

# Fluides frigoporteurs

## Propriétés

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. Gaz</b> .....	BE 9 572 - 2
<b>2. Eau et saumures</b> .....	— 2
2.1 Eau .....	— 2
2.2 Principaux sels utilisés dans les saumures .....	— 3
2.3 Principales propriétés des saumures .....	— 3
<b>3. Mélanges eau-alcool et eau-ammoniaque</b> .....	— 4
<b>4. Fluides organiques</b> .....	— 7
<b>5. Fluides frigoporteurs diphasiques</b> .....	— 8
5.1 Fluide frigoporteur diphasique liquide-vapeur : dioxyde de carbone.....	— 8
5.2 Fluides frigoporteurs diphasiques liquide-solide : sorbets de glace.....	— 9
5.2.1 Propriétés des sorbets de glace ( <i>ice slurry</i> ).....	— 9
5.2.2 Différentes méthodes de production de sorbets de glace .....	— 9
5.2.3 Domaines d'applications des sorbets de glace.....	— 10
<b>6. Performances énergétiques des fluides frigoporteurs : comparaison et choix</b> .....	— 11
<b>7. Critères de choix d'un fluide frigoporteur</b> .....	— 12
<b>Pour en savoir plus</b> .....	Doc. BE 9 573

L'intérêt porté aux fluides frigoporteurs et à la recherche de fluides à haute performance pour les applications à basse température est récent. Traditionnellement, les ingénieurs frigoristes faisaient appel à quatre catégories de fluides frigoporteurs pour les usages courants :

— les gaz, et tout particulièrement l'air pour un très grand nombre d'applications (tunnel de surgélation...) et l'azote gazeux lorsque les niveaux de température (notamment pour des températures inférieures à la température du point triple du  $\text{CO}_2$ ) l'imposaient ;

— les saumures qui sont des solutions aqueuses à base de sels inorganiques tels que le chlorure de calcium, le carbonate de potassium ou, plus rarement, le chlorure de sodium pour certains usages alimentaires ;

— les mélanges d'eau et d'antigel à base d'alcools tels que le monoéthylène-glycol et le propylène-glycol, voire, plus rarement, des mélanges d'eau et ammoniaque (eau ammoniacale) ;

— enfin, pour des applications à basse température, les hydrocarbures halogénés de type R11 [trichlorofluorométhane ( $\text{CCl}_3\text{F}$ ), chlorure de méthylène ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ) et trichloroéthylène ( $\text{CCl}_2\text{CHCl}$ )].

Des réglementations récentes (susceptibles de se durcir dans les prochaines années) ont visé à la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, dont les fluides frigorigènes les plus courants (les HFC, par exemple),

et favorisent l'émergence des systèmes à froid indirect. Des interdictions plus anciennes ont touché la production des CFC de type R11 et des réglementations draconiennes concernent l'usage de certains fluides halogénés (trichloroéthylène).

Ces évolutions réglementaires récentes ont poussé les ingénieurs frigoristes à s'intéresser à de « nouveaux fluides » présentant des performances énergétiques satisfaisantes à basse température ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , par exemple) tout en offrant des qualités environnementales, de toxicité et d'inflammabilité acceptables. Sont apparus sur le marché de nouveaux fluides qui s'ajoutent aux précédents :

- des solutions aqueuses avec des sels tels que l'acétate de potassium, le formate de potassium, voire des mélanges d'acétate et de formate de potassium ;
- des mélanges d'eau et d'alcool de type éthanol, méthanol, glycérol, ou des mélanges à base éthanol/glycérol ;
- des fluides organiques divers comparables à ceux décrits comme fluides caloporteurs (cf. article [BE 9 571]) : huiles aromatiques, huiles silicones, hydrofluoroéther, terpène à base d'agrumes...

Plus spécifiquement, la recherche de performances énergétiques élevées amène à l'émergence de fluides frigoporteurs « diphasiques » de deux types distincts :

- les frigoporteurs diphasiques « liquide-vapeur » : le dioxyde de carbone est le fluide dont l'usage se développe depuis peu d'années ;
- les frigoporteurs diphasiques « liquide-solide » constitués d'un médium liquide à base de mélange aqueux et de cristaux de glace en suspension dans ce médium. Une large diversité de produits existe tant par la nature du composé en solution dans l'eau (alcool, sel) que par le dispositif technique de production des cristaux.

Cet article est le dernier volet de l'étude concernant les fluides caloporteurs et frigoporteurs.

Pour les définitions générales, les critères de choix ainsi que pour consulter le tableau des notations et symboles, le lecteur se reportera à l'article [BE 9 570].

## 1. Gaz

L'azote, l'air et l'hélium présentent, aux températures inférieures à  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , des propriétés proches de celles décrites précédemment pour ces gaz utilisés comme gaz caloporteurs et les principales remarques faites dans l'article précédent [BE 9 571] s'appliquent aux gaz utilisés en tant que frigoporteurs [15].

Le seul aspect spécifique de l'utilisation de ces fluides à basses températures est associé à la présence de vapeur d'eau en mélange avec ces gaz et des risques de formation de givre sur les parois refroidies du circuit (souvent, l'évaporateur du groupe de réfrigération) qu'elle génère. Cette présence de vapeur d'eau, dont les conséquences sont généralement néfastes, trouve son origine dans les défauts d'étanchéité des circuits ou, pour les processus industriels agroalimentaires, par les pertes en eau des aliments. Cette formation de givre induit des dégradations des performances thermiques et énergétiques des systèmes, voire une obstruction partielle ou totale des circuits ; des cycles de dégivrage sont la plupart du temps indispensables pour éliminer régulièrement ces dépôts. Les dispositifs de dégivrage sont décrits dans les références [13] et [14] de ce traité.

## 2. Eau et saumures

### 2.1 Eau

Le médium frigoporteur le plus utilisé est l'eau : c'est d'ailleurs le médium le plus intéressant chaque fois que l'on peut se contenter de températures supérieures à  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . On distingue :

- l'eau glacée dont la température est très voisine de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  et qui est souvent associée à l'utilisation d'un stockage de froid sous forme de glace sur des tubes ou des plaques ;
- l'eau fraîche pour des températures sensiblement supérieures à  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Pour les cas où des éléments du circuit frigoporteur présentent des températures inférieures à  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (les éléments les plus « froids » du circuits sont les tubes ou plaques de l'évaporateur), seules des solutions aqueuses contenant un composant favorisant l'abaissement du point de congélation peuvent être utilisées : c'est le cas de nombreux sels organiques ou inorganiques [7].

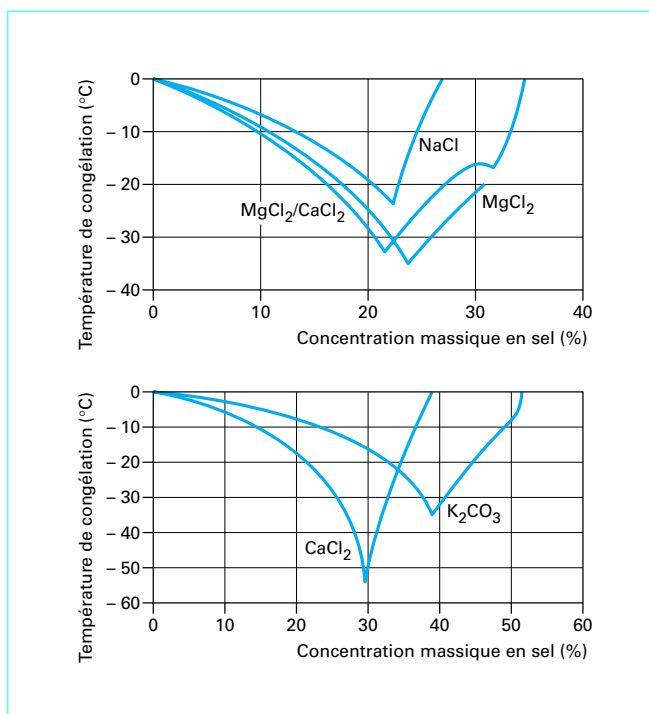


Figure 1 – Température de congélation de différentes saumures en fonction de la concentration en sel

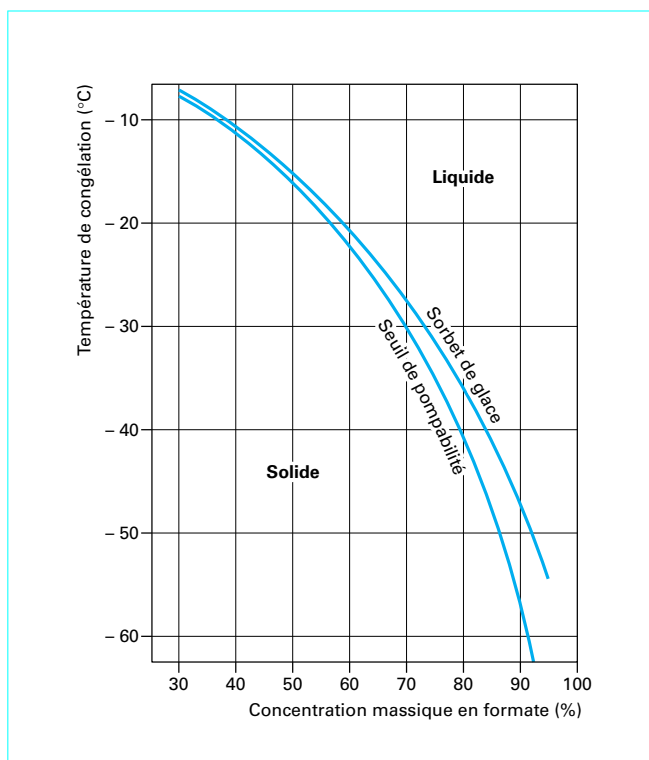


Figure 2 – Température de congélation d'une saumure à base de formate/acétate de potassium

## 2.2 Principaux sels utilisés dans les saumures

La mise en solution de sels permet d'abaisser de façon très importante la température de congélation de la solution comme on le voit figure 1 pour les saumures les plus courantes (à base de sels inorganiques) que sont le chlorure de calcium et de sodium, le chlorure de magnésium, le carbonate de potassium. Ces courbes mettent toutes en évidence la présence d'un eutectique caractérisé par le point de congélation le plus bas. Ainsi, les points de congélation minimaux s'échelonnent entre  $-21,2^{\circ}\text{C}$  pour le chlorure de sodium et  $-55^{\circ}\text{C}$  pour le chlorure de calcium (tableau 1).

Tableau 1 – Propriétés des saumures avec sels inorganiques

Sel	Formule chimique	Composition massique de l'eutectique (kg/kg)	Température minimale de congélation ( $^{\circ}\text{C}$ )
Chlorure de sodium	NaCl	0,231	$-21,2$
Chlorure de magnésium	MgCl <sub>2</sub>	0,206	$-33,6$
Chlorure de calcium	CaCl <sub>2</sub>	0,299	$-55$
Carbonate de calcium	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,389	$-35$

Dans les années 1990 sont apparues sur le marché d'autres solutions aqueuses à base de sels organiques tels que l'acétate de potassium et le formate de potassium qui présentent certains avantages par rapport aux saumures traditionnelles et, en particulier :

- des températures de fonctionnement notablement plus basses ( $< -60^{\circ}\text{C}$  pour les solutions à base de formate de potassium) de par l'absence de point eutectique comme le montre la figure 2 pour une solution à base d'acétate/formate de potassium.

Les noms commerciaux de ces différentes solutions (additionnées pour la plupart d'inhibiteurs de corrosion) sont donnés en [Doc. BE 9 573], tableau A.

## 2.3 Principales propriétés des saumures

Les saumures présentent généralement des propriétés thermodynamiques et thermocinétiques intéressantes de par la présence importante d'eau dans la solution : forte capacité thermique massique, forte conductivité thermique et viscosité cinématique acceptable. Pour l'ensemble des solutions, l'adjonction supplémentaire de sels tend à dégrader la conductivité thermique et la capacité thermique et à accroître la viscosité cinématique comme on peut l'apprécier figure 3 pour le chlorure de calcium. La comparaison des propriétés thermodynamiques des différentes saumures doit être réalisée avec précaution : température et composition doivent être parfaitement définies. Il est d'usage de comparer ces solutions à températures identiques et avec une composition de sels telle que la température de congélation de la saumure est identique. L'exemple du tableau 2 illustre cette méthode : les propriétés des différentes saumures sont données à  $-30^{\circ}\text{C}$  pour une composition en sel permettant un point de congélation à  $-40^{\circ}\text{C}$ . Les valeurs indiquées montrent de faibles écarts des propriétés à l'exception de la viscosité cinématique. On peut noter :

- des masses volumiques élevées, toutes supérieures à  $1\,000\text{ kg/m}^3$  ;
- des capacités thermiques massiques relativement élevées autour d'une valeur de  $2\,800\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$  ;
- des conductivités thermiques élevées autour d'une valeur de  $0,46\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  ;
- des viscosités variables suivant le produit retenu ( $9$  à  $28\text{ mm}^2/\text{s}$ ), mais présentant toutes des valeurs relativement faibles (tableau 2).

**Tableau 2 – Propriétés des différentes saumures à – 30 °C**

Saumure	Concentration massique en sel pour une température de congélation de – 40 °C (%)	Masse volumique de la saumure (kg/m <sup>3</sup> )	Capacité thermique massique (J/(kg · K))	Conductivité thermique (W/(m · K))	Viscosité cinématique (mm <sup>2</sup> /s)
Chlorure de calcium	25,7	1 163	2 763	0,494	12,0
Chlorure de magnésium	20	1 190	2 964	0,46	16,8
Carbonate de potassium	37	1 410	2 627	0,463	27,4
Acétate de potassium	39	1 350	2 592	0,42	25,0
Formate de potassium	41	1 360	2 600	0,44	9,0

Le **chlorure de sodium** présente l’avantage d’un faible coût et d’une absence de toxicité. Par contre, ses saumures ne sont utilisées qu’au-dessus de – 10 °C et sont très corrosives.

Le **chlorure de calcium** peut être utilisé pour des températures supérieures à – 35 °C. Les solutions sont également corrosives et ne peuvent être mises en contact avec les produits alimentaires. Les principales propriétés des saumures à base de chlorure de calcium sont données figure 3.

Les solutions à base de chlorure sont généralement constituées d’un **mélange de chlorure de calcium et de chlorure de magnésium** avec additions de substances tampons pour maintenir un pH proche de 7 et réduire les risques d’attaque chimique. Avec le temps et par suite de la dissolution du CO<sub>2</sub> contenu dans l’air, la saumure peut devenir de plus en plus acide et les substances tampons doivent permettre de réduire cette acidité.

Les **saumures carbonatées** sont utilisées dans des installations comprenant plusieurs matériaux métalliques (acier, aluminium, cuivre...). Ces saumures très alcalines ne doivent pas être mélangées avec des saumures à base de chlorure au risque de formation de précipités en grande quantité. Ces saumures étant également corrosives, il est également nécessaire d’y adjoindre des inhibiteurs de corrosion qui permettent de réaliser un film de protection sur les métaux. Ces inhibiteurs de corrosion peuvent contenir des chromates voire des nitrites, amines et phosphates et présenter des effets environnementaux néfastes en cas de rejets accidentels à l’égout.

Les **saumures organiques à base d’acétate ou de formate de potassium** permettent des températures de fonctionnement jusqu’à – 60 °C avec des propriétés thermodynamiques satisfaisantes. Elles sont non toxiques, compatibles avec un contact alimentaire et les

inhibiteurs de corrosion ne contiennent pas de composés dangereux pour l’environnement (cas d’un rejet accidentel).

Pour les installations avec saumures, il est conseillé d’effectuer au moins une fois par an une analyse complète de la solution en vue de contrôler la teneur en inhibiteurs de corrosion.

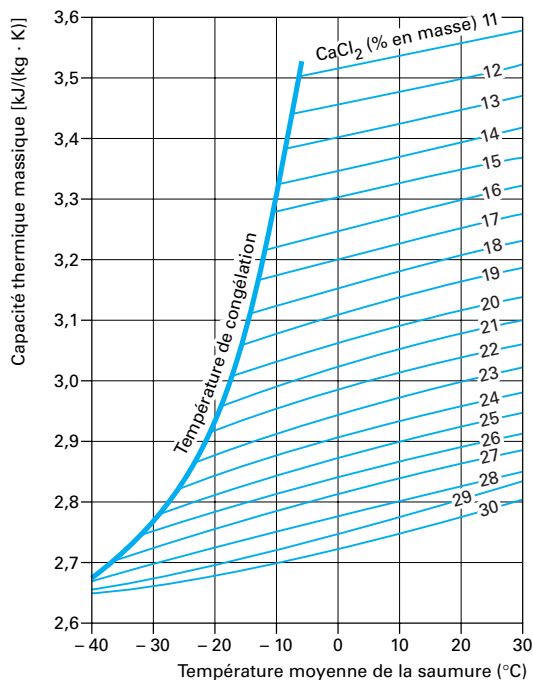
### 3. Mélanges eau-alcool et eau-ammoniac

La mise en solution dans l’eau de fluides à bas point de congélation, comme les alcools, pour obtenir des fluides frigoproteurs est une technique traditionnellement utilisée par les frigoristes. Les antigels les plus couramment employés sont : l’éthylèneglycol (monoéthylèneglycol de formule C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>(OH)<sub>2</sub>), le propylèneglycol (1-2 propylèneglycol de formule C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub>). Plus anecdotique reste l’utilisation d’éthanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH), de méthanol (CH<sub>3</sub>OH) et de glycérol (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub>). Par ailleurs, l’ammoniac dissous dans l’eau (eau ammoniacale) est également utilisé comme fluide frigoproteur.

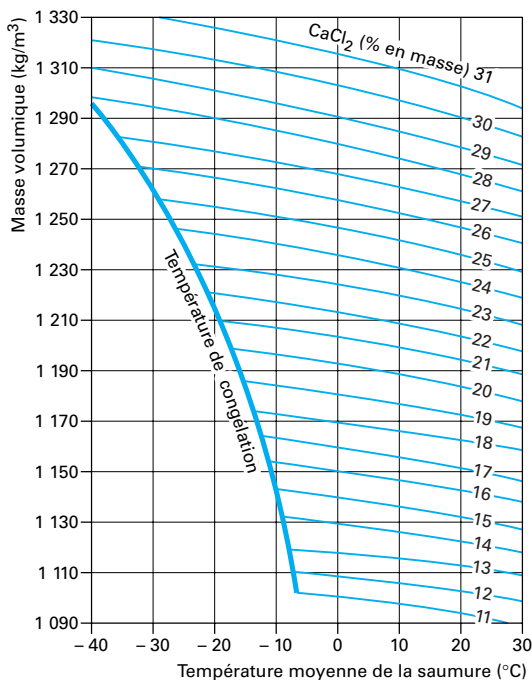
■ Les principales propriétés de ces fluides (à l’état pur) sont données dans le tableau 3. Comme on peut le constater, éthanol et méthanol sont inflammables et explosifs ; l’ammoniac est explosif. L’emploi de ces fluides devra prendre en compte les contraintes de sécurité que les risques de toxicité, d’inflammabilité ou d’explosivité imposent.

**Tableau 3 – Propriétés des solutés dans les mélanges aqueux**

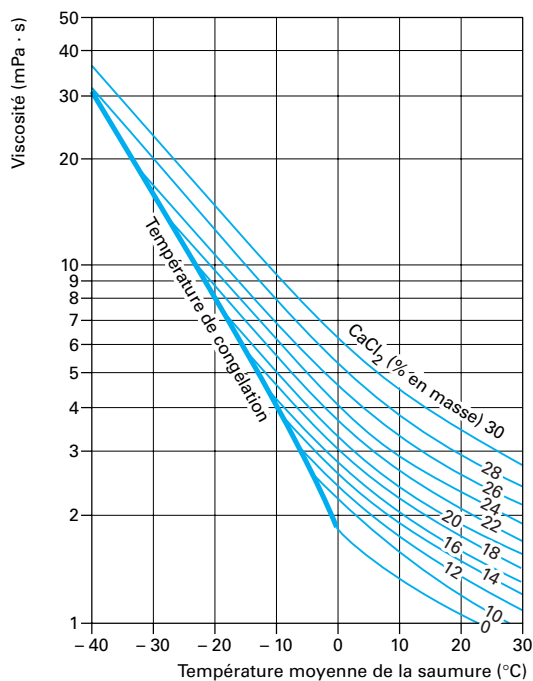
Fluide	Formule chimique	Masse volumique à 20 °C (kg/m <sup>3</sup> )	Température normale d’ébullition (°C)	Température de congélation (°C)	Point d’éclair (°C)	Explosivité		Remarque
						LIE (g/m <sup>3</sup> )	LSE (g/m <sup>3</sup> )	
Éthanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	790	78,3	– 114	12	67	290	Distribué avec un dénaturant
Méthanol	CH <sub>3</sub> OH	790	64,6	– 97	11	73	590	Très toxique
Éthylèneglycol	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (OH) <sub>2</sub>	1 113	198	– 12,7				Toxique
Propylèneglycol	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (OH) <sub>2</sub>	1 036	187	– 51				Légèrement toxique
Glycérol	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	1 260	158					Non toxique/ sans effet néfaste sur l’environnement
Ammoniac	NH <sub>3</sub>	610 (à la pression de saturation)	– 33	– 77,7		113	213	Très toxique



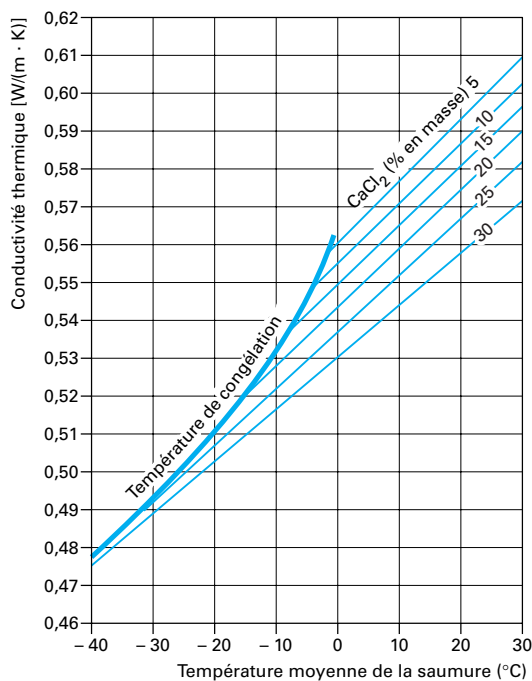
a) capacité thermique massique des saumures à base de chlorure de calcium



b) masse volumique des saumures à base de chlorure de calcium



c) viscosité des saumures à base de chlorure de calcium



d) conductivité thermique des saumures à base de chlorure de calcium

Figure 3 - Propriétés des solutions eau-chlorure de calcium en fonction de la température et de la concentration en sel

On remarque également que, parmi ces fluides :

- certains sont peu volatils comme l'éthylène glycol, le propylène glycol, le glycérol ; ils se prêtent à une manipulation aisée et à une conception de circuit frigoporteur simple ;
- certains sont moyennement volatils comme l'éthanol et le méthanol ; ils supposent des précautions en termes de stockage et de manipulation. Ils nécessitent des circuits fermés ;
- l'ammoniaque est très volatile et nécessite un circuit fermé et étanche au risque d'une perte régulière de vapeurs à l'atmosphère.

En solution dans l'eau, lorsque la concentration en antigel croît, la température de congélation décroît jusqu'à atteindre une tempé-

rature minimale (– 97 °C pour le méthanol, – 114 °C pour l'éthanol, – 45 °C pour l'éthylène glycol et – 55 °C pour le propylène glycol) pour des concentrations massiques comprises entre 50 % et 60 %. Au-delà, la température de congélation croît pour l'éthanol, le méthanol, l'éthylène glycol ; la solution de propylène glycol prend une structure vitreuse.

Pour l'ensemble des solutions, l'adjonction supplémentaire d'alcool dans la solution tend à dégrader la conductivité thermique et la capacité thermique et à accroître la viscosité cinématique comme on peut l'apprécier figure 4 pour l'éthylène glycol.

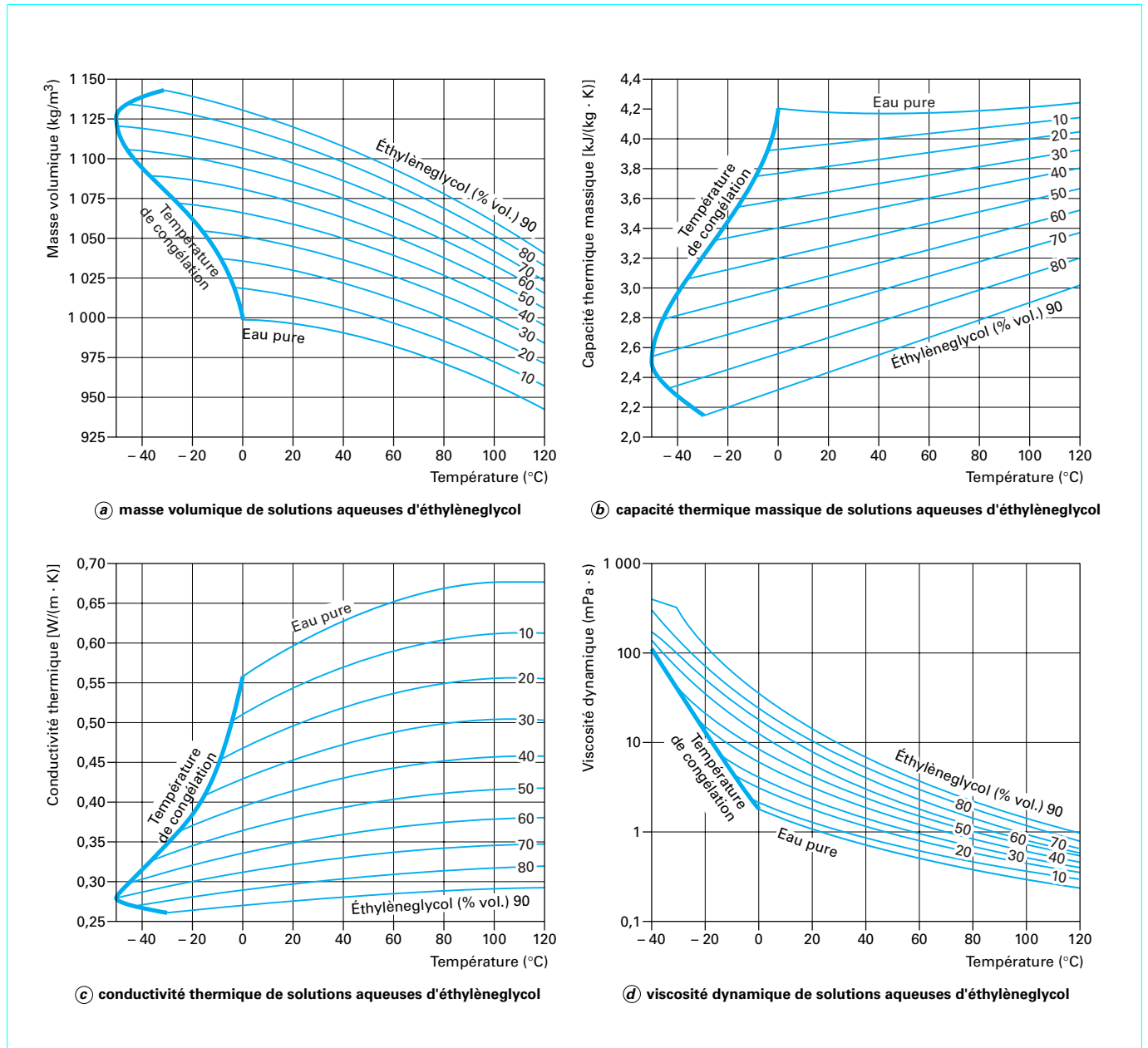


Figure 4 – Propriétés du mélange eau/éthylène glycol en fonction de la température et de la concentration

Tableau 4 – Propriétés des différentes solutions aqueuses à – 30 °C

Saumure	Concentration massique en sel pour une température de congélation de – 40 °C (%)	Masse volumique de la solution (kg/m <sup>3</sup> )	Capacité thermique massique [J/(kg · K)]	Conductivité thermique [W/(m · K)]	Viscosité cinématique (mm <sup>2</sup> /s)
Éthanol	54	910	3 520	0,295	39
Méthanol	42	957	3 500	0,360	15
Éthylèneglycol	54	1 090	2 950	0,35	50
Propylèneglycol	54	1 065	3 300	0,32	300
Glycérol	70	1 360	2 280	0,35	350
Ammoniaque	21	960	4 218	0,39	8

La température minimale d'utilisation de l'éthylèneglycol est de – 23 °C et celle du propylèneglycol de – 18 °C, compte tenu des fortes viscosités rencontrées à basses températures. Les alcools tels que l'éthanol, le méthanol, ainsi que l'ammoniaque permettent d'atteindre des températures très sensiblement inférieures grâce à des viscosités notablement plus faibles. Nous représentons tableau 4 les principales propriétés de ces solutions aqueuses à – 30 °C ayant toutes une température de congélation de – 40 °C grâce à une composition adaptée. On peut noter :

- des masses volumiques sensiblement plus faibles que celles des saumures (centrées autour d'une valeur moyenne de 1 000 kg/m<sup>3</sup>) ;

- des capacités thermiques massiques élevées, supérieures à celles des saumures, avec une particularité pour l'ammoniaque dont la capacité thermique est très élevée ;

- des conductivités thermiques plus faibles que celles des saumures avec une valeur moyenne de 0,32 W/(m · K) ;

- des viscosités très variables suivant le produit retenu : très fortes pour le propylèneglycol et le glycérol qui rendent sans intérêt l'utilisation de ces fluides à ces basses températures, fortes pour l'éthylèneglycol et l'éthanol qui en limitent d'utilisation, acceptables pour le méthanol et l'ammoniaque.

Les solutions à base d'éthylèneglycol et de propylèneglycol sont généralement corrosives : en l'absence d'inhibiteurs, les glycols produisent des acides par oxydation. Cette réaction est fortement dépendante de la température, de la présence d'air et, plus particulièrement, des métaux avec lesquels la solution est en contact. Les inhibiteurs de corrosion forment une pellicule sur les pièces métalliques du circuit. Par ailleurs, des adjuvants permettent de maintenir une solution légèrement basique. Pour limiter ces phénomènes d'oxydation, il est recommandé de ne pas chauffer la solution au-delà de 80 °C et, si possible, d'éviter la présence d'air grâce à une légère pressurisation à l'azote.

Les solutions à base d'éthanol et de méthanol restent peu utilisées, compte tenu des contraintes de sécurité qu'elles imposent.

L'eau ammoniacale, utilisée dans le passé, présente des caractéristiques énergétiques intéressantes mais reste fortement handicapée par sa très forte corrosivité, sa toxicité et les risques inhérents à l'émanation de vapeur d'ammoniac.

Pour les installations au glycol, il est conseillé d'effectuer au moins une fois par an une analyse complète de la solution en vue de contrôler la concentration en glycol et sa teneur en inhibiteurs de corrosion.

## 4. Fluides organiques

■ De nombreux fluides organiques peuvent avantageusement être utilisés à basse température comme nous l'avons déjà noté. On retrouve, comme catégorie de fluides organiques susceptibles d'être utilisés comme fluides frigopORTEURS (cf. noms commerciaux et fournisseurs dans le tableau B en [Doc. BE 9 573]) :

- les huiles minérales ou hydrocarbures d'origine pétrolière comme le *Gilotherm D12* (Rhône-Poulenc) ;

- les huiles synthétiques aromatiques comme le *Dowtherm J* (Dow Chemical) ou silicones comme le *Syltherm XLT* (Dow Chemical) ou le *Basydon KT3* (Bayer) ;

- les fluides halogénés de type HFE (hydrofluoroéther) comme le *HFE 7100*.

Ces huiles synthétiques et ces fluides organiques présentent, à basse température, des qualités de stabilité thermique, d'inertie chimique, de non-toxicité et de non-corrosivité indéniables. Leurs caractéristiques ont été développées dans l'article [BE 9 571].

Plus spécifique aux utilisations à basse température, le *d*-limonène (terpène extrait d'agrumes) a été développé spécifiquement pour le domaine de la réfrigération comme substitut au trichloroéthylène. Ce produit est biodégradable, non toxique et compatible avec les applications alimentaires. Le processus de production de ce produit génère la présence d'une faible quantité d'acide citrique anhydre en solution dans le *d*-limonène : des traces d'eau en présence du *d*-limonène favorisent la production d'acide citrique C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>·H<sub>2</sub>O qui peut induire des corrosions sévères des aciers, du cuivre, de l'aluminium. Le maintien du pH à une valeur proche de 7 est indispensable pour éviter ces effets ; l'injection de carbonate de sodium (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) permet de neutraliser l'acide citrique. Par ailleurs, le *d*-limonène est oxydé en présence d'air ; un antioxydant généralement utilisé est le butylhydroxyanisole C<sub>11</sub>H<sub>16</sub>O<sub>2</sub> additionné, éventuellement, de méthanol, pour réduire sa viscosité et faciliter la dissolution du mélange antioxydant avec le fluide frigopORTEUR.

■ Les fluides organiques présentent des propriétés thermodynamiques et thermocinétiques très différentes des fluides à base de mélange aqueux comme présentés précédemment. Pour un nombre limité de fluides (fluides retenus pour leur bonne performance à basse température et, en particulier, une faible viscosité cinématique), les principales propriétés sont présentées tableau 5. On peut noter :

- des masses volumiques sensiblement plus faibles que celles des solutions aqueuses à l'exception du *HFE 7100* ;

- des capacités thermiques massiques très inférieures à celles des solutions aqueuses ;

- des conductivités thermiques beaucoup plus faibles que celles des solutions aqueuses ;

- des viscosités très variables suivant le produit retenu mais présentant toutes des valeurs faibles et souvent inférieures à celles des solutions aqueuses.

**Tableau 5 – Propriétés de différents fluides organiques à – 30 °C**

Fluide	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Capacité thermique massique [J/(kg · K)]	Conductivité thermique [W/(m · K)]	Viscosité cinématique (mm <sup>2</sup> /s)
Dowtherm J	895,5	1 687	0,134	2,38
Syltherm XLT	873	1 522	0,110	4,5
Basydon KT3	932	1 620	0,135	9
Therminol (Gilotherm) D12	797,4	1 907	0,138	5,95
HFE 7100	1 600	1 070	0,08	0,85
d-Limonène	880	1 500	0,13	3

**Tableau 6 – Propriétés des phases liquide (L) et vapeur (V) du dioxyde de carbone saturé à – 30 °C**

Chaleur latente de condensation (J/kg)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )		Capacité thermique massique [J/(kg · K)]		Conductivité thermique [W/(m · K)]		Viscosité cinématique (mm <sup>2</sup> /s)	
	L	V	L	V	L	V	L	V
303 020	1 075	37,17	2 054	1 147	0,147	0,0138	0,157	0,33

## 5. Fluides frigoporteurs diphasiques

### 5.1 Fluide frigoporteur diphasique liquide-vapeur : dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone est utilisé, dans un nombre limité de dispositifs, comme fluide frigoporteur avec changement de phase liquide-vapeur. Le produit ou le fluide à refroidir cède de l'énergie thermique et permet ainsi la vaporisation du CO<sub>2</sub> liquide. La phase vapeur est envoyée sur l'échangeur de refroidissement (généralement l'évaporateur du groupe froid) puis condensée : le condensat formé est mis en circulation grâce une pompe et envoyé de nouveau vers l'échangeur en contact avec le produit ou le fluide à refroidir.

L'intérêt d'un tel dispositif réside dans le très fort pouvoir calorifique du fluide : du fait de l'utilisation de la chaleur latente de condensation : ainsi, la puissance thermique transportée par unité de volume (de la phase liquide) de CO<sub>2</sub> est 16 fois plus élevée que celle transportée, avec un écart de température de 5 °C, par le frigoporteur monophasique le plus performant, c'est-à-dire l'eau/ammoniac. Cela se traduit par des gains substantiels en termes de tuyauteries et de dimensions de la pompe. Par ailleurs, la médiocre conductivité thermique de la phase liquide du CO<sub>2</sub> (cf. tableau 6) est compensée par l'accroissement du transfert de chaleur que permet l'écoulement diphasique liquide-vapeur dans les échangeurs du circuit frigoporteur.

Le coefficient de performance énergétique ne peut pas être évalué par l'expression donnée dans l'article [BE 9 570], compte tenu de la nature diphasique du fluide. Son évaluation doit faire appel aux lois de transferts thermiques et de perte de pression diphasique [15] [16] [25]. Le tableau 7 donne les valeurs du coefficient de performance énergétique du CO<sub>2</sub> diphasique par rapport à celui de la solution eau/ammoniac (dont la vitesse de circulation est prise égale à 1 m/s dans les tubes de l'échangeur) retenue comme fluide de référence. Ce tableau montre que, pour les différentes vitesses de circulation du CO<sub>2</sub>, il existe un avantage certain de ce fluide qui permet une réduction très forte de la puissance de pompage.

**Tableau 7 – Coefficient de performance énergétique du CO<sub>2</sub> diphasique à – 30 °C**

Vitesse de circulation de la phase liquide à l'entrée des tubes de l'échangeur fluide/produit (1) (m/s)	Coefficient relatif de performance énergétique du CO <sub>2</sub> diphasique (2)
0,2	18
0,3	9
0,4	5,4
0,5	3,7
0,6	2,7
0,7	2
0,8	1,6

(1) Température du CO<sub>2</sub> : – 30 °C  
 (2) Fluide de référence eau/ammoniac avec 21 % d'ammoniac à – 30 °C, circulant avec une vitesse de 1 m/s dans l'échangeur

Les difficultés qu'implique l'utilisation du CO<sub>2</sub> diphasique résident dans les fortes valeurs de pression à l'intérieur du circuit frigoporteur :

- à – 30 °C, la pression de saturation du fluide est de 14,28 bar ;
- à 0 °C, elle est de 34,8 bar ;
- à 30 °C, elle est de 72 bar.

Les dispositifs ne sont généralement pas dimensionnés pour tenir des pressions proches de 70 bar susceptibles d'être rencontrées lors de l'arrêt de l'installation : les circuits utilisant le CO<sub>2</sub> fonctionnent généralement en continu à basse température et sont équipés de soupapes de sécurité en cas d'arrêt accidentel.



## 5.2 Fluides frigoporteurs diphasiques liquide-solide : sorbets de glace

### 5.2.1 Propriétés des sorbets de glace (*ice slurry*)

Les sorbets de glace (communément appelés *ice slurry*) sont des mélanges de petites particules de glace (typiquement de diamètres compris entre 0,01 et 0,2 mm), d'eau et d'un agent permettant l'abaissement du point de congélation (**alcool, sels**). Grâce à l'enthalpie de fusion des particules de glace, les sorbets de glace présentent un pouvoir caloporteur très important.

Les propriétés thermodynamiques de ces fluides sont comparables à celles représentées pour le mélange eau/éthanol (concentration de 10 % en masse d'éthanol) figure 5 : la masse volumique, l'enthalpie spécifique du fluide et la concentration en particules de glace sont fonction de la température du fluide :

- le point de congélation du mélange eau/éthanol est proche de  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  ; au-dessous de ce seuil, le fluide s'enrichit progressivement en cristaux de glace d'eau pure jusqu'à atteindre une concentration massique de glace proche de 40 % à  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  (figure 5 a). Lors de ce processus de formation d'une phase solide, la phase liquide s'enrichit en éthanol ;

- l'évolution de la masse volumique (figure 5 b) traduit cette transformation d'un mélange liquide à une température supérieure à  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  à un mélange liquide-solide à partir de  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  ; la décroissance de la masse volumique au-dessous de ce seuil traduit l'expansion de l'eau sous forme de glace et l'augmentation de la fraction de glace dans le mélange ;

- la variation de l'enthalpie massique (figure 5 c) illustre l'intérêt du fluide ; la décroissance observée de cette grandeur entre 5 et  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  traduit un refroidissement par chaleur sensible (la capacité thermique massique du mélange est proche de  $4\,400\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  puis, à partir de  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la décroissance beaucoup plus marquée traduit l'effet du terme de chaleur latente : entre  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la capacité thermique massique « virtuelle » atteint  $32\,500\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ , soit un pouvoir caloporteur multiplié par 7 par rapport à la solution eau/éthanol monophasique.

### 5.2.2 Différentes méthodes de production de sorbets de glace

Divers procédés de production des sorbets ont été mis au point et certains sont commercialisés [7] [8]. On distinguera en effet 4 modes distincts de production.

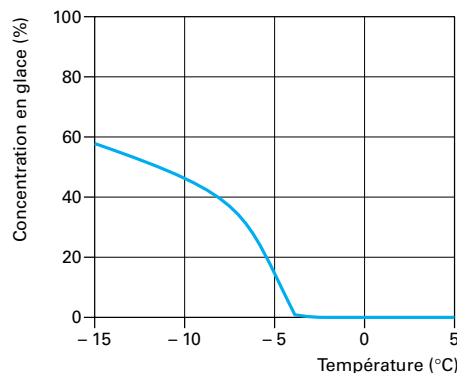
#### ■ Sous-refroidissement d'un mélange binaire eau/alcool dans un échangeur thermique

Lors de la congélation d'un mélange binaire, l'interface liquide-solide présente une structure complexe et fort différente de celle de l'eau pure. À proximité de la paroi refroidie peuvent coexister la phase liquide et la phase solide sous forme d'un milieu continu (*mushy zone*). On observe que, pour un mélange binaire connu, on peut, dans certaines conditions de vitesse de circulation du fluide et de température de la paroi refroidie, obtenir une production continue de particules de glace. La figure 6 b représente, pour un mélange eau-éthylèneglycol (20 % en masse de glycol ; température de congélation  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ces conditions :

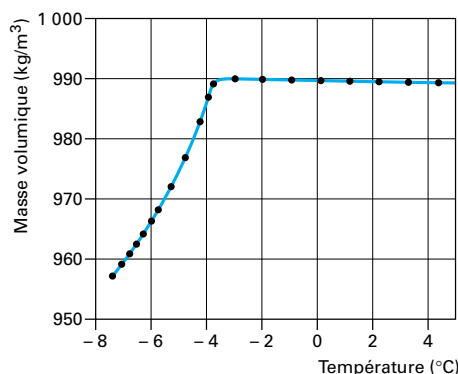
- en région A, caractérisée par des températures de paroi très basses, la congélation du mélange se traduit par la formation d'une pellicule solide sur les parois ;

- en région B, les particules solides formées adhèrent à la paroi pour former à nouveau une pellicule stable ;

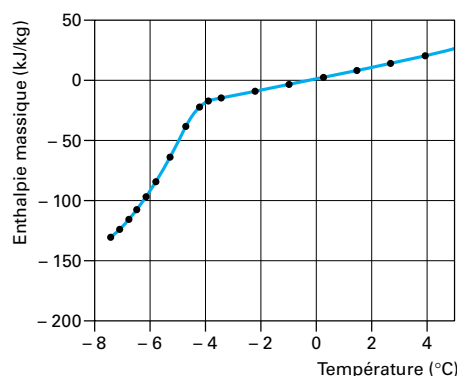
- en région C, caractérisée par des températures de paroi plus élevées et des vitesses suffisantes d'écoulement, les particules solides sont formées en continu. Ce sont ces conditions qu'il faut privilégier dans la conception du dispositif (figure 6 b).



(a) concentration massique de la glace lors du refroidissement d'une solution eau/éthanol à 10 % en masse d'éthanol



(b) masse volumique d'une solution eau/éthanol à 10 % en masse d'éthanol en fonction de la température



(c) enthalpie massique d'une solution eau/éthanol à 10 % en masse d'éthanol en fonction de la température

Figure 5 – Propriétés thermodynamiques du mélange eau/éthanol à l'état liquide et en sorbet en fonction de la température

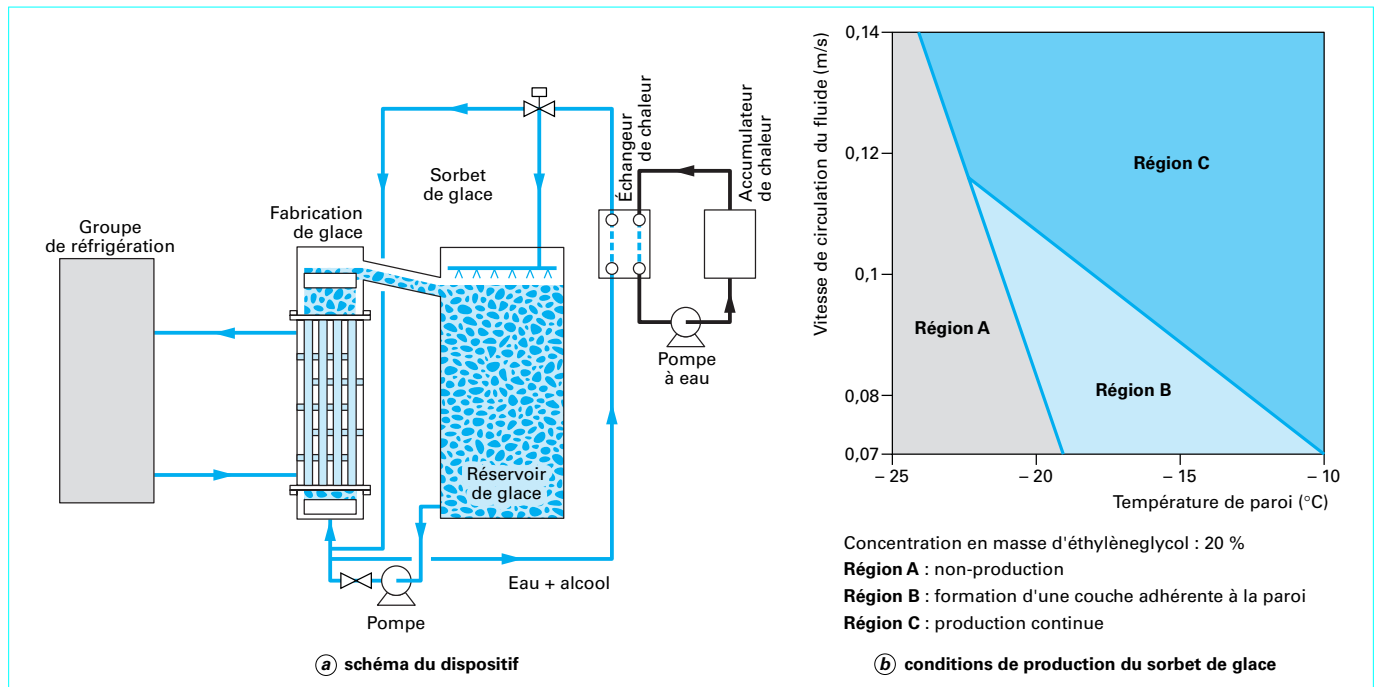


Figure 6 – Système de production de sorbet de glace avec échangeur. Conditions pour la production continue de sorbet de glace par sous-refroidissement d'un mélange binaire eau/éthylène glycol

■ Production de particules de glace dans un échangeur à surface d'échange raclée

Comme le représente la figure 7, un cylindre à double paroi recueille le mélange binaire sur sa paroi interne. L'évaporation du fluide frigorigène dans la double paroi refroidit le mélange et permet un début de congélation sous forme d'une fine pellicule. Un dispositif rotatif à l'intérieur du cylindre racle la pellicule en continu et la production de particules de glace est entraînée par la circulation du fluide frigopporteur.

■ Production de particules de glace par échange direct entre un mélange binaire frigopporteur et un fluide organique à basse température injecté sous forme de fines vésicules

Ce processus nécessite un fluide organique non soluble dans l'eau et des dispositifs efficaces de séparation.

■ Évaporation partielle d'un mélange binaire eau/sel

L'eau contenue dans le mélange binaire est partiellement vaporisée à une température proche de 0 °C grâce à un compresseur ou une pompe à vide.

5.2.3 Domaines d'applications des sorbets de glace

Les applications des sorbets de glace visent les domaines du conditionnement d'air avec des températures [7] [8] de sorbet proches de 0 °C et de la réfrigération commerciale [17] pour des températures légèrement négatives. L'intérêt de cette technologie réside dans des performances énergétiques élevées :

– le pouvoir caloporteur des sorbets est de 6 à 9 fois supérieur à celui des frigopporteurs monophasiques traditionnels tels que les mélanges eau/alcool. Cela autorise une réduction des diamètres de tuyauterie de plus de deux fois par rapport à ces fluides monophasiques ;

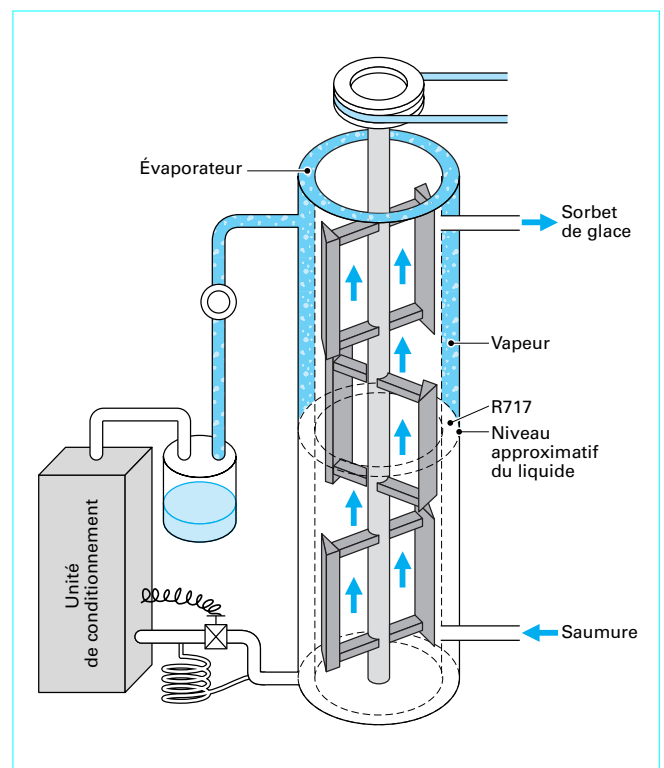


Figure 7 – Échangeur à surface raclée pour la production de sorbet de glace

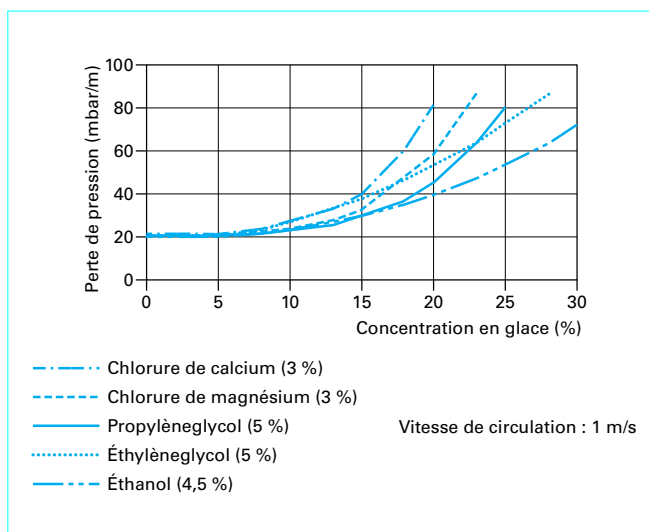


Figure 8 – Pertes de pression de différents sorbets de glace en fonction de la concentration massique en particules

– les coefficients de transfert de chaleur sont fortement accrus par la présence des particules solides en suspension dans le sorbet. Les gains obtenus sont fortement dépendants de la concentration en particules de glace : ils évoluent dans un rapport de 2 à 6 ;

– les pertes de pression sont également accrues par la présence des particules solides comme le montre la figure 8 en fonction de la concentration en glace et du composé à bas point de congélation du mélange. Toutefois, cette augmentation reste suffisamment faible pour escompter des gains du coefficient de performance énergétique proches de 10.

Par ailleurs, de nombreuses applications faisant appel aux sorbets de glace demandent des dispositifs de stockage de froid pour lesquels le sorbet est une réponse intéressante.

Les dispositifs techniques traditionnels (pompes, vannes, échangeurs) sont par ailleurs adaptés aux sorbets de glace dans la mesure où la concentration en glace n'excède pas 40 %.

## 6. Performances énergétiques des fluides frigopORTEURS : comparaison et choix

Les pouvoirs caloporteur et calovecteur ainsi que le coefficient de performance énergétique des fluides frigopORTEURS constituent un critère essentiel du choix de ces fluides car ils **déterminent**, comme nous l'avons vu précédemment, **les coûts d'investissement et de fonctionnement du dispositif**.

En préalable à l'évaluation de ces paramètres, la température minimale rencontrée dans le circuit frigopORTEUR doit être définie : elle détermine la concentration, pour les solutions aqueuses, en sel ou alcool nécessaire pour éviter toute formation de gel en paroi de l'évaporateur du groupe de réfrigération. La concentration de ces solutions connue, l'évaluation des principales propriétés (masse volumique, viscosité cinématique, conductivité thermique, capacité thermique massique) est réalisée à une température moyenne de fonctionnement.

■ La procédure de comparaison comprend en premier lieu une **évaluation des trois critères énergétiques** que nous avons définis dans l'article [BE 9 570]. Cette évaluation est représentée, pour une condition de température de  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , figure 9, avec l'hypothèse d'un écoulement laminaire et d'une température minimale de  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  :

– le **pouvoir caloporteur** des solutions aqueuses présente des valeurs proches alors que celui des fluides organiques leur est en moyenne 2,5 fois inférieur ;

– le **pouvoir calovecteur** des solutions aqueuses, et des saumures en particulier, est élevé grâce à une bonne conductivité thermique. Les fluides organiques présentent des valeurs trois fois moindres du pouvoir calovecteur par rapport aux solutions aqueuses ;

– du fait de la grande dispersion des valeurs de leur viscosité cinématique (de  $350\text{ mm}^2/\text{s}$  pour le glycérol à moins de  $1\text{ mm}^2/\text{s}$  pour le HFE 7100), les fluides frigopORTEURS présentent des valeurs du **coefficient de performance énergétique** très dispersées. On ne peut, contrairement aux deux autres critères, hiérarchiser les différentes catégories de fluides (saumures, solutions eau/alcool, fluides organiques).

**Remarque importante :** les évaluations réalisées figure 9 et les conclusions que nous pouvons en déduire n'ont de signification que pour les conditions strictement définies au préalable : température minimale et température de fonctionnement. La modification d'une de ces conditions induit des concentrations aqueuses et des propriétés différentes de celles qui ont été présentées. Les conclusions sur le choix des fluides frigopORTEURS adaptés sont susceptibles d'être radicalement modifiées.

■ Dans un deuxième temps, l'**impact des propriétés thermophysiques sur les coûts d'investissement et de fonctionnement** du dispositif frigopORTEUR peut être évalué de façon qualitative. C'est ce qui est représenté dans le tableau 8 (page 13) pour chacun des fluides frigopORTEURS et pour les principaux postes de dépenses qui sont :

- les équipements pour lesquels on distingue trois postes :
  - les éléments de tuyauteries et la pompe de circulation dont le dimensionnement est conditionné par le pouvoir caloporteur du fluide,
  - les échangeurs thermiques (fluide/produit ou évaporateur) dont le dimensionnement est conditionné par le pouvoir calovecteur,
  - le groupe de réfrigération dont le dimensionnement est conditionné par le coefficient de performance énergétique.

On comprend, par exemple, que le « passage » du formate de potassium à un fluide organique se traduit par un débit volumique multiplié par 2,6 et par un diamètre de canalisation multiplié 1,6 (en supposant une vitesse de circulation constante). Cela se traduit également par une surface d'échange multipliée par 3 (en supposant la résistance thermique associée au fluide frigopORTEUR très grande par rapport aux autres résistances). Tout cela est mentionné dans le tableau 8 (page 13) par une notation favorable pour le formate (++) et défavorable pour les fluides organiques (– ou --) ;

– la consommation énergétique conditionnée par le coefficient de performance énergétique.

L'examen d'un tel tableau fait ressortir les fluides inadaptés pour les conditions requises (glycérol, par exemple) ou les fluides attractifs (formate de potassium, eau/éthanol, ammoniacque, certains fluides organiques).

■ Dans un dernier temps, il est nécessaire de prendre en compte la **structure des dépenses d'investissement** (notamment, le coût du groupe de réfrigération par rapport aux éléments de tuyauteries et des échangeurs) pour le choix. Ainsi :

– un système avec un circuit frigopORTEUR complexe et de grande longueur associé à des groupes de réfrigération de taille modeste (froid commercial) appelle un fluide minimisant le coût des éléments de tuyauteries ; c'est le cas des solutions aqueuses (formate de potassium, éthanol...)

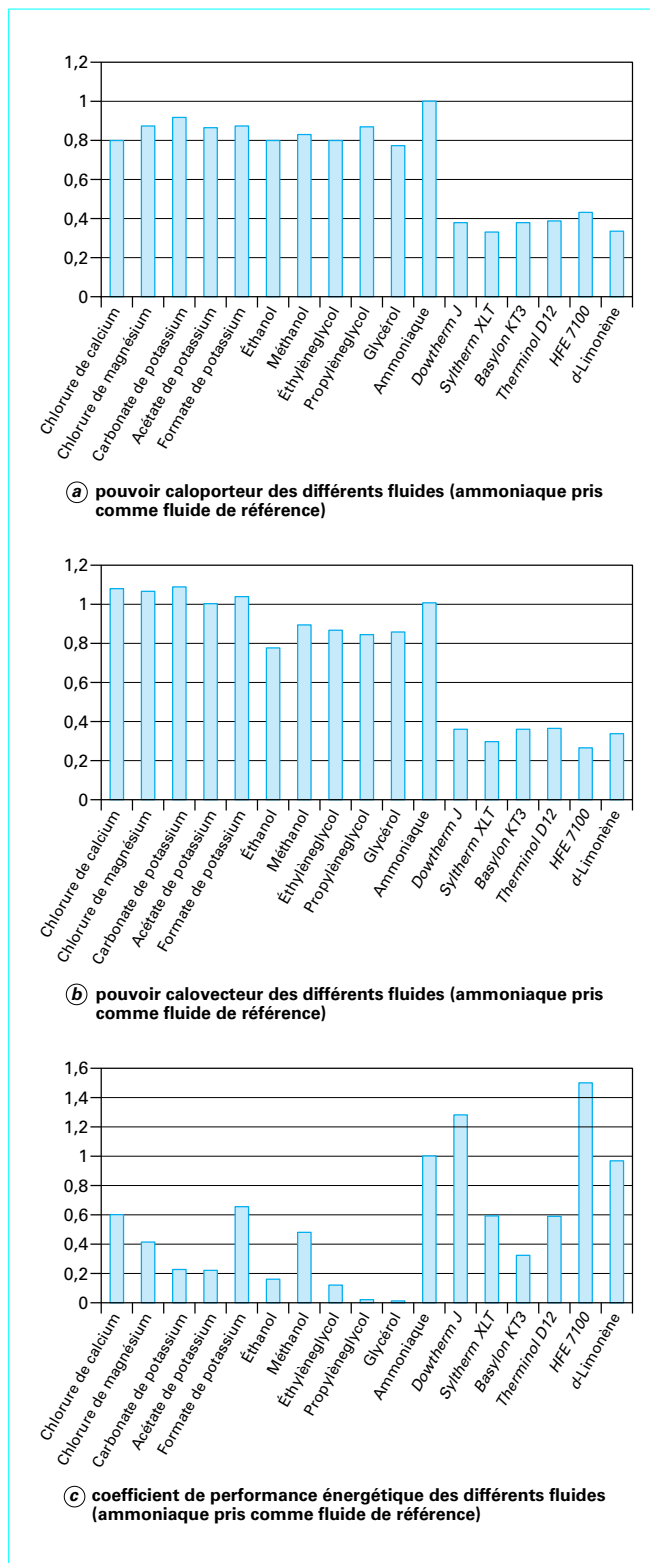


Figure 9 – Comparaison des performances énergétiques des différents fluides frigoporeteurs à -30 °C

– un système utilisant un groupe de réfrigération de forte puissance dont il est nécessaire de minimiser le coût d'investissement (en réduisant sa capacité frigorifique) et de limiter la consommation énergétique, et associé de plus avec un circuit frigoporeteur simple, appelle, préférentiellement, un fluide organique : c'est le cas de groupes de réfrigération pour le contrôle de température de réacteurs chimiques, par exemple.

## 7. Critères de choix d'un fluide frigoporeteur

Le choix d'un fluide frigoporeteur pour une application donnée doit, à côté des critères économiques, prendre en compte de nombreux autres critères dont l'importance est variable suivant les marchés visés :

- les critères de toxicité sont essentiels pour les applications alimentaires ;
- les critères de corrosivité sont étudiés différemment suivant que l'installation est nouvelle et que le choix des matériaux est laissé à la discrétion du concepteur ou que l'installation est ancienne et que les matériaux sont imposés ;
- le poids des réglementations est bien entendu très différent suivant que l'on équipe un site industriel ou un établissement recevant du public.

Nous synthétisons tableau 9 (page 14) les principales propriétés des fluides frigoporeteurs (monophasiques) analysés dans cet article.

On renvoie bien entendu le lecteur aux fiches techniques des différents fluides pour une évaluation précise des propriétés du fluide concerné et, notamment, pour leur comportement vis-à-vis des matériaux (métaux, polymères, plastique). Par ailleurs, en ce qui concerne les réglementations, nous insistons sur le fait que celles-ci peuvent évoluer et qu'il existe, par ailleurs, une forte hétérogénéité des textes et des modalités d'applications suivant les pays et les zones géographiques.

Chacune des catégories de fluides frigoporeteurs présentées dans ce tableau trouve des applications dans les divers secteurs industriels utilisant les basses températures.

■ Les mélanges **eau-alcool** et **eau-glycol** trouvent de très larges applications dans le domaine du **conditionnement d'air et de la réfrigération industrielle** lorsque les températures minimales restent supérieures à -20 °C. Le faible coût de ces solutions, leur fort pouvoir caloporteur et calovecteur en font des frigoporeteurs appréciés.

■ Les **saumures à base de sels inorganiques** trouvent leurs applications dans une large gamme de température : toutefois, leur corrosivité limite leur intérêt et le nombre d'applications industrielles dans lesquelles elles sont utilisées.

■ Les **applications industrielles** à basse température (< -20 °C) et l'utilisation du **froid indirect** amènent à une diffusion rapide des **saumures à sels organiques**, non toxiques, sans effet néfaste sur l'environnement et présentant de bonnes performances énergétiques. Les risques de corrosion sont limités par l'injection d'inhibiteurs de corrosion et un maintien à un pH neutre. La conception des circuits doit viser à l'utilisation de métaux de potentiel électrochimique proche. Les applications dans le froid commercial (**meubles frigorifiques de vente**), les **entrepôts frigorifiques**, les procédés **agroalimentaires** utilisent de plus en plus ces fluides.

**Tableau 8 – Impacts des propriétés de différents fluides frigopORTEURS sur les dépenses d'investissement et de fonctionnement (1)**

Fluide	Dépenses d'investissement (2)			Dépense énergétique (2)
	Éléments de tuyauteries	Échangeurs	Groupe de réfrigération	
Chlorure de calcium	++	++	+	+
Chlorure de magnésium	++	++	+	+
Carbonate de potassium	++	++	-	-
Acétate de potassium	++	++	-	-
Formate de potassium	++	++	+	+
Éthanol	++	+	-	-
Méthanol	++	+	+	+
Éthylèneglycol	++	+	-	-
Propylèneglycol	++	+	--	--
Glycérol	++	+	--	--
Ammoniaque	+++	++	++	++
<i>Dowtherm J</i>	-	--	++	++
<i>Syltherm XLT</i>	-	--	+	+
<i>Basyton KT3</i>	-	--	+	+
<i>Therminol D12</i>	-	--	+	+
<i>HFE 7100</i>	-	--	++	++
<i>d-Limonène</i>	-	--	++	++

(1) Température de fonctionnement : - 30 °C.  
Température minimale : - 40 °C.

(2) ++ très favorable ; + favorable ; - défavorable ; -- très défavorable.

■ Les **fluides organiques** (huiles synthétique, HFE...) par leur coût, leurs pouvoirs caloporteurs et calovecteurs médiocres ne sont guère utilisés dans les industries citées précédemment : froid commercial, industries agroalimentaires, entreposage frigorifique. Ils sont par contre utilisés dans les **industries chimiques et pharmaceutiques** qui réclament des procédés où l'eau et l'humidité sont proscrites. Par ailleurs, ces fluides, par leur très grande inertie chimique, peuvent également être utilisés lorsque des cyclages thermiques de grande amplitude en température sont nécessaires : c'est le cas pour le **contrôle thermique de réacteurs chimiques ou de moules de plasturgie**.

■ Les **fluides diphasiques** sont au début de leur phase de commercialisation et leur domaine privilégié d'applications reste incertain : les sorbets de glace constituent une solution alternative aux saumures ou aux solutions eau/alcool. Leurs performances énergétiques excellentes devront être associées à des équipements fiables et bon marché pour supplanter les solutions traditionnelles. L'association de systèmes intégrés de **stockage de froid** [7] [8] autorise un développement prometteur de la solution « sorbet de glace » lorsque les coûts de l'énergie électrique sont favorables aux groupes de réfrigération avec stockage frigorifique en période de nuit. Le dioxyde de carbone présente un domaine d'application plus spécifique : son usage est intéressant à basse température malgré le coût induit par la pression élevée de fonctionnement.

**Tableau 9 – Principaux critères de choix des fluides organiques**

Critères de sélection	Eau glacée ou eau fraîche	Saumures	Solutions eau/alcool eau/NH <sub>3</sub>	Huile minérale, aromatique ou silicone	Autres fluides organiques (HFE, terpène)	Fluide diphasique CO <sub>2</sub>	Fluide diphasique « sorbet de glace »
<b>Point de congélation</b> (ou seuil de pompabilité)	0 °C	- 21 °C à - 55 °C pour les sels inorganiques < - 60 °C pour les sels organiques	- 114 °C à - 55 °C pour les températures minimales des solutions	< - 80 °C	- 96 °C pour le <i>d</i> -limonène - 135 °C pour le HFE 7100	- 56,6 °C	
<b>Point d'éclair</b>	Ininflammable	Ininflammable	Solution ininflammable mais vapeurs d'alcool inflammables (suivant l'alcool)	100 à 300 °C	Ininflammable	Ininflammable	Solution ininflammable mais vapeurs d'alcool inflammables
<b>Pouvoir caloporteur</b>	Très bon	Très bon	Bon à très bon (PEG ou NH <sub>3</sub> )	Médiocre	Médiocre	Excellent	Excellent
<b>Pouvoir calovecteur</b>	Très bon	Très bon	Bon à très bon	Médiocre	Médiocre	Très bon	Très bon
<b>Coefficient de performance énergétique</b> (à - 30 °C)	Très bon	Moyen (CaCl <sub>2</sub> et KF) à médiocre (KCO <sub>3</sub> et K Ac)	Moyen (méthanol) à médiocre pour les autres alcools Très bon pour l'ammoniaque	Excellent à bon	Excellent à bon	Excellent	Excellent
<b>Toxicité</b>	Nulle	Nulle ou faible	Forte (méthanol) à faible	Faible	Faible	Aucune	Faible à fort suivant le choix du soluté
<b>Inflammabilité</b>	Aucune	Aucune	Vapeurs inflammables	Faible	Nulle	Nulle	Vapeurs inflammables
<b>Effets environnementaux</b>	Aucun	Fort risque de pollution suite à des rejets accidentels dans les égouts (en particulier à cause de inhibiteurs de corrosion) Les sels organiques présentent des effets très limités en cas de rejet à l'égout	Fort risque en cas de rejet accidentel	Fort risque en cas de rejet accidentel	Risque limité en cas de rejet accidentel ( <i>d</i> -limonène biodégradable, HFE volatil sans ODP ni GWP)	Aucun	Fort risque en cas de rejet accidentel
<b>Réglementations applicables potentielles</b>	Aucune	Protection contre les risques de fuites à l'égout	Protection individuelle des personnes et temps maximal d'exposition Risque d'incendie Protection contre les risques de fuites à l'égout	Protection individuelle des personnes et temps maximal d'exposition Risque d'incendie Protection contre les risques de fuites à l'égout	Protection individuelle des personnes et temps maximal d'exposition Protection contre les risques de fuites à l'égout	Appareils sous pression	Protection individuelle des personnes et temps maximal d'exposition Risque d'incendie Protection contre les risques de fuites à l'égout
<b>Coût du fluide</b>	Gratuit	Bon marché	Bon marché	Coûteux	Coûteux	Moyen (mais installation coûteuse)	Bon marché (mais installation coûteuse)
<b>Compatibilité avec les matériaux</b>	Corrosif (réaliser un choix judicieux des métaux des équipements/ assurer un traitement de l'eau)	Très corrosives (nécessité d'inhibiteurs de corrosion ou de solutions tampons pour maintenir le pH = 7 ) Éviter les circuits avec différents métaux de potentiels électrochimiques très différents (cuivre et aluminium, par exemple)	Corrosives (nécessité d'inhibiteurs de corrosion et de solutions tampons) Très corrosives pour les eaux ammoniacales Prévoir un contrôle annuel des teneurs en inhibiteurs dans le cas des solutions eau/alcool	Faible corrosivité avec les métaux courants Attention aux choix des polymères et des caoutchoucs pour l'étanchéité des circuits (joints graphite à privilégier)	Faible corrosivité pour le HFE Forte corrosivité pour le <i>d</i> -limonène (prévoir solution tampon pour maintien du pH et antioxydant) Attention aux choix des polymères pour l'étanchéité des circuits	Faible corrosivité	Corrosif (nécessité d'inhibiteurs de corrosion et de solutions tampons). Prévoir un contrôle annuel des teneurs en inhibiteurs
<b>Inertie chimique</b>	Excellente	Risque de formation de précipités en cas de mélange	Bonne Risque d'émanation de vapeurs et baisse de la concentration de la solution	Très bonne à ces niveaux de températures	Très bonne pour le HFE Éviter la présence d'eau (formation d'acide citrique) et d'air (risque d'oxydation) dans les circuits pour le <i>d</i> -limonène	Excellente	Très bonne
<b>Solubilité de l'eau</b>		Très forte	Très forte	Très faible	Très faible		Très bonne