



Westfalen

Bulletin d'information technique pour les professionnels 1

Mélanges de fluides frigorigènes zéotropes.

Une utilisation appropriée pour votre installation.

Mélanges de fluides frigorigènes – une alternative écologique.

Mélanges de fluides frigorigènes zéotropes et azéotropes

Choisir le fluide frigorigène adéquat n'est pas une mince affaire. Chaque fluide frigorigène a ses avantages et ses inconvénients, qui doivent être pesés par des experts en la matière. De même, à l'avenir il sera nécessaire de vérifier préalablement l'adéquation du fluide frigorigène avec l'application.

Pour s'assurer qu'un fluide frigorigène présente les caractéristiques appropriées pour une application donnée, bien souvent, il ne suffit pas d'utiliser des molécules pures. Par le passé, on a tenté de fabriquer un fluide frigorigène synthétique pour des applications de congélation.

La combinaison des fluides frigorigènes R-22 et R-115 a permis d'obtenir le mélange R-502. Le fluide R-22 était certes très performant, mais générait des températures de compression trop élevées. Ce problème a pu être atténué en le mélangeant au fluide R-115.

Dans la perspective de nouvelles dispositions légales, il devient nécessaire de remplacer les fluides frigorigènes par de nouveaux produits moins polluants, y compris au sein d'installations existantes.

Afin de garantir la pérennité des composants mis en œuvre, en particulier du compresseur, on utilise de plus en plus souvent des mélanges de fluides frigorigènes.

Azéotrope

Se dit d'un mélange de substances qui présente, à une température donnée (dit point azéotrope), une phase vapeur ayant la même composition que la phase liquide.

Dans la nomenclature, ces mélanges sont identifiés par un

5 au niveau du chiffre des centaines. Exemples : R-502, R-507, R-508A, R-508B, R-513A

Zéotrope

Se dit d'un mélange de substances qui ne présente sous aucune condition une phase vapeur ayant la même composition que sa phase liquide.

Dans la nomenclature, ces mélanges sont identifiés par un

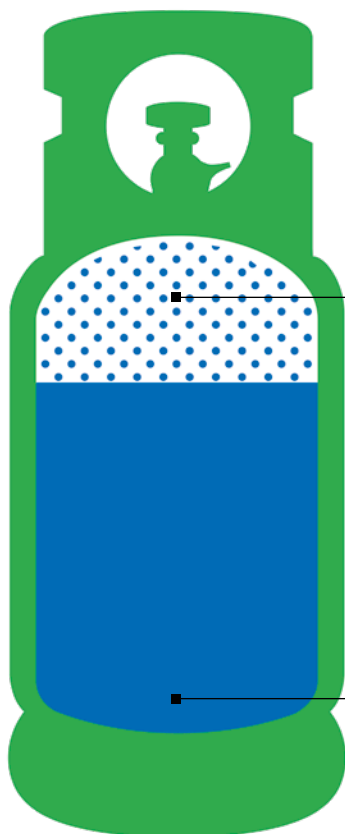
4 au niveau du chiffre des centaines. Exemples : R-407A/C/F, R-410A, R-448A, R-449A

Dans la mesure où l'utilisation de mélanges est inévitable, les fabricants et les exploitants de groupes frigorifiques recommandent les mélanges de fluides frigorigènes azéotropes, qui offrent l'avantage d'une manipulation pratique et se comportent comme des fluides purs.

Mélanges de fluides frigorigènes zéotropes. Une manipulation appropriée.

Soutirage sous forme liquide recommandé

Compte tenu des différences de composition en phase vapeur et en phase liquide, il est conseillé de toujours soutirer de la bouteille à gaz comprimé les mélanges de fluides frigorigènes zéotropes sous forme **liquide**. Cela permet de garantir la conformité du mélange de fluides frigorigènes aux spécifications. Un soutirage sous forme gazeuse se traduirait par d'autres caractéristiques thermodynamiques dans l'installation. Il ne serait plus possible d'affecter une pression d'ébullition à la température d'ébullition correspondante.



Comparaison avec le fluide R-407C

Caractéristiques générales du mélange (à 15 °C)

Composition (parts en %)

R-32	R-125	R-134a
23 %	25 %	52 %

Poids

11 kg

Pression

9,0152 bars absolus

Comparaison de la composition du fluide R-407C en phases vapeur et liquide (en bas) avec la composition initiale (en haut).

Caractéristiques en phase vapeur

Composition (parts en %)

R-32	R-125	R-134a
33,13 %	33,12 %	33,75 %

Volume

3,053 litres

Poids

0,1078 kg

Densité

35,3112 kg/m³

Caractéristiques en phase liquide

Composition (parts en %)

R-32	R-125	R-134a
22,90 %	24,92 %	52,18 %

Volume

9,247 litres

Poids

10,8922 kg

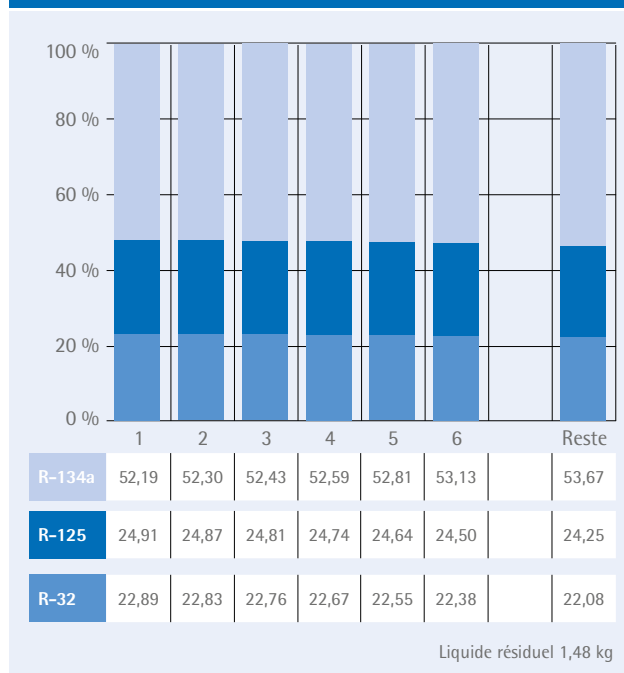
Densité

1 177,90 kg/m³

Exemple : Soutirage liquide de fluide R-407C d'une bouteille à gaz comprimé

La composition de la quantité résiduelle dans la bouteille à gaz comprimé reste pour ainsi dire inchangée, y compris après plusieurs soutirages. Les différents composants évoluent de façon négligeable, sans incidence sur la puissance frigorifique ou l'efficacité des installations.

Composition du mélange R-407C en cas de soutirage de 6 x 1,5 kg d'une bouteille à gaz comprimé de 12,3 litres/11 kg à une température de 25 °C



Simulation basée sur l'exemple du fluide R-407C : Comparaison des caractéristiques en phase vapeur et en phase liquide			
Conditions de simulation :		Composition nominale du mélange R-407C :	
Poids du mélange en réservoir	11 kg	R-32	23 %
Volume du réservoir	12,3 litres	R-125	25 %
Température	25 °C	R-134a	52 %
Nombre de soutirages liquides	6		
Poids par soutirage individuel	1,5 kg		
Composition du mélange après les soutirages :			
Poids résiduel	2,0 kg		
Pression	11,7662 bars absolus		
	Caractéristiques en phase vapeur	Caractéristiques en phase liquide	
Volume résiduel (en litres)	10,996	1,304	
Poids résiduel (kg)	0,5156	1,4844	
Composition (parts en %)			
R-32	31,53	22,08	
R-125	31,83	24,25	
R-134a	36,64	53,67	
Densité (kg/m ³)	46,8889	1 138,52	

Que faire en cas de fuites ?

Si, en dépit du soin apporté à la conception de l'installation, un problème d'étanchéité devait survenir au niveau du circuit de réfrigération, en règle générale, il n'est pas problématique de faire l'appoint de fluide frigorigène. La modification de la composition des différentes substances reste négligeable. L'utilisation de mélanges de fluides frigorigènes zéotropes n'implique pas de procédure différente de celle utilisée pour les fluides purs ou les mélanges azéotropes.

En cas de remplissages répétés sur la même installation, il est cependant possible que la proportion de certains composants évolue légèrement. Selon les cas, tenir compte des informations suivantes :

Problème d'étanchéité en phase liquide

Si la fuite se produit au niveau d'un point de sortie du fluide frigorigène sous forme liquide, elle équivaut à un soutirage liquide. Dans ce cas, un simple appoint de fluide frigorigène suffit.

Problème d'étanchéité en phase gazeuse

Si la fuite se produit au niveau d'un point de sortie du fluide frigorigène sous forme gazeuse, elle n'entraîne pas nécessairement de modification significative de la composition. Si l'installation est en service, la composition du fluide gazeux rejeté reste conforme. En cas de temps d'arrêt prolongés du système, elle peut cependant varier.

La fuite équivaut à un soutirage sous forme gazeuse de la bouteille de fluide frigorigène. Par conséquent, plus la pression est élevée, plus les rejets des composants du mélange sont importants. S'il s'agit d'un problème ponctuel, là aussi, un simple appoint n'entraîne pas de modification significative des paramètres de l'installation. Si l'appoint doit être effectué de façon récurrente, envisager un renouvellement complet du fluide frigorigène.

Effets des fuites avec le fluide frigorigène R-407C

Simulation informatique : fuite de vapeur derrière la soupape de détente, perte de 30 % de la quantité de remplissage				
Fluide frigorigène R-407C		À l'origine	Après la fuite	Après le remplissage
R-32/R-125/R-134a	(Poids%)	23/25/52	21,7/23,3/55	22/24/54
Pression de condensation	(bars absolus)	21,0	20,6	20,7
Pression d'évaporation	(bars absolus)	1,55	1,5	1,52
Rapport de pression		13,6	13,7	13,6
Puissance frigorifique	(kW)	30,2	29,3	29,6
Consommation d'électricité	(kW)	12,6	12,2	12,4
COP		2,33	2,34	2,34
Glissement (évaporateur)	(K)	4,72	4,67	4,67
Température de compression	(°C)	83,9	83,3	83,3



Analyse des fluides frigorigènes de Westfalen : Faites le choix de la sécurité !

Nous vous proposons de déterminer rapidement la composition de votre installation frigorifique en analysant les différents composants.



Tenir compte des informations suivantes :

Sur les installations avec système de détente à tube capillaire, respecter très précisément la quantité de remplissage spécifiée par le fabricant. Sur ce type d'installation, nous recommandons une purge de la quantité résiduelle et un renouvellement complet du produit conformément aux indications du fabricant.

Glissement de température avec mélanges zéotropes

Dans les composants de l'installation frigorifique caractérisés par un changement d'état physique du fluide frigorigène (évaporateur ou condenseur), les transformations s'effectuent à pression constante. Avec les fluides frigorigènes purs et les mélanges azéotropes, la température également reste constante.

Mélange de fluides frigorigènes azéotrope R-507A			
Composants	Part en %	Température d'ébullition en °C (à 1 bar absolu)	Pression d'ébullition en bars absolus à +20 °C
R-125	50	-48,4	12,05
R-143a	50	-47,5	11,05

Avec les mélanges de fluides frigorigènes zéotropes, la pression reste constante, mais la température est variable. Les chutes de pression ne sont donc pas prises en compte. Cela s'explique par le fait qu'à pression constante, les différents composants du mélange présentent des températures d'ébullition sensiblement différentes.

Mélange de fluides frigorigènes zéotrope R-449A			
Composants	Part en %	Température d'ébullition en °C (à 1 bar absolu)	Pression d'ébullition en bars absolus à +20 °C
R-32	24,3	-51,9	14,75
R-125	24,7	-48,4	12,05
R-513A	51,0	-29,5	6,13

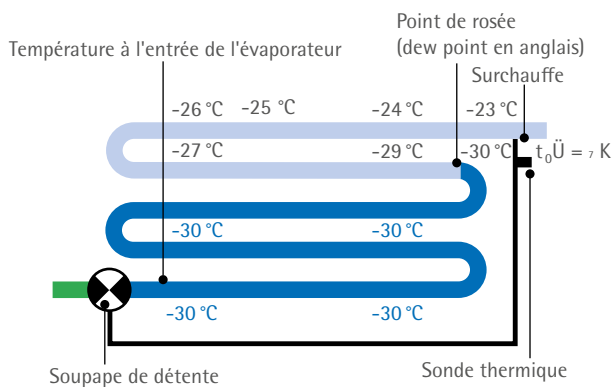
Avec un mélange zéotrope (ici R-449A), cela signifie qu'après la détente dans l'évaporateur, le fluide R-32 est le premier à adopter la phase gazeuse. Pour que les autres composants puissent également changer d'état physique, la température doit monter alors que la pression reste constante (valable notamment pour le R-513A).

Inversement, dans le condenseur, le processus de transformation s'effectue en cas de baisse de la température. Ce comportement a une incidence sur l'évaluation du fonctionnement et la modification des installations existantes, mais aussi sur la conception des installations neuves.

Détermination de la surchauffe de mélanges frigorigènes azéotropes et zéotropes.

La surchauffe désigne toute température supérieure au point de rosée du fluide frigorigène à pression constante. Elle s'entend comme une différence exprimée en Kelvin [K]. Ce paramètre est très utile pour évaluer le fonctionnement d'une installation frigorifique. Deux valeurs sont ici déterminantes : la première est la température de surchauffe au niveau de la sonde de la soupape de détente. Elle permet d'évaluer la quantité de fluide frigorigène en ébullition dans l'évaporateur. Le second paramètre est la température à l'entrée du compresseur, qui permet de tirer des conclusions sur l'efficacité et le bilan énergétique d'un système.

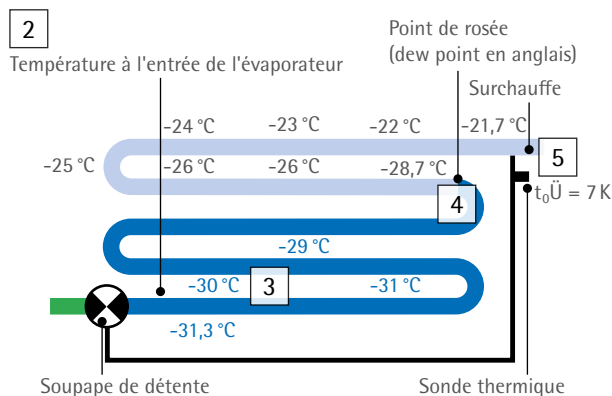
Mélange de fluides frigorigènes azéotrope R-507A



- Plage de changement de phase (vapeur humide)
- Phase correspondant à la plage de surchauffe

L'évaporation d'un fluide pur ou d'un mélange de fluides frigorigènes azéotrope dans l'évaporateur se produit à température constante jusqu'au point de rosée. Ce n'est qu'une fois que l'ensemble du fluide frigorigène est à l'état gazeux qu'un nouvel apport de chaleur entraîne une augmentation de la température jusqu'au point de surchauffe de l'organe de détente, voire au-delà. Pour ce type de fluides frigorigènes, la température aux points de bulle, d'évaporation et de rosée est identique (ne tient pas compte d'éventuelles chutes de pression).

Mélange de fluides frigorigènes zéotrope R-449A



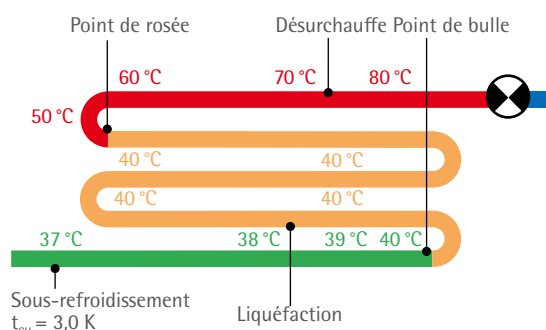
- Plage de changement de phase (vapeur humide)
- Phase correspondant à la plage de surchauffe

Par rapport à un mélange de fluides frigorigènes azéotrope, la différence réside dans l'augmentation de la température dans la plage de vapeur humide, requise pour que le mélange zéotrope puisse changer d'état physique. À température d'évaporation **moyenne identique** [3] le **point de rosée** [4] est cependant légèrement supérieur, donc le **point de surchauffe aussi** [5]. La température du point de bulle ne peut être développée dans l'évaporateur, car le processus de détente suffit à entraîner une température plus élevée à l'**entrée** de l'évaporateur [2].

Détermination du sous-refroidissement de mélanges frigorigènes azéotropes et zéotropes.

La température d'évaporation moyenne et l'évaluation des installations frigorifiques sont déterminées par la valeur de sous-refroidissement en amont de la soupape de détente. Le sous-refroidissement désigne toute température inférieure au point de bulle du fluide frigorigène à pression constante. Pour pouvoir calculer cette valeur, ce n'est pas la température au point de rosée qui est retenue, mais la température au point de bulle.

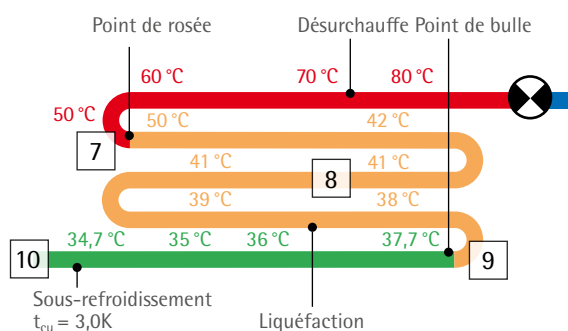
Mélange de fluides frigorigènes azéotrope R-507A



Avec des fluides purs ou des mélanges azéotropes, les températures au point de rosée et au point de bulle sont identiques (ne tient pas compte d'éventuelles chutes de pression).

- Phase correspondant à la plage de surchauffe
- Plage de changement de phase (vapeur humide)
- Plage de sous-refroidissement

Mélange de fluides frigorigènes zéotrope R-449A



Avec des mélanges de fluides frigorigènes zéotropes, la température au point de rosée est atteinte après la **désurchauffe** [7]. La liquéfaction s'ensuit à pression constante à mesure que la température redescend jusqu'à la **température de liquéfaction** [8] moyenne. Elle se poursuit jusqu'au **point de bulle** [9]. Si la température du liquide continue à chuter, on atteint le point de **sous-refroidissement** [10].

- Phase correspondant à la plage de surchauffe
- Plage de changement de phase (vapeur humide)
- Plage de sous-refroidissement

Conception des installations neuves avec mélanges de fluides frigorigènes zéotropes.

Dimensionnement des installations

Les spécifications pour la conception d'installations avec mélanges de fluides frigorigènes zéotropes sont légèrement différentes de celles concernant les fluides purs ou les mélanges azéotropes. Il faut également tenir compte de la température de glissement :

les températures moyennes d'évaporation (moyenne des températures à l'entrée de l'évaporateur et au point de rosée) et de liquéfaction (moyenne des températures au point de rosée et au point de bulle) doivent servir de référence pour le dimensionnement des installations. Tandis que les pressions d'évaporation et de liquéfaction peuvent être aisément déterminées à partir des températures souhaitées pour les fluides purs et les mélanges azéotropes, elles doivent être calculées en priorité pour les mélanges zéotropes.

La majorité des logiciels proposés par les fabricants de composants et de fluides frigorigènes permettent d'obtenir ces valeurs moyennes en amont. En l'absence de tels logiciels, les pressions doivent être calculées à l'aide des tableaux indiquant les pressions d'évaporation.

Détermination de la pression de liquéfaction

Ces tableaux permettent de déterminer la pression correspondant à la température de liquéfaction moyenne sur la base de températures identiques au point de bulle et au point de rosée.

Extrait du tableau des pressions d'évaporation pour le mélange R-449A :				
T [°C]	p' [bar]	p'' [bar]	h' [kJ/kg]	h'' [kJ/kg]
35	16,5	14,6	252	412
36	16,9	15,0	254	412
37	17,3	15,4	256	412
38	17,7	15,8	257	412
39	18,2	16,2	259	413
40	18,6	16,6	261	413
41	19,1	17,0	262	413
42	19,5	17,5	264	413

La moyenne arithmétique des deux points donne la pression de liquéfaction :

$$p_C = \frac{p_{BP} + p_{DP}}{2}$$

Exemple du mélange R-449A :

$$t_C = +40\text{°C}: p_C = \frac{18,6 + 16,6}{2} = 17,6 \text{ bars}$$

Détermination de la pression d'évaporation

L'établissement de la pression en fonction de la température d'évaporation moyenne est plus complexe. Cela s'explique notamment par l'influence du sous-refroidissement en amont de la vanne papillon au point d'entrée dans l'évaporateur et sur la fluctuation de température qui en résulte. Plusieurs logiciels peuvent être utilisés pour déterminer la pression d'évaporation. Les tableaux indiquant les pressions d'évaporation permettent d'obtenir des résultats suffisamment précis en reliant la température à l'enthalpie.

Extrait du tableau des pressions d'évaporation pour le mélange R-449A :				
P [bar]	t' [°C]	t'' [°C]	h' [kJ/kg]	h'' [kJ/kg]
1	-46,3	-40,2	138	376
1,1	-44,3	-38,2	140	378
1,2	-42,4	-36,4	143	379
1,3	-40,7	-34,7	145	380
1,4	-39,1	-33,1	147	381
1,5	-37,5	-31,5	149	381
1,6	-36,1	-30,1	151	382
1,7	-34,7	-28,7	153	383
1,8	-33,3	-27,4	155	384
1,9	-32,1	-26,1	156	384

La première étape consiste à formuler une hypothèse concernant la pression d'évaporation. Réflexion préalable à mener : dans la mesure où à l'entrée de l'évaporateur le fluide est déjà à l'état de vapeur humide, il ne reste pas grand chose du glissement de température de 5 Kelvin (valeur approx.).

Là aussi, il s'agit de formuler une hypothèse de départ, par exemple 3 Kelvin. Cela correspond à 1,5 Kelvin de moins à l'entrée de l'évaporateur et 1,5 Kelvin de plus au point de rosée. À présent, pour atteindre une température d'évaporation moyenne de -30 °C, selon le tableau, pour un point de rosée à -30 °C +1,5 K = -28,5 °C, on obtient une pression d'évaporation de 1,7 bar. Dans l'exemple ci-dessous, en attribuant la valeur x à la différence de température dans l'évaporateur, on obtient :

à raison d'une pression de 1,7 bar :

$$\frac{T_4 - T_2}{h_4 - h_2} = \frac{T_4 - T_1}{h_4 - h_1} ; \quad x = \frac{-28,7 - (-34,7)}{230} \cdot 131 = 3,4 \text{ K}$$

En divisant ce résultat par 2 et en soustrayant la valeur obtenue de la température au point de rosée, normalement, le résultat est proche de la température d'évaporation moyenne souhaitée. Pour notre exemple :

$$3,4 \div 2 = 1,7 ; \quad -28,7 - 1,7 = -30,4 \text{ °C}$$

La température est légèrement inférieure aux -30 °C souhaités. En cas de doute, le résultat peut être vérifié avec une pression supérieure (soit 1,8 bar). Dans ce cas, il suffit de soustraire la différence de température calculée (en haut) de la nouvelle température du point de rosée :

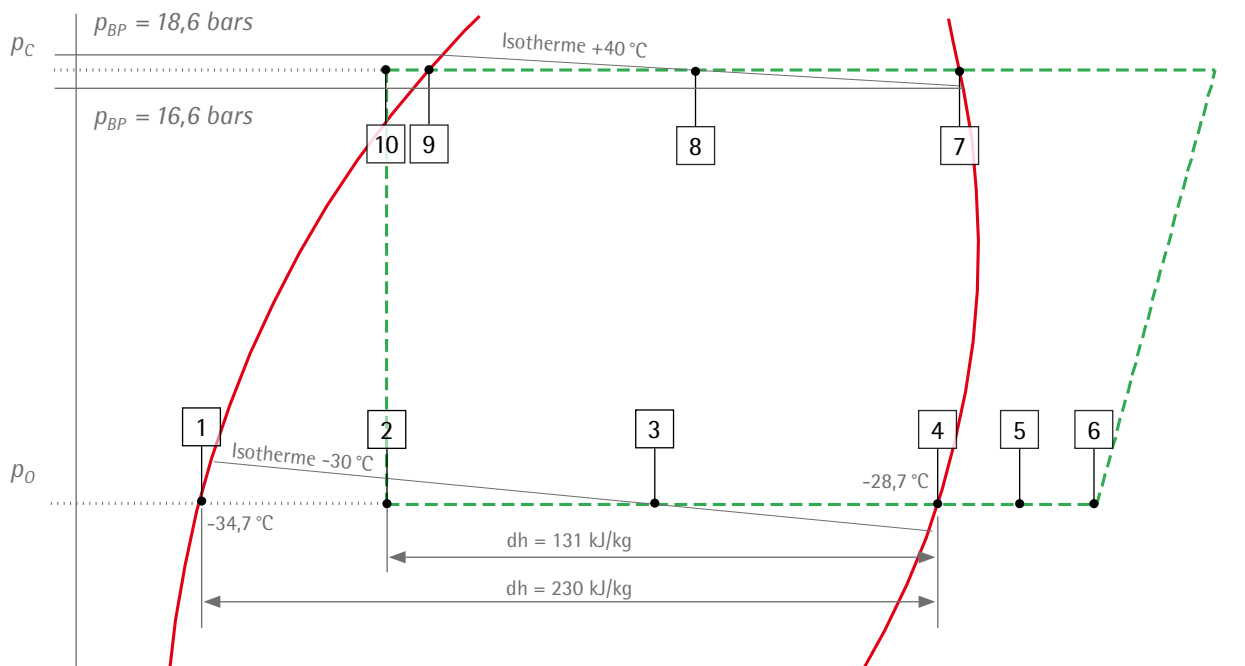
$$-27,4 - 1,7 = -29,1 \text{ °C}$$

Le premier résultat étant plus proche de la température d'évaporation moyenne, il convient de concevoir l'installation pour une pression d'évaporation de 1,7 bar.

Évaporation et liquéfaction, exemple du mélange R-449A avec $p_0 = 1,7 \text{ bar}$, 7 K de surchauffe, $p_c = 17,6 \text{ bars}$, 3 K de sous-refroidissement

1	Température au point de bulle (bubble en anglais)	-34,7 °C
2	Température à l'entrée de l'évaporateur	-31,3 °C
3	Température d'évaporation moyenne	-30 °C
4	Température au point de rosée (dew en anglais)	-28,7 °C
5	Capteur de mesure (pour 7K de surchauffe)	-21,7 °C
6	Capteur de mesure (pour 7K de surchauffe)	-21,7 °C
7	Température au point de rosée (dew en anglais)	+42,3 °C
8	Température de liquéfaction moyenne	+40 °C
9	Température au point de bulle (bubble en anglais)	+37,7 °C
10	Sous-refroidissement	+34,7 °C

Exemple de calcul illustré par un diagramme



Nos points forts.

Changement de fluide frigorigène

Pour passer d'un fluide pur ou d'un mélange azéotrope à un mélange de fluides frigorigènes zéotrope, il convient d'établir si l'augmentation de la valeur de surchauffe (ou une baisse de la valeur de sous-refroidissement) est réalisable. Cet aspect doit être pris en compte notamment pour les refroidisseurs de liquide, par exemple pour les systèmes à saumure frigorigène ou de production d'eau froide.

La température de surchauffe admissible dans l'évaporateur dépend de la température de l'agent de refroidissement au niveau du circuit de retour. Dans le condenseur, la valeur de sous-refroidissement dépend de la température d'entrée de l'agent de refroidissement. Cet aspect doit être pris en compte avant toute révision de la plage de puissance et d'efficacité. N'hésitez pas à nous solliciter.

Le fluide frigorigène qui répond à vos exigences

Des applications de refroidissement et de congélation aux plages de températures extrêmes, en passant par la climatisation de bâtiments et de véhicules : nous proposons de nombreux fluides et mélanges frigorigènes répondant aux exigences spécifiques. Notre gamme compte des fluides frigorigènes naturels et de synthèse, ainsi que des saumures frigorigènes (liquides caloporteurs).

Et le recyclage ?

Depuis plus de 20 ans, Westfalen traite les fluides frigorigènes usagés de ses installations. En matière de recyclage, nous respectons la séquence prévue par la législation en vigueur : minimisation des déchets, revalorisation des déchets, élimination des déchets.

Demandez-nous conseil !

Vous avez d'autres questions sur l'utilisation et l'élimination des fluides frigorigènes ou sur d'autres produits et leurs domaines d'application ? N'hésitez pas à nous contacter. Nos experts en gestion de fluides frigorigènes sont là pour vous conseiller !



Pour de plus amples informations, rendez-vous sur : westfalen-france.fr



Westfalen

Gaz industriels / Fluides frigorigènes / Propane

Westfalen Austria GmbH

Aumühlweg 21/Top 323
2544 Leobersdorf
Autriche
Tél. +43 22.56.63.63.0
Fax +43 22.56.63.63.03.30
www.westfalen.at
info@westfalen.at

Westfalen BVBA-SPRL

Watermolenstraat 11
9320 Alost
Belgique
Tél. +32 53.64.10.70
Fax +32 53.67.39.07
www.westfalen.be
info@westfalen.be

Westfalen Gas s.r.o.

Chebská 545/13
322 00 Plzeň 5 – Křimice
République tchèque
Tél. +420 3.79.42.00.42
Fax +420 3.79.42.00.32
www.westfalen.cz
info@westfalen.cz

Westfalen France S.A.R.L.

Parc d'Activités Belle Fontaine
57780 Rosselange
France
Tél. +33 3.87.50.10.40
Fax +33 3.87.50.10.41
www.westfalen-france.fr
info@westfalen-france.fr

Westfalen Gas Schweiz GmbH

Sisslerstr. 11/Postfach
5074 Eiken AG
Suisse
Tél. +41 61 855 25 25
Fax +41 61 855 25 26
www.westfalen.ch
info@westfalen.ch

Westfalen Gassen Nederland BV

Postbus 779
7400 AT Deventer
Pays-Bas
Tél. +31 5.70.63.67.45
Fax +31 5.70.63.00.88
www.westfalengassen.nl
info@westfalengassen.nl

Westfalen AG

Industrieweg 43
48155 Münster
Allemagne
Tél. +49 2.51.69.50
Fax +49 2.51.69.51.94
www.westfalen.com
info@westfalen.com

Westfalen Medical BV

Rigastraat 14
7418 EW Deventer
Pays-Bas
Tél. +31 5.70.85.84.50
Fax +31 5.70.85.84.51
www.westfalenmedical.nl
info@westfalenmedical.nl