

# Fluides caloporteurs et frigoporteurs

## Définitions. Critères de choix

par **Christophe MARVILLET**

*Ingénieur de l'École centrale de Lyon*

*Chef de laboratoire au CEA/GRETh (Groupement pour la recherche sur les échangeurs thermiques)*

*Enseignant à l'IFFI (Institut français du froid industriel) – CNAM Paris*

*Détaché à l'ANVAR/PACA (Marseille)*

<b>1. Principaux fluides et leurs applications</b> .....	BE 9 570 - 2
1.1 Fluide caloporteur : définition et exemples d'application .....	— 2
1.2 Fluide frigoporteur : définition et exemples d'application .....	— 3
1.3 Froid direct et froid indirect .....	— 4
1.4 Similitude et différence entre fluides caloporteurs et frigoporteurs .....	— 5
<b>2. Critères de choix des fluides caloporteurs et frigoporteurs</b> .....	— 5
2.1 Critères liés au domaine d'utilisation du fluide .....	— 5
2.2 Critères liés à l'exploitation de l'installation .....	— 5
2.3 Critères technico-économiques liés à l'installation recevant les fluides caloporteurs ou frigoporteurs .....	— 7
<b>Pour en savoir plus</b> .....	Doc. BE 9 573

**L**es applications des **fluides caloporteurs** pour le **chauffage dans les procédés industriels** sont fort variées et impliquent une grande diversité de fluides de par le large domaine de températures rencontré dans ces procédés : gaz, métaux liquides, sels fondus, fluides organiques. Les applications des **fluides frigoporteurs** pour le refroidissement de procédés à température inférieure à l'ambiante sont celles du **froid industriel, commercial et du conditionnement d'air**. Bien que fonctionnant dans un domaine de température notablement plus réduit ( $-70\text{ °C}/+20\text{ °C}$ ), ces fluides sont également de nature variée de par la diversité des contraintes qu'il est nécessaire de prendre en compte pour leur choix : critères énergétiques et économiques, mais également critères de sécurité et d'impact environnementaux. Après avoir rappelé les principales catégories de fluides frigo- et caloporteurs et avoir illustré d'exemples d'applications cette présentation, nous indiquons de façon exhaustive les critères de choix des fluides calo- et frigoporteurs en insistant sur leur domaine d'utilisation, les contraintes d'exploitation des systèmes énergétiques et, bien entendu, les critères technico-économiques.

*Cette étude sur les fluides caloporteurs et frigoporteurs se compose de trois articles :*

*[BE 9 570] : Fluides caloporteurs et frigoporteurs. Définitions. Critères de choix*

*[BE 9 571] : Fluides caloporteurs. Propriétés*

*[BE 9 572] : Fluides frigoporteurs. Propriétés*

*complétés par un fascicule de documentation [Doc. BE 9 573].*

Notations et symboles	
Symbole	Désignation
$A$	section
$c_p$	capacité thermique massique
COP	coefficient de performance
$d$	diamètre de la canalisation
DTLM	écart de température logarithmique entre les deux fluides
$f$	facteur de frottement
$H$	coefficient d'échange associé à un des fluides circulant dans l'échangeur
$K$	coefficient d'échange global
$L$	enthalpie massique de changement de phase
$L_t$	longueur du tube
$p$	pression
$P_t$	puissance thermique
$Q_c$	énergie de chauffe ou de compression
$Q_{\text{evap}}$	énergie reçue par l'évaporateur
$Q_p$	énergie de pompage
$Q_r$	apport thermique au produit ou énergie cédée par le produit
$Q_v$	débit volumique du fluide
$R$	résistance thermique
$S$	surface d'échange
$T_p$	température du produit
$w$	vitesse de circulation du fluide
$\lambda$	conductivité thermique du fluide
$\nu$	viscosité cinématique du fluide
$\rho$	masse volumique du fluide

## 1. Principaux fluides et leurs applications

### 1.1 Fluide caloporteur : définition et exemples d'application

De très nombreuses activités industrielles nécessitent le chauffage d'un produit à une température supérieure à la température ambiante. Deux modes de chauffage peuvent être identifiés :

- le produit est chauffé directement par des gaz de combustion (fuel, gaz naturel), par des résistances électriques, par un chauffage inductif ou à micro-ondes ;

- le produit est chauffé indirectement et un circuit intermédiaire est, dans ce cas, disposé entre la chaudière – que la chaleur soit obtenue grâce à la combustion d'un combustible fossile, à l'utilisation d'une résistance électrique, voire à une réaction nucléaire dans des crayons combustibles d'un réacteur nucléaire – et l'enceinte dans laquelle le produit doit être conditionné. Le fluide circulant dans ce circuit intermédiaire peut alors jouer plusieurs rôles. Lorsque ce fluide effectue un simple transport de la chaleur, on le dit

**caloporteur**. Lorsqu'il assure simultanément des échanges de chaleur et de travail avec le milieu extérieur, on le dit **énergétique**.

Dans cet article, nous nous limiterons exclusivement à la description des fluides caloporteurs.

#### ■ Exemples d'utilisation

De nombreux exemples du domaine de la **production d'énergie électrique** peuvent illustrer l'utilisation de fluides caloporteurs :

- dans un réacteur nucléaire de type PWR (*Pressurized Water Reactor*), la chaleur dégagée dans la grappe de crayons combustibles est évacuée grâce à un circuit d'eau pressurisée (ce fluide est alors désigné comme **fluide caloporteur**), puis transférée au fluide du circuit secondaire grâce à un générateur de vapeur. Ce fluide secondaire est vaporisé et détendu dans une turbine pour la production de l'énergie électrique. Le fluide secondaire (de l'eau, dans le cas des PWR) joue alors le rôle de fluide énergétique ;

- dans une centrale thermique solaire, le fluide caloporteur [généralement une huile thermique mais, dans quelques cas, des sels fondus (centrale Themis, par exemple)], porté à une température proche de 300 °C dans le capteur solaire (collecteur parabolique, par exemple), transmet la chaleur – au travers d'un générateur de vapeur – au fluide secondaire (de l'eau, dans ce cas), lequel est vaporisé puis détendu pour permettre la production de travail mécanique et d'énergie électrique. Ce fluide joue également le rôle de fluide énergétique ;

– l’usage de caloporteurs de type « métaux liquides » a été largement étudié pour les réacteurs nucléaires à neutrons rapides alors que les caloporteurs à sels fondus ont été utilisés dans certaines centrales solaires haute température ;

– dans une centrale thermique, les gaz de combustion à des températures proches de 1 000 °C permettent la vaporisation – au travers des échangeurs récupérateurs – du fluide énergétique (également de l’eau) qui, après détente, permettra la production d’énergie mécanique et électrique. Dans ce cas particulier, il n’est pas fait usage de fluide caloporteur.

De nombreux autres exemples relevant de la **thermique industrielle** peuvent illustrer aussi la diversité des fluides caloporteurs [1] :

– dans nombre de fours de cuisson (en particulier dans les applications alimentaires), l’air est chauffé au contact de résistances chauffantes, mis en mouvement grâce à un ventilateur puis mis en contact avec les produits alimentaires. L’air joue le rôle de fluide caloporteur ;

– les dispositifs de chauffage urbain mais, plus couramment, les dispositifs de chauffage domestique utilisent l’eau comme fluide caloporteur : pour les premiers, l’eau peut prendre différentes formes : eau surchauffée, vapeur d’eau, eau chaude ; pour les seconds, l’eau chaude est évidemment le choix le plus courant... ;

– le chauffage de dispositifs techniques (moules de plasturgie, réacteurs chimiques...) peut nécessiter des températures largement supérieures à 100 °C et l’emploi de fluides organiques permet de réduire le coût et la complexité des circuits associés à l’utilisation d’eau pressurisée ;

– certaines applications très spécifiques, caractérisées par de très hautes températures de fonctionnement, peuvent faire appel à des métaux liquides ou des sels fondus comme fluides caloporteurs.

■ **Rôle d’un fluide caloporteur**

Ainsi, le **fluide caloporteur effectue un simple transport de la chaleur** entre deux niveaux de température. Il est donc capable :

– d’emmagasiner l’énergie produite par une source de chaleur sous forme généralement de chaleur sensible (chauffage du fluide), mais également de chaleur latente (grâce à l’évaporation du fluide, comme cela est le cas en particulier dans un tube caloduc [2] [3] [18] ;

– de véhiculer cette énergie jusqu’à son point d’utilisation par circulation naturelle (comme cela est le cas dans un circuit à thermosiphon ou un caloduc) ou, plus fréquemment, par circulation forcée grâce à l’utilisation de pompes, de ventilateurs ou de compresseurs dans le circuit caloporteur ;

– de transmettre l’énergie thermique par contact direct avec le produit comme dans un four de cuisson ou par contact indirect grâce à un échangeur comme dans grand nombre de procédés industriels tels que les centrales électriques avec générateur de vapeur, par exemple.

■ **Principaux fluides caloporteurs**

● Les **fluides caloporteurs les plus courants** sont, bien entendu, l’eau et l’air, de par leur provenance naturelle et leur quantité illimitée. L’air, comme tous les gaz, peut être utilisé à toutes températures, mais son emploi est limité par un coefficient de transmission thermique médiocre. L’eau en phase liquide ou vapeur est un fluide caloporteur courant dont l’emploi est fortement handicapé par sa pression de vapeur (15 bar à 200 °C). Eau et air présentent les atouts de forte stabilité, faible coût, grande sûreté d’utilisation (inflammabilité, non toxicité).

● Les **fluides organiques** possèdent une faible pression de vapeur et une température de congélation basse : leur utilisation, par contre, impose certaines précautions vis-à-vis des risques d’incendie, de la dégradation thermique et de la toxicité.

● Les **sels fondus** et les **métaux liquides** sont réservés aux hautes températures et leur utilisation nécessite des grandes précautions en termes de sécurité et de corrosion.

Les **critères d’utilisation** d’un fluide caloporteur seront abordés en détail dans l’article [BE 9 571] de ce traité. Néanmoins, nous pouvons dès à présent, identifier les plages de température d’utilisation des différentes familles de fluides caloporteurs (tableau 1).

Fluide	Domaine usuel de température d’utilisation
Gaz (air, CO <sub>2</sub> , He...)	Ambiant à 1 000 °C
Vapeur d’eau	100 à 600 °C
Eau	Ambiant à 200 °C
Fluides organiques	Ambiant à 350 °C
Sels fondus	150 à 500 °C
Métaux liquides	200 à 700 °C

**1.2 Fluide frigoporteur : définition et exemples d’application**

De très nombreux dispositifs industriels [4] [5] nécessitent le refroidissement d’un produit à une température inférieure à la température ambiante. Contrairement aux mécanismes de chauffage pour lesquels on peut distinguer plusieurs modes d’apport thermique, le refroidissement d’un produit est réalisé, dans la quasi-totalité des cas, par une mise en contact avec un fluide ou un matériau plus froid que le produit à refroidir :

– ce fluide « froid » peut être consommé au fur et à mesure du processus de refroidissement comme cela est le cas avec l’azote liquide qui, en contact avec le produit, se vaporise, refroidit ce dernier grâce à la chaleur latente que ce fluide de refroidissement absorbe lors du processus et s’échappe généralement vers le milieu ambiant ;

– ce fluide « froid » peut également être conditionné dans un circuit ou une enceinte étanche et être régulièrement recyclé grâce à une pompe, un ventilateur ou un compresseur. Il subit alors successivement un réchauffement [ou, dans le cas d’un changement de phase, une évaporation (liquide-vapeur) ou une liquéfaction (solide-liquide)] au contact du produit à refroidir puis un refroidissement (ou, dans le cas d’un changement de phase, une condensation ou une solidification) au contact d’une paroi d’échangeur refroidie grâce à un dispositif de réfrigération. Dans ce cas, le fluide « froid » effectue un simple transport de la chaleur du produit à refroidir à la source froide que constitue le dispositif de réfrigération : on dit de ce fluide qu’il est **frigoporteur**. *A contrario*, le fluide circulant dans le groupe de réfrigération et qui, par son changement de phase, réalise la production de froid, est appelé fluide **frigorigène**.

Dans cet article, nous nous limiterons exclusivement à la description des fluides frigoporteurs et nous renvoyons le lecteur à la référence [6] dans ce traité pour une description détaillée des fluides frigorigènes.

■ **Exemples d’utilisation**

Quelques exemples relevant de la réfrigération industrielle et du conditionnement d’air peuvent illustrer la diversité des fluides caloporteurs :

– dans un tunnel de surgélation – en particulier, pour la congélation de produits alimentaires [20] –, l’air est refroidi au contact d’un échangeur de type batterie à ailettes qui constitue l’évaporateur d’un groupe de réfrigération fonctionnant, par exemple, à l’ammoniac, puis est mis en mouvement grâce à un ventilateur et enfin mis

en contact avec les produits alimentaires. L'air joue alors le rôle de fluide frigopporteur ;

- les dispositifs de climatisation urbaine via des réseaux urbains d'eau glacée utilisent l'eau additionnée d'antigel comme fluide frigopporteur [7] ;

- le refroidissement de dispositifs techniques (moules de plasturgie, réacteurs chimiques...) peut nécessiter des températures sensiblement inférieures à la température ambiante et l'emploi de fluides divers (saumures, eau glycolée, fluides organiques) pour minimiser les coûts d'investissement et d'exploitation [5].

■ **Rôle d'un fluide frigopporteur**

Ainsi, le **fluide frigopporteur** (tout comme le fluide caloporteur) **effectue un simple transport de la chaleur** entre deux niveaux de température. Il est donc capable d'emmagasiner l'énergie « frigorifique » produite par le groupe de réfrigération, de véhiculer cette énergie jusqu'à son point d'utilisation, généralement par circulation forcée grâce à l'utilisation de pompes, de ventilateurs dans le circuit frigopporteur, et d'absorber l'énergie thermique par contact direct avec le produit, comme dans un tunnel de surgélation, ou par contact indirect grâce à un échangeur, comme dans un réseau de froid urbain.

■ **Principaux fluides frigopporteurs**

- Les **fluides frigopporteurs les plus courants** sont, bien entendu, l'eau et l'air. Ils présentent les mêmes avantages et limites que dans les applications en tant que caloporteurs. Un point supplémentaire et essentiel doit être pris en compte pour les applications en tant que frigopporteurs : la température de congélation du fluide (0 °C pour l'eau) qui limite leur utilisation.

- Compte tenu des qualités particulières de l'eau, nombre de fluides frigopporteurs développés et utilisés depuis de nombreuses années sont des **mélanges aqueux** pour lesquels le composant en solution permet l'abaissement du point de congélation. C'est le cas des **saumures** (solutions aqueuses de chlorure de calcium ou de sodium), des **eaux glycolées** (mélanges eau-monoéthylèneglycol ou polypropylèneglycol), de mélanges à base d'alcool (en particulier, méthanol), voire des **eaux ammoniacales** (solutions aqueuses eau-ammoniac).

- Beaucoup plus récemment, notamment pour des usages à plus basses températures, sont apparus des **fluides organiques** variés dont nous verrons l'intérêt dans l'article [BE 9 572].

- Enfin, la recherche de performances élevées pour les fluides frigopporteurs a amené au développement et à une commercialisation récente de **frigopporteurs diphasiques** également variés : dioxyde de carbone à l'état diphasique liquide-vapeur, sorbet de glace constitué d'une phase liquide (généralement eau-alcool) et de cristaux de glace...

### 1.3 Froid direct et froid indirect

Il a été longtemps d'usage de refroidir l'air présent dans une chambre froide, un meuble frigorifique de vente ou l'air présent dans un local de travail ou d'habitation grâce au fluide frigorigène (fluide qui est le siège de la production de froid par un changement de phase liquide-vapeur et qui circule dans le groupe de réfrigération en subissant successivement une vaporisation, une compression, une condensation et une détente) par l'intermédiaire d'un échangeur adapté : cette architecture du système frigorifique est désignée comme **système à froid direct** car il n'existe pas de fluide intermédiaire entre l'air à refroidir et le fluide actif (fluide frigorigène) de la machine frigorifique.

Une tendance très forte se fait jour depuis peu d'années : la substitution des systèmes à froid direct par des **systèmes dits à froid indirect** qui se caractérisent par un circuit intermédiaire entre l'air à refroidir et le fluide frigorigène. La figure 1 illustre la conception d'un système à froid indirect. Les raisons de cette évolution sont

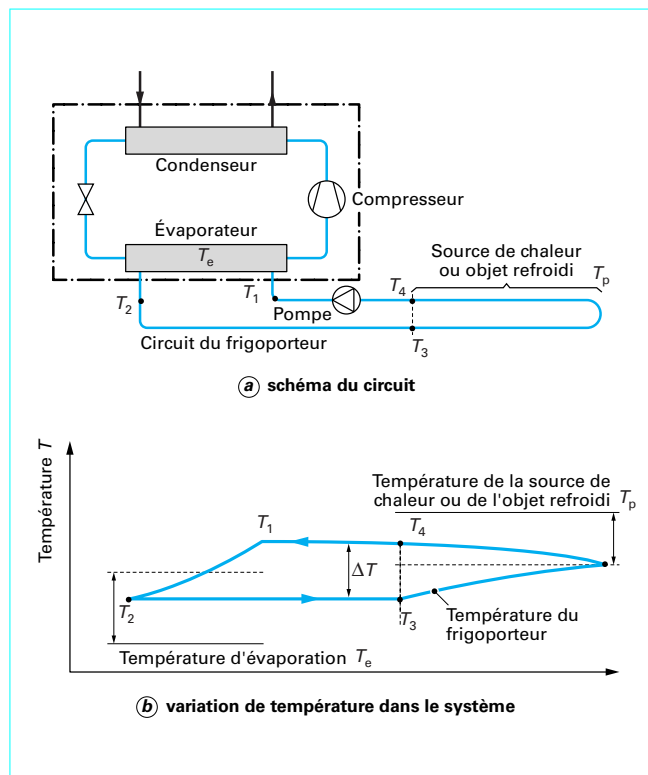


Figure 1 – Système indirect de réfrigération avec profil de température du fluide frigopporteur

évidentes : les impératifs de confinement et de réduction de la charge des machines frigorifiques sont devenus d'une grande importance. En effet, les fluides frigorigènes courants comme les HFC (hydrofluorocarbures tels que R404a, R134a...) sont considérés comme gaz à effet de serre et plus en plus restrictives par des réglementations européennes et françaises de plus en plus restrictives portant sur l'étanchéité des installations et la réduction des charges de fluides. Par ailleurs, l'utilisation plus fréquente de fluides inflammables (tels que l'ammoniac ou les hydrocarbures) impose également des réductions de charge de fluides frigorigènes et un confinement maîtrisé pour des raisons de sécurité.

L'usage des fluides frigopporteurs circulant dans le circuit intermédiaire permet, dans les systèmes frigorifiques indirects, de transférer de la chaleur de la source de chaleur (batterie dans une chambre froide, échangeur de meubles frigorifiques de vente...) à l'évaporateur du groupe de réfrigération.

L'utilisation de fluides frigopporteurs dans un système indirect présente ainsi plusieurs avantages :

- ils permettent de réduire la taille du circuit frigorifique et la longueur des tuyauteries contenant le fluide frigorigène ;
- ils autorisent l'utilisation de machines de réfrigération monoblocs et permettent une meilleure maîtrise du confinement (limitation drastique des fuites de fluides frigorigènes) grâce à cette limitation des longueurs de tuyauterie et du nombre de raccords et liaisons brasées mais également grâce à un contrôle facilité de l'étanchéité de la machine (pour les machines monoblocs, ces contrôles peuvent s'effectuer en usine avec des moyens précis et fiables de détection et des procédures maîtrisées de correction des défauts) ;
- ils amènent une simplification des procédures de maintenance et une réduction des coûts afférents.

L'utilisation de fluides frigopORTEURS génère par ailleurs des difficultés qu'il ne faut pas négliger et que seul un choix judicieux permet de réduire voire, dans certains cas, d'annuler. En effet, le système indirect implique l'utilisation d'une pompe de circulation et d'un échangeur intermédiaire, ce qui représente un coût d'investissement supplémentaire et des consommations énergétiques généralement accrues (variables suivant le niveau de température de l'application).

## 1.4 Similitude et différence entre fluides caloporteurs et frigopORTEURS

Les fonctions assurées par les fluides calo- et frigopORTEURS sont en tout point identiques. Il pourrait donc sembler artificiel de les distinguer, compte tenu de cette forte similitude. En dehors des niveaux de température qui caractérisent les conditions d'exploitation de chacun de ces fluides, il existe toutefois de grandes différences qu'il convient de souligner.

On aura noté la très large gamme de températures à laquelle un fluide caloporteur peut être soumis, puisque certains systèmes peuvent nécessiter des températures de fonctionnement supérieures à 1 000 °C. Cette caractéristique, en dehors du fait qu'elle induit une forte diversité des fluides caloporteurs pour l'adaptation aux niveaux de température, amène à privilégier des critères de choix tels que la stabilité du fluide ou un niveau acceptable de la pression de saturation à la température maximale de fonctionnement. *A contrario*, les fluides frigopORTEURS sont sélectionnés et utilisés pour une gamme de température relativement étroite puisqu'elle se situe entre 0 °C et – 50 °C. Les critères de choix sont nécessairement distincts de ceux d'un fluide caloporteur à haute température : en particulier, les critères énergétiques deviennent des critères déterminants de choix des fluides frigopORTEURS.

L'impact du choix d'un fluide caloporteur et frigopORTEUR sur les dépenses énergétiques du dispositif est en effet très sensiblement différent.

■ **Dans un dispositif utilisant un fluide caloporteur**, le besoin thermique et la température de fonctionnement du procédé étant généralement imposés, la dépense énergétique associée à l'utilisation d'un fluide caloporteur est exclusivement celle de la pompe (ou du ventilateur) de circulation. Cette dépense énergétique de pompage reste généralement largement inférieure à la dépense énergétique associée à la production de chaleur que réclame le procédé.

■ **Dans un dispositif utilisant un fluide frigopORTEUR**, le besoin frigorifique et la température de fonctionnement du procédé sont également imposés. Par contre, la dépense énergétique associée à l'utilisation d'un fluide frigopORTEUR est double. Elle inclut, bien entendu, la puissance de pompage qui peut admettre des valeurs relatives (par rapport à la puissance thermique nécessaire au processus) plus importantes du fait d'une viscosité du fluide frigopORTEUR à basse température généralement élevée. Elle inclut également la consommation supplémentaire du groupe de réfrigération, induite par l'apport énergétique que génère l'organe de pompage, mais aussi la consommation supplémentaire causée par une température d'évaporation du fluide frigorigène plus basse que celle obtenue avec un système de réfrigération direct. Cet abaissement de la température d'évaporation est la conséquence de la présence d'un échangeur supplémentaire et son amplitude est déterminée par les performances de celui-ci.

## 2. Critères de choix des fluides caloporteurs et frigopORTEURS

### 2.1 Critères liés au domaine d'utilisation du fluide

Le premier critère de choix d'un fluide calo- ou frigopORTEUR est basé sur le domaine de température d'utilisation, c'est-à-dire la valeur minimale et maximale d'utilisation.

■ **La valeur minimale d'utilisation est la température de fusion (ou de congélation)**. Elle représente évidemment une limite à ne pas dépasser. Dans de nombreux cas pratiques, on préfère utiliser le **seuil de pompabilité**, lorsque celui-ci est connu : c'est la température au-dessous de laquelle il est impossible d'utiliser une pompe centrifuge, ce qui correspond à une valeur limite de la viscosité dynamique de 500 mm<sup>2</sup>/s (soit 500 cSt).

■ **La valeur maximale d'utilisation** est conditionnée par deux paramètres distincts :

– **la pression maximale de fonctionnement du circuit** contenant le fluide qui détermine la température de saturation maximale admissible. Un fluide présentant une basse pression de saturation permet d'éviter des constructions coûteuses et de limiter les contraintes réglementaires associées aux dispositifs sous pression. Les données qui sont généralement fournies par les fabricants de fluides sont la température de saturation à la pression atmosphérique et, parfois, la courbe de saturation pression-température.

– **le seuil de température de décomposition** qui est un facteur essentiel pour certains fluides comme les fluides organiques dont la stabilité thermique est limitée. Cette connaissance est nécessaire pour limiter les risques d'encrassement des parois d'échangeur, augmenter la durée de vie du fluide et enfin limiter les risques d'incendie liés à la formation de produits plus volatils.

■ Le tableau 2 rassemble les données sur ces deux grandeurs pour un ensemble de fluides frigopORTEURS et le tableau 3 pour les fluides caloporteurs.

Les fournisseurs des produits commerciaux cités dans ces tableaux sont répertoriés dans les tableaux A et B en [Doc. BE 9 573].

### 2.2 Critères liés à l'exploitation de l'installation

Ces critères correspondent aux limitations liées à l'utilisation et à l'exploitation voire à la maintenance et à la fin de vie de l'installation contenant le fluide frigopORTEUR ou caloporteur. Ces limitations sont de différents ordres.

**Tableau 2 – Température de congélation et de saturation de quelques fluides frigopORTEURS**

Fluide (Nom commercial)	Composition massique (éventuelle si mélange) correspondant au premier composant cité (%)	Température de congélation (°C)	Température de saturation à la pression atmosphérique (°C)	Gamme de températures recommandées (°C)
Diéthylbenzène ( <i>Dowtherm J</i> )		– 73	170	– 70/315
Hydrocarbures aliphatiques ( <i>Therminol D12</i> /anciennement désigné <i>Gilotherm D12</i> )		< – 75	180	– 70/200
Polydiméthylsiloxane 2 ( <i>Syltherm XLT</i> ou <i>Basylon KT3</i> )		< – 111	175	– 100/260
<i>d</i> -Limonène		– 96,7	154	– 80/80
Monoéthylène/eau	30	– 14,4	104	– 10/60
Monoéthylène/eau	50	– 38	107	– 30/60
Polypropylène/eau	50	– 33,5	105,6	– 25/60
Chlorure de calcium/eau	20	– 18	105	– 10/40
Formate de potassium/eau			107	– 40/40
Acétate de potassium/eau			109	– 60/40

**Tableau 3 – Température de congélation et de saturation de quelques fluides caloporteurs**

Fluide (Nom commercial)	Seuil de décomposition (°C)	Température de congélation (°C)	Pression de vapeur à la température maximale d'utilisation (bar)	Température de saturation à la pression atmosphérique (°C)	Gamme de températures recommandées (°C)
Huile minérale ( <i>Thermia E</i> )	> 60	– 10		310	– 10/280
Huile synthétique aromatique de type alkylbenzène ( <i>Dowtherm T</i> )		< – 10	0,2		– 10/290
Huile synthétique aromatique ( <i>Dowtherm A</i> )		12	10,6	250	20/400
Huile synthétique aromatique ( <i>Marlotherm N</i> )	80	– 5			– 5/360
Huile silicone de type polydiméthylsiloxane ( <i>Syltherm 800</i> )	> 200	< – 40	13,7	210	– 40/400
Fluide halogéné PFC de type <i>FC 87</i>	< 150	< – 110	1	30	– 80/80
Fluide halogéné PFC de type <i>FC 32 83</i>	< 170	< – 60	1	128	– 40/130
Sel fondu de type <i>HTS1</i> (40 % nitrite de sodium, 53 % nitrate de potassium, 7 % nitrate de sodium)		142			200/400
Mercure		– 38,9		357	
Alliage sodium-potassium (78 % K, 22 % Na)		– 12,3		784	100/500
Sodium		97,8		883	200/600

### ■ Tenue des performances dans le temps de l'installation

L'absence d'agressivité des fluides vis-à-vis des matériaux courants (métaux, polymères, caoutchouc...) limite les risques de corrosion des équipements et d'encrassement des surfaces d'échange. Par ailleurs, un faible risque de **décomposition chimique ou thermique** pour les fluides organiques ou de **précipitation des sels en solution** limite les causes de dégradation des performances des systèmes. Les fluides frigopORTEURS, compte tenu des températures d'utilisation, sont peu concernés par les risques de décomposition, ce qui n'est pas le cas des caloporteurs. Les fluides organiques ne peuvent guère être utilisés au-delà de 400 °C voire moins (250 °C) lorsqu'il s'agit d'huiles minérales. Si les risques de corrosion sont faibles avec les produits organiques, ils sont majeurs avec les sels fondus et les métaux liquides et peuvent devenir importants, malgré le faible niveau de température, avec les saumures (solutions aqueuses à base de  $\text{CaCl}_2$  ou  $\text{NaCl}$ ), ou même les solutions glycolées. Enfin, les solutions aqueuses de sels (chlorure de sodium ou de calcium, voire d'acétate ou formate de potassium) peuvent être le lieu de précipitation cristalline préjudiciable au fonctionnement des dispositifs techniques.

### ■ Règles de sécurité associées à l'utilisation ou à la manipulation des fluides

De nombreux critères doivent être pris en compte.

- **Les risques d'incendie** sont caractérisés par le **point d'éclair** ou **point d'inflammabilité** (température minimale à laquelle il faut porter le liquide pour que les vapeurs émises s'allument spontanément en présence d'une flamme dans des conditions normalisées) et par le **point de feu** ou **température de combustion** (température minimale à laquelle un fluide soumis à une flamme s'allume et continue à brûler pendant au minimum 5 s). Un fluide est jugé extrêmement inflammable pour un point d'éclair inférieur à 0 °C, facilement inflammable pour un point d'éclair inférieur à 21 °C et inflammable pour un point inférieur à 55 °C. Les risques d'incendie peuvent être présents avec certains fluides organiques ; c'est le cas des huiles synthétiques de type aromatique, dont les points d'éclair se situent entre 100 et 200 °C. Ces risques sont faibles, voire inexistantes, pour la plupart des frigopORTEURS. Toutefois, l'utilisation de méthanol, d'éthanol (dont les points d'éclair sont respectivement de 15 et 13 °C) et de l'ammoniac en solution aqueuse doit être prescrite avec précaution : en effet, si ces solutions aqueuses ne présentent aucun caractère d'inflammabilité, l'émanation des vapeurs d'alcool ou d'ammoniac peut, dans certains cas extrêmes (en particulier dans des espaces confinés), amener à des situations à risque. On se rappellera, par ailleurs, que les métaux liquides sont extrêmement inflammables et que les rares dispositifs les utilisant comme fluides caloporteurs doivent être conçus en prenant en compte cette particularité.

- **Les risques d'explosion** sont caractérisés par les **limites inférieure (LIE) et supérieure (LES) d'explosivité** qui définissent les concentrations volumiques de combustible dans l'air au-dessus et au-dessous desquelles une flamme peut se propager et pour lesquelles un risque d'explosion existe. Les fluides frigopORTEURS et caloporteurs ne génèrent pas, *stricto sensu*, de risques d'explosion : toutefois, les produits de décomposition d'une huile synthétique ou les vapeurs d'ammoniac (LIE = 17 %) issues d'une eau ammoniacale peuvent être considérés comme des produits explosifs.

- **Les risques toxiques** s'expriment sous différentes formes : la toxicité par inhalation de vapeur (lorsque le fluide est volatil), la toxicité par ingestion ou par contact avec la peau (lorsque le fluide est sous forme liquide), les yeux ou les voies respiratoires. Ils sont caractérisés par des **concentrations limites** pour des expositions de durée définie pour les risques d'inhalation et par des **prescriptions de protections individuelles** pour les autres risques. Beaucoup des fluides frigo- et caloporteurs commercialisés présentent un caractère toxique souvent faible mais parfois il peut être élevé (méthanol...) et donc cet aspect doit particulièrement être pris en compte lors d'usages particuliers tels que ceux qui s'adressent à des équipements installés dans des établissements recevant du public (ERP) (comme cela est le cas de la réfrigération des meubles frigorifiques

de vente). Par ailleurs, l'emploi de fluides frigopORTEURS dans les applications alimentaires amène à des contraintes encore plus restrictives quant au choix du fluide.

- **Les risques associés aux équipements sous pression** sont généralement réduits par l'usage de fluides calo- et frigopORTEURS puisque les pressions de fonctionnement sont faibles. Un cas particulier peut toutefois être noté : l'utilisation du dioxyde de carbone diphasique liquide-vapeur comme fluide frigopORTEUR génère des pressions de plusieurs dizaines de bars dans les dispositifs.

### ■ Règles de rejet et de recyclage des fluides lors de l'exploitation, la maintenance et la fin de vie des installations pour la protection de l'environnement

Ces règles sont encore rarement explicites et, pourtant, les problèmes associés à la fuite accidentelle de ces fluides, à la destruction ou au recyclage des fluides usagés récupérés après une phase de maintenance ou de démantèlement de l'installation sont réels. Peu d'informations sont fournies sur la recyclabilité et sur les techniques de destruction des fluides commercialisés aujourd'hui. Les risques environnementaux les plus probables sont liés au rejet à l'égout ou dans les sols, mais certains fluides frigopORTEURS peuvent également présenter un potentiel de destruction de la couche d'ozone, voire une contribution à l'effet de serre.

## 2.3 Critères technico-économiques liés à l'installation recevant les fluides caloporteurs ou frigopORTEURS

Les coûts associés à l'installation recevant les fluides frigo- ou caloporteurs sont de deux types :

- **les coûts d'investissement** : dans le cas d'un circuit recevant un fluide caloporteur, les principaux organes du circuit sont le dispositif de chauffe (électrique, à combustion, par exemple), les pompes ou ventilateurs, l'échangeur qui permet de transférer la chaleur au produit, les éléments de tuyauterie (canalisation, vannes, clapets...). Dans le cas d'un circuit recevant un fluide frigopORTEUR, nous retrouvons la quasi-totalité des éléments précédents à l'exception du dispositif de chauffe qui est remplacé par un groupe de réfrigération, lequel comprend un évaporateur (en contact avec le fluide frigopORTEUR), un condenseur, un compresseur et un détendeur ;

- **les coûts d'exploitation** : ceux-ci sont essentiellement liés aux dépenses énergétiques de l'installation mais également, à moindre titre, au coût du fluide caloporteur et frigopORTEUR qui peut soit être régulièrement retraité (ajustement de pH, injection d'inhibiteur de corrosion...), soit vidangé et renouvelé.

Le choix d'un fluide calo- ou frigopORTEUR affecte nécessairement les différents coûts de l'installation.

- **Parmi les coûts d'investissement**, l'organe de mise en circulation du fluide (pompe ou ventilateur) et les éléments de tuyauterie sont dépendants du débit volumique du fluide et, en conséquence, de son **pouvoir caloporteur**. La dimension des échangeurs thermiques doit également être ajustée aux propriétés des fluides et, en particulier, à leur **pouvoir calovecteur**. Dans le cas d'un fluide caloporteur, un seul échangeur est à considérer : l'échangeur fluide caloporteur/produit. Dans le cas d'un fluide frigopORTEUR, deux échangeurs doivent être pris en compte : l'échangeur fluide frigopORTEUR/produit mais également l'évaporateur du groupe de réfrigération (échangeur fluide frigopORTEUR/fluide frigorigène).

- **Parmi les coûts d'exploitation**, les dépenses énergétiques constituent les postes les plus importants. On doit là encore distinguer les fluides caloporteurs des fluides frigopORTEURS.

Pour les premiers, seule la dépense énergétique associée à la pompe ( $Q_p$ ) ou au ventilateur est à prendre en compte. L'énergie de chauffe ( $Q_c$ ) est imposée par le processus de traitement du produit

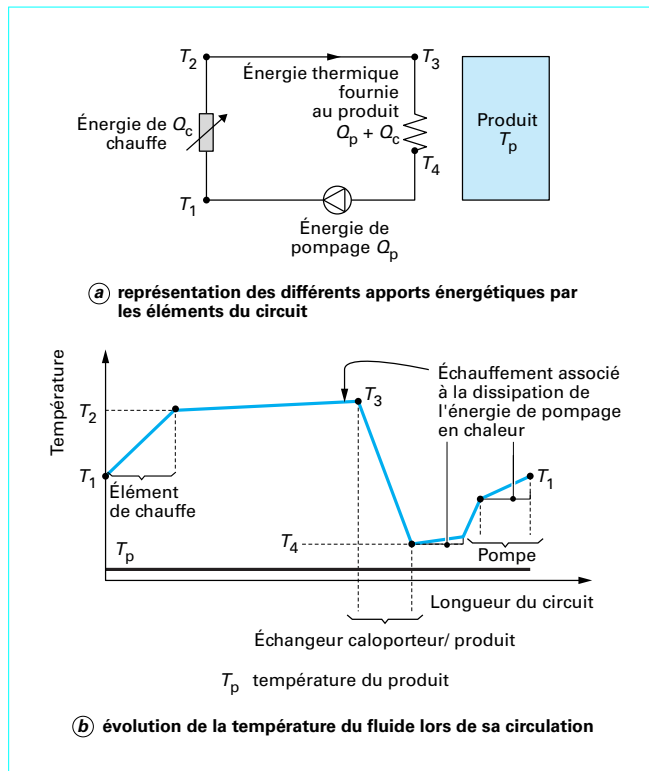


Figure 2 – Circuit caloporteur

qui reçoit l'énergie totale ( $Q_r = Q_c + Q_p$ ) cédée par le fluide caloporteur dans l'échangeur (cf. figure 2). L'apport thermique  $Q_r$  au produit résulte de la somme de l'énergie de chauffe et de l'énergie thermique consécutive à la dégradation de l'énergie mécanique de pompage en chaleur, du fait des frottements lors de la circulation du fluide, des dissipations internes à la pompe voire, lorsque le moteur électrique est refroidi par le fluide caloporteur, des pertes thermiques de ce dernier.

Pour les circuits à fluides frigopORTEURS (figure 3), le produit à refroidir cède l'énergie ( $Q_r$ ) à l'évaporateur du groupe de réfrigération. Cette énergie est accrue de l'énergie de pompage ( $Q_p$ ):  $Q_{\text{evap}} = Q_r + Q_p$ .

Le compresseur du groupe de réfrigération doit fournir l'énergie de compression ( $Q_c$ ) calculée à partir du coefficient de performance froid (COP<sub>f</sub>) de réfrigération à partir de l'expression suivante :

$$Q_c = (Q_p + Q_r) / \text{COP}_f$$

Le terme de performance COP<sub>f</sub> est lui-même dépendant de nombreux paramètres : rendement du moteur électrique et du compresseur, fluide frigorigène mais surtout de la température d'évaporation qui règne dans l'évaporateur. On représente (figure 4) le facteur multiplicatif théorique  $1/\text{COP}_f$  (les rendements du compresseur et du moteur sont supposés égaux à 1) en fonction de la température d'évaporation du fluide pour les fluides frigorigènes les plus courants. On comprend que les coûts énergétiques associés aux choix de fluide frigopORTEUR sont en sus de l'énergie de pompage :

– l'accroissement de l'énergie consommée (par rapport au système à froid direct) par le compresseur induit par l'absorption à l'évaporateur de cette énergie de pompage soit :

$$\Delta Q_c = Q_p / \text{COP}_f$$

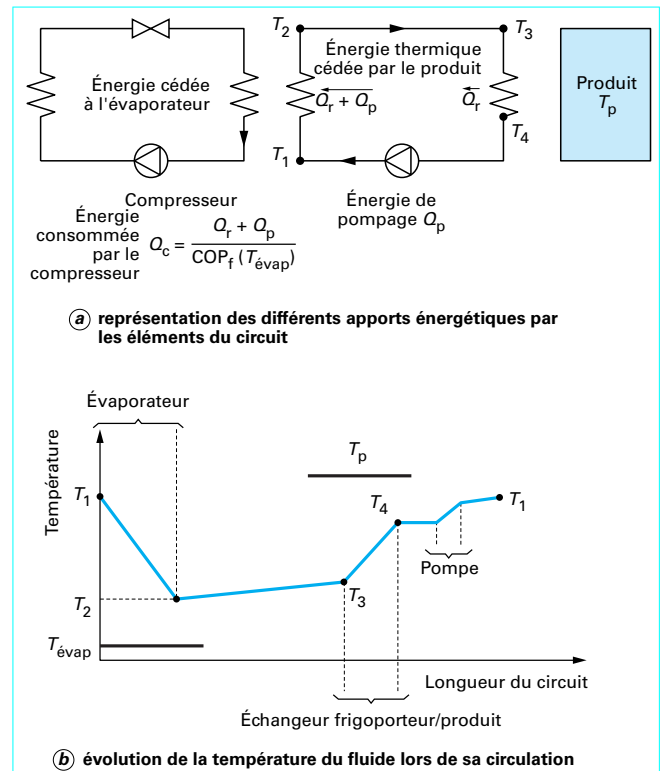


Figure 3 – Circuit frigopORTEUR

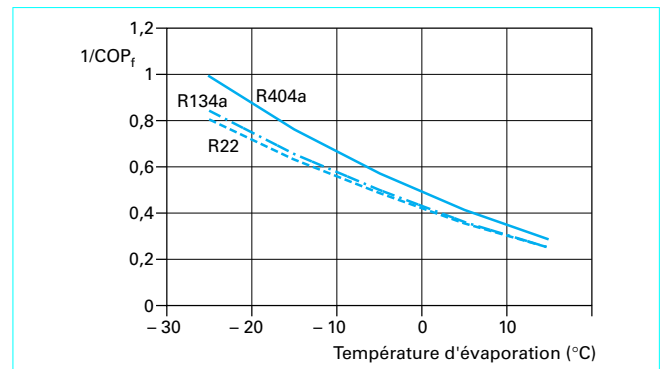


Figure 4 – Inverse du coefficient de performance pour quelques fluides frigorigènes courants

– l'accroissement de l'énergie de compression à cause de l'abaissement de la température d'évaporation par rapport à un système de froid direct du fait de la présence d'un échangeur supplémentaire entre le produit à refroidir et le fluide frigorigène :

$$\Delta Q_c' = Q_r \Delta \text{COP}_f / \text{COP}_f^2$$

Compte tenu de la complexité de certains dispositifs industriels, on comprend que l'optimisation des coûts globaux de l'installation et l'identification d'un choix optimal du fluide calo- ou frigopORTEUR ne peuvent être réalisées que cas par cas, en prenant en compte les spécificités de chaque installation. On comprend également que



cette étude est indispensable pour les circuits frigopORTEURS, car les enjeux en termes énergétiques et coûts d'équipements sont importants. Dans le cas des fluides caloporteurs, cette étude peut apparaître de moindre importance, car le coût de l'énergie de pompage reste marginale et un nombre plus restreint d'équipements, généralement moins coûteux aussi, sont concernés par le choix du fluide.

Pour permettre une comparaison simple des performances des différents fluides, il est nécessaire de définir quelques critères de comparaison : pour cela, on distinguera les critères de dimensionnement qui déterminent les coûts d'investissement et les critères de consommation énergétique qui déterminent les coûts d'exploitation.

### 2.3.1 Critères de dimensionnement : pouvoir caloporteur et calovecteur

■ **Les diamètres des canalisations et des éléments de tuyauterie ainsi que la taille de la pompe** (ou du ventilateur) sont déterminés par le pouvoir caloporteur du fluide. Celui-ci est défini comme l'aptitude au transport de l'énergie thermique du fluide. La puissance thermique  $P_t$  transportée est évaluée aisément à partir du débit volumique du fluide  $Q_v$  (qui détermine la taille des équipements) comme l'expriment les relations suivantes.

● **Lorsque le fluide est en simple phase** et que le transfert est réalisé par chaleur sensible [8], la puissance thermique est donnée par :

$$P_t = Q_v \rho c_p \Delta\theta$$

avec  $c_p$  capacité thermique massique du fluide,  
 $\rho$  masse volumique du fluide,  
 $\Delta\theta$  écart de température entre l'entrée et la sortie du dispositif de chauffe.

Le **pouvoir caloporteur** qui représente la puissance thermique transportée par unité de débit-volume et d'écart de température est alors égal à :

$$\rho c_p$$

● **Lorsque le fluide est en double phase** et que le transfert est réalisé par chaleur latente [8] [22], la puissance thermique est donnée par :

$$P_t = Q_v \rho L \Delta x$$

avec  $L$  enthalpie massique de changement de phase,  
 $\Delta x$  variation de titre massique de vapeur (du fluide frigopORTEUR) entre l'entrée et la sortie du dispositif de refroidissement (évaporateur du groupe de réfrigération).

Le **pouvoir caloporteur** du fluide est alors donné par :

$$\rho L$$

■ **Les surfaces d'échange des échangeurs thermiques** sont déterminées par le pouvoir calovecteur du fluide. Elles dépendent des écarts de température entre les fluides qui les traversent ainsi que du coefficient d'échange global entre ces deux fluides. Le fluide calo- ou frigopORTEUR influe sur ce coefficient d'échange global  $K$  par l'intermédiaire du coefficient d'échange associé ( $H_{fc}$ ) à ce fluide et du coefficient de transfert associé au fluide ou au produit à refroidir ( $H_p$ ) ainsi qu'à d'éventuelles résistances thermiques supplémentaires  $R$  (engendrées par la conduction dans la paroi ou par l'encrassement, par exemple) :

$$1/K = 1/H_{fc} + 1/H_p + R$$

La surface d'échange  $S$  de l'échangeur est déduite de la puissance thermique  $P$  et de l'écart de température logarithmique entre les deux fluides (DTLM) :

$$S = P_t / (K \times DTLM)$$

Seul le coefficient  $H_{fc}$  entre la paroi d'échange et le fluide calo- ou frigopORTEUR est affecté par leurs propriétés physiques.

● **En simple phase et en régime turbulent**, la corrélation de transfert en convection forcée dans un tube lisse s'exprime par la relation de Colburn sous forme adimensionnelle à partir des nombres de Nusselt ( $Nu$ ), de Reynolds ( $Re$ ) et de Prandtl ( $Pr$ ) :

$$Nu = 0,023 \times Re^{0,8} Pr^{0,33}$$

où :

$$Re = \frac{wd}{\nu}, Nu = \frac{H_{fc}d}{\lambda}, Pr = \frac{\rho \nu c_p}{\lambda}$$

avec  $w$  vitesse de circulation du fluide,  
 $d$  diamètre de la canalisation,  
 $\lambda$  conductivité thermique du fluide,  
 $\nu$  viscosité cinématique du fluide.

Pour une vitesse de circulation identique, le coefficient de transfert entre paroi et fluide est alors proportionnel au nombre caractéristique suivant :

$$\lambda^{0,66} (\rho c_p)^{0,33} \nu^{-0,47}$$

● **En simple phase et en régime laminaire**, la corrélation de transfert en convection forcée dans un tube lisse s'exprime par la relation adimensionnelle suivante :

$$Nu = 1,86 (Re Pr)^{0,33} (d/L_t)^{0,33}$$

avec  $L_t$  longueur de tube de l'échangeur.

Pour une vitesse de circulation identique, le coefficient de transfert entre paroi et fluide est alors proportionnel au nombre caractéristique suivant qui ne dépend pas de la viscosité cinématique du fluide :

$$\lambda^{0,66} (\rho c_p)^{0,33}$$

#### Remarques

1. Il est clair que plus élevées sont les valeurs de ces nombres caractéristiques, plus performant est le fluide frigo- ou caloporteur car, grâce à un pouvoir caloporteur élevé, on réduit le diamètre des canalisations et la taille de la pompe et, grâce à un pouvoir calovecteur élevé, la dimension des échangeurs est réduite.
2. Le choix de réaliser les comparaisons à vitesse de circulation identique s'explique par les faits suivants : les pompes utilisées sont de type centrifuge et imposent un débit volumique (et donc une vitesse de circulation) sensiblement constant et, par ailleurs, lors du dimensionnement d'une installation, on retient la valeur maximale admissible de la vitesse pour minimiser la dimension des tuyauteries et des accessoires.
3. Le choix de réaliser la comparaison à écart de température constant entre les fluides est justifié par le fait que, de cette façon, nous évitons de modifier la température du fluide frigorigène (dans le cas d'un circuit frigopORTEUR) et annulons l'impact sur la consommation énergétique du système que cette température peut avoir.
4. L'utilisation de ces nombres caractéristiques pour la comparaison des pouvoirs calovecteurs des fluides doit être réalisée avec précaution. En effet, la comparaison suppose que les fluides s'écoulent avec des régimes identiques (laminaire et turbulent) et dans des échangeurs tubulaires avec tube lisse : pour d'autres types d'échangeurs (à plaques, par exemple), voire d'autres types de tubes (tubes corrugués, tubes à rainures internes), les corrélations d'échange et les critères de transition [2] [9] retenus entre régimes laminaire et turbulent sont différents et les nombres caractéristiques du pouvoir calovecteur sont distincts de ceux présentés dans ce paragraphe.

### 2.3.2 Critères énergétiques

Comme nous l'avons signalé précédemment, évaluer la dépense énergétique d'un dispositif utilisant un fluide calo- ou frigoporteur est un exercice délicat car cette dépense doit intégrer le terme direct (puissance de pompage pour un circuit de chauffe ou de refroidissement) et le terme indirect (uniquement pour le circuit de refroidissement avec groupe de réfrigération). Il n'existe évidemment pas de critère absolu pour une comparaison entre eux des fluides : nous privilégierons un critère de type coefficient de performance qui s'exprime par le rapport entre la puissance thermique extraite (ou fournie) au produit ( $P_t$ ) et la puissance de pompage ( $P_p$ ) nécessaire à la circulation du fluide frigo- ou caloporteur dans l'échangeur fluide/produit et cela à même vitesse de circulation du fluide, même écart de température entre le produit et le fluide calo- ou frigoporteur et géométrie d'échangeur inchangée :

$$C = P_t/P_p$$

Si le coefficient de transfert entre le produit et l'échangeur ( $H_p$ ) est très supérieur au coefficient de transfert entre frigo- ou caloporteur et échangeur ( $H_{fc}$ ) et que les résistances thermiques annexes sont négligeables, alors ce coefficient  $C$  se ramène à :

$$C = \frac{H_{fc}(DTLM)S}{P_p}$$

La puissance de pompage  $P_p$  est égale au produit du débit volumique du fluide que l'on suppose incompressible et de la perte de pression  $\Delta p$  aux bornes de l'échangeur :

$$P_p = Q_v \Delta p = w A \Delta p$$

et

$$\Delta p = f \frac{L_t \rho w^2}{d \cdot 2}$$

avec  $f$  facteur de frottement dans les tubes de l'échangeur,

$A$  section de passage de ces mêmes tubes.

Le facteur de frottement est calculé à partir de la loi de frottement  $f$  qui s'exprime en régime turbulent par :

$$f = 0,316 Re^{-0,25}$$

et en régime laminaire par :

$$f = 16/Re$$

Dans les conditions de similitude retenues, ce coefficient  $C$  est proportionnel au rapport du coefficient de transfert et du coefficient de frottement et de la masse volumique :

$$C = \alpha \frac{H_{fc}}{\rho f}$$

Compte tenu des lois d'échange et de frottement en tube lisse indiquées précédemment, le critère de performance énergétique s'exprime par :

$$C = \lambda^{0,66} (\rho c_p)^{0,33} v^{-0,47} / \rho v^{0,25} = \lambda^{0,66} \rho^{-0,66} c_p^{0,33} v^{-0,72}$$

en régime turbulent

$$C = \lambda^{0,66} (\rho c_p)^{0,33} / \rho v = \lambda^{0,66} \rho^{-0,66} c_p^{0,33} v^{-1}$$

en régime laminaire

**Nota :** ce coefficient  $C$  ne doit pas être confondu avec le terme COP. En effet le terme  $C$  a un sens très spécifique inhabituel par rapport aux usages des frigoristes qui identifie le COP comme rapport de la puissance frigorifique à la puissance du compresseur.

### 2.3.3 Critères technico-économiques de comparaison : synthèse

Sont rassemblés dans le tableau 4 l'expression des critères de comparaison des fluides caloporteur et frigoporteur monophasiques avec les principales propriétés physiques qui les caractérisent. Dans ce tableau, nous complétons les données précédentes en présentant l'expression généralisée des critères de pouvoir calovecteur (dimensionnement des échangeurs) et critère énergétique pour des surfaces d'échange non lisses à partir des données portant sur les lois de transfert et de frottement en régime turbulent :

$$Nu = a Re^N Pr^{0,33}$$

$$f = b Re^{-M}$$

Tableau 4 – Principaux critères de performance des fluides caloporteurs et frigoporteurs

Critères de performance	Régime d'écoulement laminaire	Régime d'écoulement turbulent (1)
<b>Pouvoir caloporteur</b> (coût des éléments de tuyauterie et de la pompe)	$\rho c_p$	$\rho c_p$
<b>Pouvoir calovecteur</b> (coûts des surfaces d'échange)	Échangeur à tubes lisses : $\lambda^{0,66} (\rho c_p)^{0,33}$	Échangeur à tubes lisses : $\lambda^{0,66} (\rho c_p)^{0,33} v^{-0,47}$
		Échangeur à surface améliorée : $\lambda^{0,66} (\rho c_p)^{0,33} v^{0,33} - N$
<b>Coefficient de performance énergétique</b> (coûts énergétiques directs)	Échangeur à tubes lisses : $\lambda^{0,66} \rho^{-0,66} c_p^{0,33} v^{-1}$	Échangeur à tubes lisses : $\lambda^{0,66} \rho^{-0,66} c_p^{0,33} v^{-0,22}$
		Échangeur à surface améliorée : $\lambda^{0,66} \rho^{-0,66} c_p^{0,33} v^{0,33} - N - M$

(1)  $N$  et  $M$  sont les exposants des lois de transfert et de frottement spécifiques à chaque géométrie de surface d'échange.