

NORME
INTERNATIONALE

ISO
21013-3

Deuxième édition
2016-05-01

**Réceptacles cryogéniques —
Dispositifs de sécurité pour le service
cryogénique —**

**Partie 3:
Détermination de la taille et du volume**

iTeh STANDARD PREVIEW
*Cryogenic vessels — Pressure-relief accessories for cryogenic
service —
(standards.iteh.ai)*
Part 3: Sizing and capacity determination

ISO 21013-3:2016

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/fca91b92-fa5a-4019-ad91-1cc01f5530ea/iso-21013-3-2016>



Numéro de référence
ISO 21013-3:2016(F)

© ISO 2016

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

ISO 21013-3:2016

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/fca91b92-fa5a-4019-ad91-1cc01f5530ea/iso-21013-3-2016>



DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT

© ISO 2016, Publié en Suisse

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, l'affichage sur l'internet ou sur un Intranet, sans autorisation écrite préalable. Les demandes d'autorisation peuvent être adressées à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office
Ch. de Blandonnet 8 • CP 401
CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland
Tel. +41 22 749 01 11
Fax +41 22 749 09 47
copyright@iso.org
www.iso.org

Sommaire

Page

Avant-propos	v
1 Domaine d'application	1
2 Références normatives	1
3 Symboles	2
4 Calcul de la quantité totale de chaleur transférée par unité de temps, de la paroi chaude (enveloppe extérieure) à la paroi froide (récipient intérieur)	5
4.1 Généralités.....	5
4.2 Dans des conditions autres que le feu.....	5
4.2.1 Récipients isolés sous vide normal.....	5
4.2.2 Dispositif de mise en pression.....	6
4.2.3 Récipients isolés sous vide en cas de perte de vide et récipients non isolés sous vide.....	6
4.2.4 Supports et tuyauteries.....	8
4.3 Dans des conditions de feu.....	8
4.3.1 Le système d'isolation reste totalement ou partiellement en place dans des conditions de feu.....	8
4.3.2 Le système d'isolation ne reste pas en place dans des conditions de feu.....	9
4.4 Condensation de l'air ou de l'azote.....	9
4.4.1 Généralités.....	9
4.4.2 Perte de vide avec de l'air et de l'azote.....	10
4.4.3 Feu avec perte de vide avec de l'air ou de l'azote.....	10
4.5 Transfert de chaleur par unité de temps (watts).....	11
4.5.1 Généralités.....	11
4.5.2 Fonctionnement normal.....	11
4.5.3 Régulateur de pression entièrement ouvert.....	11
4.5.4 Condition de perte de vide.....	12
4.5.5 Condition de feu avec perte de vide, enveloppe sous vide, et isolation totalement ou partiellement en place.....	12
4.5.6 Condition de feu avec perte de vide, pas d'isolation.....	12
4.5.7 Taux de transfert de chaleur total.....	12
5 Calcul du débit massique à décharger par les dispositifs de décharge de pression	13
5.1 Pression de décharge, P , inférieure à la pression critique.....	13
5.2 Pression de décharge, P , égale ou supérieure à la pression critique.....	13
5.2.1 Exemple.....	14
6 Tuyauterie pour dispositifs de décharge de pression	14
6.1 Chute de pression.....	14
6.1.1 Généralités.....	14
6.1.2 Soupapes de décharge.....	14
6.1.3 Disques de rupture.....	15
6.2 Prise en compte de la contre-pression.....	15
6.3 Transfert de chaleur.....	15
7 Dimensionnement des dispositifs de décharge de pression	16
7.1 Généralités.....	16
7.2 Dimensionnement des soupapes de décharge.....	17
7.2.1 Capacité de débit.....	17
7.2.2 Détermination de l'écoulement critique et de l'écoulement sous-critique pour les gaz.....	17
7.2.3 Écoulement critique.....	17
7.2.4 Écoulement sous-critique.....	18
7.2.5 Méthode d'analyse recommandée.....	19
7.2.6 Exemple.....	21
7.3 Dimensionnement des disques de rupture.....	26

7.3.1	Capacité de débit.....	26
7.3.2	Détermination de l'écoulement critique et de l'écoulement sous-critique pour les gaz.....	26
7.3.3	Écoulement critique.....	27
7.3.4	Écoulement sous-critique.....	27
7.3.5	Méthode d'analyse recommandée.....	27
7.3.6	Exemple.....	31
Annexe A (informative) Cryostats.....		34
Bibliographie.....		35

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[ISO 21013-3:2016](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/fca91b92-fa5a-4019-ad91-1cc01f5530ea/iso-21013-3-2016)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/fca91b92-fa5a-4019-ad91-1cc01f5530ea/iso-21013-3-2016>

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (IEC) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les procédures utilisées pour élaborer le présent document et celles destinées à sa mise à jour sont décrites dans les Directives ISO/IEC, Partie 1. Il convient, en particulier de prendre note des différents critères d'approbation requis pour les différents types de documents ISO. Le présent document a été rédigé conformément aux règles de rédaction données dans les Directives ISO/IEC, Partie 2 (voir www.iso.org/directives).

L'attention est appelée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence. Les détails concernant les références aux droits de propriété intellectuelle ou autres droits analogues identifiés lors de l'élaboration du document sont indiqués dans l'Introduction et/ou dans la liste des déclarations de brevets reçues par l'ISO (voir www.iso.org/brevets).

Les appellations commerciales éventuellement mentionnées dans le présent document sont données pour information, par souci de commodité, à l'intention des utilisateurs et ne sauraient constituer un engagement.

Pour une explication de la signification des termes et expressions spécifiques de l'ISO liés à l'évaluation de la conformité, ou pour toute information au sujet de l'adhésion de l'ISO aux principes de l'OMC concernant les obstacles techniques au commerce (OTC), voir le lien suivant: [standards.iteh.ai](http://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/1ca91b92-1a5a-4019-ad91-1cc01f5530ea/iso-21013-3-2016) <http://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/1ca91b92-1a5a-4019-ad91-1cc01f5530ea/iso-21013-3-2016>

Le comité chargé de l'élaboration du présent document est l'ISO/TC 220, *Réceptacles cryogéniques*.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition (ISO 21013-3:2006), qui a fait l'objet d'une révision technique.

L'ISO 21013 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général *Réceptacles cryogéniques — Dispositifs de sécurité pour le service cryogénique*:

- *Partie 1: Soupapes refermables*
- *Partie 2: Dispositifs de sécurité non refermables*
- *Partie 3: Détermination de la taille et du volume*
- *Partie 4: Dispositifs de sécurité pour la pression à pilotage automatique*

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

[ISO 21013-3:2016](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/fca91b92-fa5a-4019-ad91-1cc01f5530ea/iso-21013-3-2016)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/fca91b92-fa5a-4019-ad91-1cc01f5530ea/iso-21013-3-2016>

Réceptacles cryogéniques — Dispositifs de sécurité pour le service cryogénique —

Partie 3: Détermination de la taille et du volume

1 Domaine d'application

La présente partie de l'ISO 21013 établit des méthodes de calcul distinctes permettant de déterminer le débit massique à décharger pour chacune des conditions spécifiées suivantes:

- réceptacles isolés sous vide comportant un système d'isolation (enveloppe extérieure + matériau isolant) intact sous vide normal, enveloppe extérieure à température ambiante, réceptacle intérieur à la température du contenu à la pression de décharge spécifiée;
- réceptacles isolés sous vide comportant un système d'isolation (enveloppe extérieure + matériau isolant) intact sous vide normal, enveloppe extérieure à température ambiante, réceptacle intérieur à la température du contenu à la pression de décharge spécifiée, régulateur de pression du système de mise en pression fonctionnant à pleine charge;
- réceptacles isolés sous vide ou non, comportant un système d'isolation restant en place mais avec perte de vide en cas de réceptacles isolés sous vide, enveloppe extérieure à température ambiante, réceptacle intérieur à la température du contenu à la pression de décharge spécifiée, ou réceptacles isolés sous vide ou non, comportant un système d'isolation restant totalement ou partiellement en place, mais avec perte de vide dans le cas des réceptacles isolés sous vide, feu environnant, réceptacle intérieur à la température du contenu à la pression de décharge spécifiée;
- réceptacles isolés sous vide contenant des fluides avec une température de saturation inférieure à 75 K à 1 bar avec un système d'isolation restant en place, mais avec perte de vide avec de l'air ou de l'azote dans l'espace sous vide;
- réceptacles isolés sous vide contenant des fluides avec une température de saturation inférieure à 75 K à 1 bar avec un système d'isolation restant en place, mais avec perte de vide avec de l'air ou de l'azote dans l'espace sous vide avec feu environnant;
- réceptacles avec perte totale du système d'isolation et feu environnant.

Il est nécessaire qu'une bonne pratique d'ingénierie reposant sur des données de physique théorique bien établies soit adoptée afin de déterminer le débit massique requis lorsqu'aucune méthode de calcul appropriée n'est fournie pour une condition donnée.

Des Recommandations concernant les dispositifs de décharge de pression pour cryostats sont données dans l'[Annexe A](#).

2 Références normatives

Le présent document ne contient aucune référence normative.

3 Symboles

A	moyenne arithmétique des surfaces intérieure et extérieure du matériau isolant du récipient	m^2
A_B	section d'écoulement réelle d'un élément de tuyauterie	m^2
A_e	surface extérieure totale du réseau de canalisations entre l'enveloppe extérieure et un emplacement x	m^2
A_F	section d'écoulement minimale (section de référence) dans un réseau de canalisations	m^2
A_{Fd}	section d'écoulement minimale (section de référence) dans le réseau de canalisations, en aval de la soupape de décharge	m^2
A_{Fu}	section d'écoulement minimale (section de référence) dans le réseau de canalisations, en amont de la soupape de décharge	m^2
A_i	surface extérieure totale du récipient intérieur	m^2
A_j	surface extérieure totale du réseau de canalisations entre les enveloppes intérieure et extérieure (interparoi)	m^2
A_L	grande section d'écoulement d'un élément de tuyauterie comprenant deux dimensions différentes de sections d'écoulement	m^2
A_n	section transversale, matière du support ou du tube	m^2
A_R	rapport de sections, A_S/A_L	—
A_s	petite section d'écoulement d'un élément de tuyauterie comprenant deux dimensions différentes de sections d'écoulement	m^2
A_v	section d'écoulement (orifice) réelle d'une soupape de décharge de pression	mm^2
A_{Va}	section d'écoulement (orifice) réelle de la soupape de décharge de pression choisie pour l'analyse finale	mm^2
A_{V1}	section d'écoulement (orifice) minimale requise d'une soupape de décharge	mm^2
A_2	surface extérieure de transfert de chaleur du réchauffeur atmosphérique	m^2
c_p	capacité thermique massique à pression constante à la moyenne de T_n et T_e	$kJ/(kg \cdot K)$
C_v	débit déterminé expérimentalement à travers un élément de tuyauterie ou un dispositif	$gal/min/psi$
e_1	épaisseur nominale du matériau isolant, vide normal, sans condition de feu	m
e_3	épaisseur minimale du matériau isolant, tenant compte de la perte de vide, sans condition de feu	m
e_5	épaisseur du matériau isolant restant en place dans des conditions de feu	m
f_T	coefficient de frottement dans la canalisation	—
h	enthalpie du fluide dans les conditions de v	kJ/kg
h_r	enthalpie massique à l'entrée et à la sortie de la soupape de décharge	kJ/kg
K_A	coefficient de résistance à l'écoulement d'un élément de tuyauterie en fonction de A_F	—
K_B	coefficient de résistance à l'écoulement d'un élément de tuyauterie en fonction de A_B	—
K_b	coefficient d'écoulement sous-critique	—
K_{dr}	coefficient de débit après abattement	—
$K_{dr,a}$	coefficient de débit après abattement de l'orifice de la soupape ayant la plus grande section suivante supérieure à A_{V1}	—
$K_{dr,1}$	coefficient de débit après abattement de la soupape initialement analysée	—
k_n	conductivité thermique moyenne d'un support ou d'un tube individuel, entre T et T_a	$W/(m \cdot K)$
K_R	coefficient de résistance à l'écoulement de l'ensemble du réseau de canalisations en fonction de la section de référence A_F	—
K_{RC}	coefficient de résistance à l'écoulement au niveau de la transition entre écoulement critique et sous-critique	—
K_{Rd}	coefficient de résistance à l'écoulement global du réseau de canalisations, en aval de la soupape de décharge de pression	—

K_{Ru}	coefficient de résistance à l'écoulement global du réseau de canalisations, en amont de la soupape de décharge de pression	—
K_{SOMME}	coefficient de résistance à l'écoulement total d'un réseau de canalisations en série ou en parallèle	—
K_V	débit déterminé expérimentalement à travers un élément de tuyauterie ou un dispositif	m ³ /h/bar
k_1	conductivité thermique moyenne du matériau isolant, vide normal, sans condition de feu	W/(m·K)
k_3	conductivité thermique moyenne du matériau isolant avec l'air ou le chargement gazeux, sans condition de feu	W/(m·K)
L	chaleur latente de vaporisation du liquide cryogénique dans des conditions de décharge	kJ/kg
l	longueur, élément de tuyauterie	m
L_a	chaleur latente de vaporisation du liquide cryogénique à une pression de 1,013 bar	kJ/kg
l_n	longueur du support ou du tube dans l'interparoi sous vide	m
L'	rapport enthalpie/dilatation volumique pour des conditions de débit critique ou de fluide «tout gaz»	kJ/kg
M	masse molaire	kg/mol
m_{max}	capacité massique maximale du récipient	kg
N	taux d'évaporation normal (NER)	%/jour
P	pression de décharge, récipient intérieur	bar
P_b	pression, sortie de la soupape de sûreté	bar
P_{b10}	pression à la sortie de la soupape de décharge pour une contre-pression engendrée en aval de 10 %	bar
P_{sortie}	pression à la sortie du réseau de canalisations	bar
P_i	pression, entrée de la soupape de sûreté	bar
P_S	pression de tarage de la soupape de décharge de pression	bar
Q_m	débit massique	kg/h
Q_{ma}	débit massique d'une soupape de décharge dans un réseau de canalisations donné	kg/h
Q_{mNER}	débit massique dû au taux d'évaporation normal	kg/h
R	constante des gaz parfaits	J/(mol·K)
r	rayon de transition de coude	m
T	température de décharge, récipient intérieur	K
T_a	température ambiante extérieure maximale, sans condition de feu	K
$T_{b,Pb}$	température à la sortie de la soupape de décharge	K
T_{b10}	température à la sortie de la soupape de décharge pour une contre-pression engendrée en aval de 10 %	K
T_e	température extérieure pour une condition donnée	K
$T_{sortie,Pb}$	température à la sortie du réseau de canalisations	K
T_f	température extérieure, condition de feu	K
T_i	température, entrée de la soupape de sûreté	K
T_n	température du fluide en un emplacement donné de début d'écoulement le long du réseau de canalisations	K
T_{sat}	température de saturation du fluide à une pression de 1 bar	K
T_x	température du fluide en un emplacement x donné le long du réseau de canalisations	K
U_p	coefficient de transfert de chaleur global d'un réseau de canalisations pour des conditions de température données	W/(m ² ·K)
U_1	coefficient de transfert de chaleur du matériau isolant, vide normal, sans condition de feu	W/(m ² ·K)
U_2	coefficient de transfert de chaleur global par convection du réchauffeur atmosphérique	W/(m ² ·K)

U_3	coefficient de transfert de chaleur du matériau isolant avec l'air ou le chargement gazeux, sans condition de feu	W/ (m ² ·K)
U_{3a}	coefficient de transfert de chaleur, condensation de l'air ou de l'azote, perte de vide, sans condition de feu	W/m ²
U_5	coefficient de transfert de chaleur du matériau isolant avec l'air ou le chargement gazeux, condition de feu	W/ (m ² ·K)
U_{5a}	coefficient de transfert de chaleur, condensation de l'air ou de l'azote, perte de vide, condition de feu	W/m ²
w_n	entrée de chaleur due à un support ou à un tube individuel	W/K
W_T	taux de transfert de chaleur total pour des conditions spécifiées	Watt [W]
W_{T1}	taux de transfert de chaleur total en fonctionnement normal	Watt [W]
W_{T1NER}	taux de transfert de chaleur total dû au NER en fonctionnement normal	Watt [W]
W_{T2}	taux de transfert de chaleur total en fonctionnement normal, y compris le dispositif de mise en pression	Watt [W]
W_{T2NER}	taux de transfert de chaleur total dû au NER en fonctionnement normal, y compris le dispositif de mise en pression	Watt [W]
W_{T3}	taux de transfert de chaleur total, perte de vide, isolation en place, sans condition de feu, $T_{sat} > 75$ K	Watt [W]
W_{T3a}	taux de transfert de chaleur total, perte de vide, isolation en place, sans condition de feu, $T_{sat} \leq 75$ K	Watt [W]
W_{T5}	taux de transfert de chaleur total, perte de vide, isolation en place, condition de feu, $T_{sat} > 75$ K	Watt [W]
W_{T5a}	taux de transfert de chaleur total, perte de vide, isolation en place, condition de feu, $T_{sat} \leq 75$ K	Watt [W]
W_{T6}	taux de transfert de chaleur total, perte de vide, pas d'isolation, condition de feu	Watt [W]
W_1	taux de transfert de chaleur à travers le système d'isolation, vide normal, sans condition de feu	Watt [W]
W_2	taux de transfert de chaleur à travers le dispositif de mise en pression, régulateur entièrement ouvert	Watt [W]
W_3	taux de transfert de chaleur à travers le système d'isolation, perte de vide, sans condition de feu	Watt [W]
W_{3a}	taux de transfert de chaleur dû à la condensation de l'air ou de l'azote, perte de vide, sans condition de feu	Watt [W]
W_4	taux de transfert de chaleur à travers les supports et les tubes dans l'interparoi	Watt [W]
W_5	taux de transfert de chaleur à travers les parois du récipient, isolation en place, condition de feu	Watt [W]
W_{5a}	taux de transfert de chaleur dû à la condensation de l'air ou de l'azote, perte de vide, condition de feu	Watt [W]
W_6	taux de transfert de chaleur à travers les parois du récipient, pas d'isolation, condition de feu	Watt [W]
x	emplacement longitudinal le long d'un réseau de canalisations	m
X	nombre de couches d'isolation	—
Y	taux de transfert de chaleur U_{3a} ou U_{5a}	—
Z_i	facteur de compressibilité à la pression P_i et à la température T_i	—
φ	rapport de pressions, P_{sortie}/P	—
κ	exposant isentropique	—
λ_1	coefficient d'écoulement sous-critique	—
λ_2	coefficient d'écoulement sous-critique	—
ν	volume massique du fluide critique ou tout-gaz à une température donnée à la pression P	m ³ /kg

iTeh STANDARD PREVIEW
(standards.iteh.ai)

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/fca91b92-fa5a-4019-ad91-19d5520e1e13-iso-21013-3-2016>

v_{b10}	volume massique à la sortie de la soupape de décharge pour une contre-pression engendrée en aval de 10 %	m^3/kg
v_{b,P_b}	volume massique à la sortie de la soupape de décharge de pression, évalué à h_r et à une valeur d'essai de P_b	m^3/kg
v_{dmax}	volume massique aval moyen maximal, selon la limite de contre-pression voulue	m^3/kg
v_{d10}	volume massique aval moyen, pour une contre-pression engendrée en aval de 10 %	m^3/kg
v_{sortie,P_b}	volume massique à la sortie du réseau de canalisations, évalué à P_{sortie} et T_{sortie,P_b}	m^3/kg
$v_{sortie10}$	volume massique à la sortie du réseau de canalisations pour une contre-pression engendrée en aval de 10 %	m^3/kg
v_g	volume massique du gaz saturé à la pression de décharge P	m^3/kg
v_{ga}	volume massique du gaz saturé à une pression de 1,013 bar	m^3/kg
v_i	volume massique, entrée de la soupape de sûreté	m^3/kg
v_l	volume massique du liquide saturé à la pression de décharge P	m^3/kg
v_{la}	volume massique du liquide saturé à une pression de 1,013 bar	m^3/kg
v_u	volume massique moyen du liquide s'écoulant en amont de l'entrée de la soupape de décharge de pression	m^3/kg
ψ	expression pour la détermination de Q_m et T pour des conditions de débit de fluide critique ou de récipient rempli de gaz	$m^{3/2} \cdot kg^{1/2} / kJ$

4 Calcul de la quantité totale de chaleur transférée par unité de temps, de la paroi chaude (enveloppe extérieure) à la paroi froide (récipient intérieur)

4.1 Généralités

(standards.iteh.ai)

P (en bar abs) est la pression de décharge réelle à l'intérieur du récipient, qui est utilisée pour calculer le débit massique requis à travers les dispositifs de décharge de pression.

T_a (en K) est la température ambiante maximale pour des conditions autres que le feu (comme spécifié, par exemple, par une réglementation ou une norme).

T_f (en K) est la température de l'environnement extérieur dans des conditions de feu, prise comme égale à 922 K dans la présente partie de l'ISO 21013.

T (en K) est la température de décharge dans le récipient, devant être prise en compte.

- Pour les fluides sous-critiques, T est la température de saturation du liquide à la pression P .
- Pour les fluides critiques ou surcritiques, T est calculée à partir de 5.2.

4.2 Dans des conditions autres que le feu

4.2.1 Récipients isolés sous vide normal

W_1 est la quantité de chaleur transférée par unité de temps (en watts) due à l'entrée de chaleur à travers le système d'isolation.

$$W_1 = (U_1 \cdot A)(T_a - T) \quad (1)$$

où

U_1 est le coefficient de transfert de chaleur global du matériau isolant sous vide normal, en $W/(m^2 \cdot K)$;

$$U_1 = \frac{k_1}{e_1};$$

k_1 est la conductivité thermique moyenne du matériau isolant sous vide normal, entre T et T_a , en $W/(m \cdot K)$;

e_1 est l'épaisseur nominale du matériau isolant, en mètres;

A est la moyenne arithmétique des surfaces intérieure et extérieure du matériau isolant du récipient, en m^2 .

4.2.2 Dispositif de mise en pression

W_2 est la quantité de chaleur transférée par unité de temps (en watts) par le circuit du dispositif de mise en pression, le régulateur étant entièrement ouvert. W_2 est déterminée en fonction du type (atmosphérique, eau ou vapeur, électrique, etc.) et de la conception du circuit du dispositif de mise en pression. Par exemple, dans le cas d'un réchauffeur atmosphérique:

$$W_2 = (U_2 \cdot A_2)(T_a - T) \quad (2)$$

où

iTeh STANDARD PREVIEW

(standards.iteh.ai)

U_2 est le coefficient de transfert de chaleur global par convection du réchauffeur atmosphérique, en $W/(m^2 \cdot K)$;

A_2 est la surface extérieure de transfert de chaleur du réchauffeur, en m^2 .

Dans une première approximation, les formules suivantes peuvent être utilisées:

$$U_2(T_a - T) = 19\,000 \text{ W/m}^2 \text{ pour } T \leq 75 \text{ K} \quad (3)$$

$$U_2(T_a - T) = 2\,850 \text{ W/m}^2 \text{ pour } T \leq 75 \text{ K} \quad (4)$$

4.2.3 Récipients isolés sous vide en cas de perte de vide et récipients non isolés sous vide

W_3 est la quantité de chaleur transférée par unité de temps (en watts) due à l'entrée de chaleur à travers le matériau isolant.

$$W_3 = (U_3 \cdot A)(T_a - T) \quad (5)$$

où

Si l'isolation est totalement efficace pour le transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement à 328 K, alors U_3 peut être calculé à l'aide de la [Formule \(6\)](#).

$$U_3 = \frac{k_3}{e_3} \quad (6)$$

- U_3 est le coefficient de transfert de chaleur global du matériau isolant lorsque celui-ci est saturé par le gaz de chargement ou par l'air à la pression atmosphérique, en retenant la valeur la plus élevée, en $W/(m^2 \cdot K)$;
- k_3 est la conductivité thermique moyenne du matériau isolant saturé par le gaz de chargement ou par l'air à la pression atmosphérique, en retenant la valeur qui donne le coefficient le plus élevé, entre T et T_a , en $W/(m \cdot K)$. Les valeurs de k_3 pour les gaz sont énumérées dans le [Tableau 1](#);
- e_3 est l'épaisseur minimale du matériau isolant, en mètres, en tenant compte des tolérances de fabrication ou des effets de perte soudaine de vide.

NOTE Il est possible que cette formule ne puisse pas être appliquée à des températures inférieures à 75 K avec une petite épaisseur de matériau isolant, puisque le coefficient de transfert de chaleur maximal serait donné par la condensation de l'air.

Un espace sous vide, un espace rempli de gaz ou un espace occupé par l'isolation détériorée ne doit pas être inclus dans l'épaisseur de l'isolation. La capacité de ces espaces ou de l'isolation détériorée à réduire le transfert de chaleur par conduction, convection ou rayonnement peut être évaluée séparément et incluse dans le coefficient de transfert de chaleur global, U_3 , en utilisant des méthodes décrites dans des ouvrages publiés traitant du transfert de chaleur. La détérioration de l'isolation peut être due aux phénomènes suivants:

- condensation de l'humidité;
- condensation de l'air;
- augmentation de la masse volumique de l'isolation due à une perte soudaine de vide.

Tableau 1 — Conductivité thermique pour les fluides réfrigérés (cryogéniques) à la température moyenne entre la saturation et 328 K (k_3) et 922 K (k_5) à 1 bar

Fluide	k_3 [$W/(m \cdot K)$]	k_5 [$W/(m \cdot K)$]
Air	0,019	0,043
Argon	0,013	0,027
Dioxyde de carbone	0,017	0,039
Monoxyde de carbone	0,020	0,039
Hélium	0,104	0,211
Hydrogène	0,116	0,217
Méthane	0,024	0,074
Néon	0,034	0,067
Azote	0,019	0,040
Oxygène	0,019	0,043
Krypton	0,007	0,015
Xénon	0,005	0,009
Éthane	0,016	0,064
Trifluorométhane	0,012	0,027
Éthylène (éthène)	0,015	0,056
Oxyde nitreux	0,014	0,038