacité énergétique, il est préférable que le point critique du frigorigène (température au-dessus de laquelle le frigorigène ne peut plus être condensé) soit élevé par rapport aux températures d'extraction et de rejet de la chaleur.

De bonnes propriétés de transport et de transfert de chaleur sont également importantes

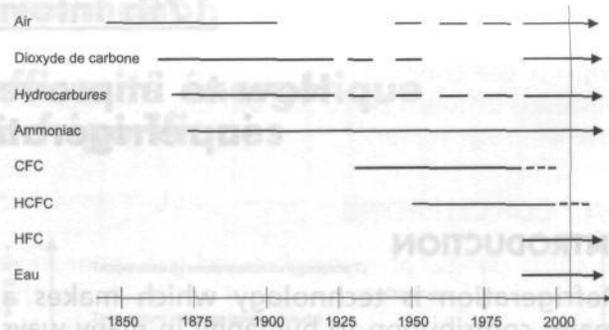


Figure 3. Frigorigènes traditionnels et historique de leur utilisation

pour l'efficacité énergétique car elles réduisent les coûts de fonctionnement et permettent des différences de température plus faibles dans les évaporateurs et les condenseurs et donc des élévations de température globalement plus faibles. De manière générale, les frigorigènes ayant une faible masse moléculaire et une faible viscosité ont les meilleures propriétés.

### Compresseur

Les compresseurs voient leur efficacité diminuer si l'écart de température est plus élevé que le niveau requis, ou si des gouttelettes de frigorigène liquide sont présentes dans les vapeurs d'aspiration ou encore si la température des vapeurs d'aspiration est trop élevée. Dans la mesure du possible, la maintenance du compresseur et le maintien de la qualité du lubrifiant sont essentiels pour une bonne efficacité énergétique. Pour certains types de compresseurs (à vis et centrifuges en particulier), l'efficacité énergétique en charge partielle est plus faible qu'en pleine charge; il convient, par conséquent, d'éviter toute utilisation prolongée en charge partielle. L'utilisation d'un système d'entraînement à vitesse variable et l'amélioration des systèmes de régulation peuvent contribuer à la réduction des pertes énergétiques, mais ils augmentent les coûts d'investissement.

### Condenseur

Afin que la température de rejet de chaleur du frigorigène soit la plus basse possible, le transfert de chaleur au niveau du condenseur doit être maximisé et la température du milieu de refroidissement maintenue aussi basse que possible. Les condenseurs évaporatifs sont souvent les plus efficaces car ils rejettent la chaleur à la température de bulbe humide de l'air ambiant. Par exemple, l'air à 25°C et 60% d'humidité relative a une température de bulbe humide de 16°C. Cependant, ces condenseurs nécessitent une maintenance attentive pour éviter toute contamination par *Legionella*. Les condenseurs



refroidis par eau, combinés à des tours de refroidissement, se rapprochent également de la température de bulbe humide de l'air ambiant mais un écart de température supplémentaire est requis pour entraîner la chaleur du frigorigène vers l'eau, et la température de rejet de chaleur du frigorigène est donc généralement plus élevée. La consommation d'eau peut être excessive si une tour de refroidissement n'est pas utilisée. Les condenseurs refroidis par air sont généralement les moins efficaces car ils rejettent la chaleur à la température de bulbe sec de l'air, qui est généralement plus élevée que la température de bulbe humide ou que la température de l'eau. Ils sont néanmoins couramment utilisés dans les systèmes de petite taille car ils sont peu coûteux, simples et nécessitent peu de maintenance.

Quel que soit le type de condenseur utilisé, il est important qu'il soit propre et ne subisse pas d'encrassement. Pour les condenseurs qui rejettent la chaleur dans l'atmosphère, il convient également de s'assurer qu'ils sont alimentés en air frais et d'éviter que l'air ne se dirige de nouveau vers l'entrée du condenseur. Les systèmes qui fonctionnent avec des pressions d'aspiration de frigorigène inférieures à la pression atmosphérique (par exemple l'ammoniac à basse température ou les systèmes de conditionnement d'air au HCFC-123) devraient utiliser des dispositifs de purge pour éliminer les incondensables du frigorigène.

### **Organe de détente**

De nombreux organes de détente requièrent une différence de pression significative pour garantir un bon fonctionnement. Ainsi, la pression de condensation est souvent maintenue de manière artificielle à des niveaux élevés, même à faibles températures ambiantes. Le principal responsable est le détendeur thermostatique traditionnel qui est souvent choisi en raison de son coût peu élevé. Une bonne solution est d'utiliser des détendeurs électroniques.

### **Évaporateur**

Tout comme les condenseurs, les évaporateurs doivent être conçus pour permettre une différence de température minimale économiquement acceptable afin que la température d'extraction de la chaleur soit la plus élevée possible pour une température de produit donnée. Une augmentation de la température d'extraction de la chaleur permet également de réduire la taille du compresseur.

L'efficacité énergétique de l'évaporateur dépend de sa taille, mais aussi du circuit, de la

distribution et de la vitesse de circulation du frigorigène, de l'utilisation de surfaces accrues et des vitesses de l'air (pour les refroidisseurs d'air). Les refroidisseurs d'air qui fonctionnent à des températures inférieures à 0°C, doivent être dégivrés régulièrement pour rester performants. Le dégivrage électrique est un procédé simple mais peu efficace et n'est donc adapté qu'aux systèmes de petite taille. Le dégivrage électrique implique une double dépense car on paye à la fois l'électricité pour chauffer l'évaporateur et celle pour le refroidir ensuite. Le dégivrage à l'eau, par gaz chauds ou par circulation du fluide frigorigène chaud à travers le refroidisseur, sont des solutions potentiellement plus efficaces. Cependant, quel que soit le système, il est important d'optimiser la fréquence et la durée du dégivrage pour éviter tout dégivrage superflu.

### **Tuyauterie de raccordement**

L'efficacité peut être réduite si la dimension des tuyauteries n'est pas adaptée ou si elle contribue à créer une perte de charge superflue ou à empêcher le retour d'huile (trop de coudes et de raccords par exemple).

### **Importance des systèmes de régulation**

Même si un système frigorifique est équipé de composants bien conçus, il ne sera efficace que si les composants sont correctement adaptés entre eux et leur fonctionnement parfaitement régulé. L'efficacité énergétique n'a pas toujours été une priorité dans la sélection des dispositifs de régulation. Dans la mesure du possible, les options suivantes devraient être évitées afin d'obtenir une meilleure efficacité énergétique :

- tiroir de variation de puissance du compresseur à vis surdimensionné;
- court-circuit des gaz chauds (renvoi des gaz comprimés vers l'entrée du compresseur);
- robinet de laminage des vapeurs entre l'évaporateur et le compresseur;
- régulation de l'évaporateur par sous-alimentation en frigorigène;
- dégivrages trop fréquents;
- régulation de la pression de condensation du condenseur, sauf en cas de nécessité.

### **CONCLUSION**

Les démarches pour améliorer l'efficacité énergétique des systèmes frigorifiques ne sont pas compliquées et elles devraient être encouragées en raison de leurs bénéfices pour l'environnement. L'amélioration de l'efficacité énergétique implique généralement un compromis entre les coûts initiaux et les coûts d'exploitation. Les

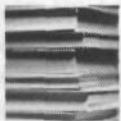


aspects économiques incitent souvent les fournisseurs d'équipement à proposer la solution la moins coûteuse à l'achat, surtout s'ils n'ont pas en charge les coûts d'exploitation du système. Des normes relatives à l'efficacité énergétique devraient être établies pour tous les systèmes frigorifiques. De plus, les gouvernements devraient légiférer pour pénaliser les fournisseurs de systèmes insuffisamment efficaces et pour récompenser les utilisateurs de systèmes efficaces au-delà du seul bénéfice engendré par la réduction des coûts d'exploitation. Si de telles mesures étaient prises, on peut raisonnablement

supposer que la consommation énergétique des systèmes frigorifiques pourrait être réduite d'au moins 20% à court terme. Selon les applications, une réduction de 30 à 50% de la consommation énergétique des systèmes frigorifiques d'ici à 2020 serait un objectif réalisable.

*Cette Note d'information a été préparée par S. Forbes Pearson, lauréat de la Médaille de l'IIF Gustav Lorentzen lors du 21e Congrès International du Froid à Washington DC en août 2003. Elle a fait l'objet d'une relecture par 24 experts du monde entier.*

The **European Cold Storage and Logistics Association (ECSLA)** has published its **2003/2004 Atlas**.



It is a comprehensive directory of European Cold Storage enterprises and includes the addresses, contact names and descriptions of over 800 public cold stores located in Austria, Belgium, Finland, France, Germany, Greece, Ireland, Italy, The Netherlands, Portugal, Spain, Switzerland, Slovak Republic, Lithuania and Slovenia.

You will find information about total capacity, freezing capacity, number of pallets, number of trucks and services offered for each cold store mentioned.

The ECSLA ATLAS 2003/2004 CD-ROM costs **130 €**.

To order: [info@ecsla.be](mailto:info@ecsla.be)

