

## Introduction

De nombreux systèmes tubulaires différents sont employés dans le domaine du chauffage à proximité/distance. Outre les tubes en acier isolés classiques, bon nombre de fabricants ont mis sur le marché des tuyaux en plastique isolés ces dernières années. Dans le domaine de l'isolation et des agents propulseurs utilisés en particulier, l'évolution chronologique a été plus progressive. Nous la retraçons ci-après. Cette présentation vise à permettre de comprendre le contexte de la dernière génération d'agents propulseurs physiques, les hydrofluoroléfines, (HFO) et à catégoriser cette classe de substances.

### 1. Principaux types de tuyaux isolés pour le chauffage à proximité/distance

Les tuyaux isolés requis pour transporter de l'eau chaude se distinguent essentiellement entre les systèmes tubulaires rigides et flexibles. Ces deux systèmes tubulaires ont leurs avantages et leurs inconvénients. On a recours à l'un ou l'autre selon les exigences techniques données.

Les systèmes tubulaires rigides (tubes à gaine plastique) se composent de tubes médians en acier, d'une isolation thermique (matériau isolant) et d'une gaine extérieure en polyéthylène (PE) servant à protéger l'isolant. Ces systèmes tubulaires ont été développés pour des températures et des pressions de service élevées et font office de conduites principales dans les réseaux de chauffage à distance étendus. Ces tuyaux sont livrés sous forme de rames. Il faut souder les tubes médians sur place et isoler ultérieurement les points de raccordement à l'aide de manchons et de mousse. La norme sous-jacente est la norme EN253.

Les systèmes tubulaires flexibles sont généralement constitués de tubes médians polymères, d'une isolation thermique et d'une gaine extérieure en PE (tube médian polymère). Les températures et pressions de service maximales sont inférieures à celles des tubes à gaine plastique. En revanche, ces systèmes permettent de poser une grande longueur en une seule pièce. En effet, ce type de tuyau peut être fabriqué enroulé en anneau et être livré tel quel sur le chantier. Les longueurs de plusieurs centaines de mètres sont courantes. Cela permet de réduire considérablement les coûts liés à la technique de raccordement. La norme sous-jacente est la norme EN15632.



**CALPEX PUR-KING**

**Système tubulaire flexible**



**PREMANT**

**Système tubulaire rigide**

## Matériaux isolants thermoplastiques et thermodurcissables

En ce qui concerne les systèmes tubulaires flexibles avec tubes médians en plastique, il existe actuellement deux systèmes sur le marché : ceux dont l'isolant est une mousse de PE et ceux qui présentent un matériau isolant chimiquement réticulé, c'est-à-dire comprenant un thermodurcissant (PUR/PIR).

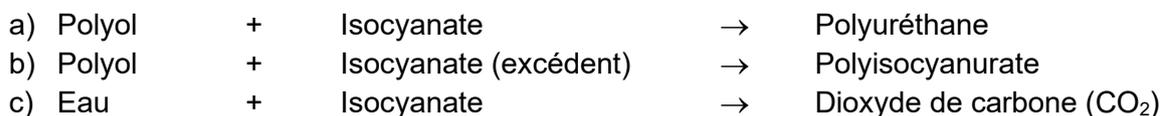
En général, les matériaux isolants en PE sont préfabriqués. Ils sont appliqués autour des tubes médians lors de la fabrication des tuyaux isolés. Les mousses de PE présentent des pores assez larges et les cellules sont relativement grandes. Par ailleurs, la densité des mousses de PE est assez faible. De ce fait, le matériau isolant est peu résistant à la diffusion gazeuse, c'est-à-dire que les gaz cellulaires peuvent facilement atteindre un équilibre avec l'air ambiant. Les cellules contiennent de l'azote et de l'oxygène. Il n'est donc pas possible de modifier spécifiquement la composition gazeuse de la cellule afin de réduire la conductibilité thermique. Les mousses de PE se caractérisent également par le fait qu'elles n'adhèrent ou ne collent pas d'elles-mêmes aux tubes médians. Il n'y a donc pas de liaison par adhérence (système non composite EN15632-3).

Les matériaux isolants thermodurcissables sont généralement des mousses de polyuréthane (PUR) ou de polyisocyanurate (PIR). Ces mousses sont obtenues au cours du processus de production du tuyau isolé à partir d'un mélange à deux composants (2K). Ces matériaux isolants ne sont donc pas préfabriqués. Ils sont obtenus lors de la production par une réaction chimique. Durant la formation de la mousse, celle-ci vient bien enduire les tubes médians, ce qui garantit une bonne adhérence et une liaison résistante. Ces matériaux isolants sont à cellules fermées et présentent une densité plus élevée que les mousses de PE. Le type et la quantité de gaz cellulaires peuvent être impactés de manière ciblée via le processus de production. La diffusion des gaz de l'air dans les pores de la mousse se fait très lentement, ce qui signifie que la composition gazeuse de la cellule permet d'améliorer considérablement l'isolation thermique.

## Systèmes en PUR et PIR thermodurcissables

Les mousses de PUR et de PIR ont pour point commun de se former lorsque les polyols et les isocyanates réagissent entre eux. Il s'agit de termes génériques. En effet, dans la pratique, il existe une grande variété de polyols et d'isocyanates provenant de divers fournisseurs. Par conséquent, il existe un grand nombre de mousses présentant des profils de propriétés différents selon les matières premières utilisées et les proportions.

Pour mieux comprendre cela, les équations chimiques suivantes sont importantes :



La formation de PUR ou de PIR augmente selon la quantité du composant isocyanate utilisée. Pour les systèmes en PIR, il faut plus d'isocyanate (en plus d'autres mesures en ce qui concerne le contrôle de la réaction). L'avantage des systèmes en PIR est leur résistance accrue à la température et leur inflammabilité réduite. Cependant, leur fabrication dans le cadre d'un processus continu se heurte à des obstacles importants.

## Mode d'action d'un agent propulseur chimique

Les polyols employés contiennent toujours une faible quantité d'eau. Ainsi, lors de la formation de mousse de PUR ou de PIR, on assiste toujours à la formation de  $\text{CO}_2$  (voir équation chimique ci-dessus). Le réseau moléculaire du polyuréthane ou du polyisocyanurate se forme simultanément pendant la réaction chimique, et plus cette réaction progresse, plus la mousse durcit. Sous forme gazeuse, le  $\text{CO}_2$  obtenu tend naturellement à s'échapper, c'est pourquoi la masse pas encore complètement solidifiée est gonflée. C'est ainsi que la mousse se forme.

Ce type de moussage grâce au  $\text{CO}_2$  obtenu lors de la réaction est également qualifié d'agent propulseur chimique. On emploie aussi fréquemment le terme de système à eau, car c'est la présence d'eau dans le polyol qui entraîne la formation de  $\text{CO}_2$ .

### Mode d'action d'un agent propulseur physique

Il est possible d'améliorer encore le processus de moussage grâce à des agents propulseurs physiques tout en perfectionnant les propriétés finales de la mousse. À température ambiante, un agent gonflant physique a généralement une forme liquide et il est mélangé aux composants moussants. La réaction chimique génère de la chaleur, ce qui provoque l'évaporation de l'agent propulseur physique à bas point d'ébullition et son passage à l'état gazeux. La masse en réaction, qui n'est pas encore complètement durcie, se gonfle alors pour former une mousse.

Le produit obtenu au terme du processus de production est la mousse finie. Cette mousse est constituée de nombreux petits pores aussi nommés « cellules » dont la matrice polymère constitue la structure. Les cellules contiennent des « gaz cellulaires ». Il s'agit des agents propulseurs physiques ajoutés qui sont à présent emprisonnés dans les cellules, mais aussi du CO<sub>2</sub> formé dans tous les cas, ainsi que, dans une plus petite mesure, des gaz constituant l'essentiel de l'air ambiant, à savoir l'oxygène et l'azote.

### Types d'agents propulseurs physiques

Les agents propulseurs physiques des mousses isolantes sont principalement des hydrocarbures halogénés ou des hydrocarbures simples de faible masse moléculaire.

#### Hydrocarbures halogénés

Après l'invention du CFC-11 par l'américain Thomas Midgley, les hydrocarbures halogénés ont été utilisés pour la première fois en tant que réfrigérants de réfrigérateurs dans les années 1930 <sup>[1]</sup>. Grâce à leur profil de propriétés intéressant, les CFC sont rapidement devenus indispensables dans bon nombre d'applications techniques. Depuis les années 1960, le CFC-11 est également utilisé pour la fabrication de mousses de PUR <sup>[2]</sup>.

La formule indiquée dans le tableau 1, le CFC11, aussi connu sous le nom de Freon11, est un représentant caractéristique de cette classe de substances. Les chlorofluorocarbures se caractérisent par le fait qu'ils sont exclusivement constitués de chlore (Cl), de fluor (F) et de carbone (C) et qu'ils présentent uniquement des liaisons simples, ce qui donne l'acronyme CFC. Les molécules de CFC ne contiennent pas d'hydrogène. L'acronyme allemand FCKW (« Fluorchlorkohlenwasserstoffe » signifiant chlorofluorocarbures) est donc en réalité incorrect, même s'il est communément utilisé.

Une publication parue en 1974 a marqué le début du débat scientifique sur le danger que représentent les CFC, largement utilisés jusqu'alors, pour la couche d'ozone <sup>[5]</sup>. Cela a entraîné une réévaluation de cette classe de substances. Le Protocole de Montréal de 1987 prévoyait une réduction progressive de l'utilisation des CFC <sup>[6]</sup>. De nombreux produits de remplacement ont par conséquent été développés et mis sur le marché en guise d'alternatives.

Substanz- klasse	CFC Chlor Fluor Kohlenstoff	HCFC Hydro Chlor Fluor Kohlenstoff	HFC Hydro Fluor Kohlenstoff	HFO Hydro Fluor Olefin
Typischer Vertreter	CFC-11	HCFC-141b	HFC-245fa	HFO-1336mzz
Struktur- Formel	$\begin{array}{c} \text{Cl} \\   \\ \text{Cl}-\text{C}-\text{F} \\   \\ \text{Cl} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{Cl} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{Cl}-\text{C}-\text{C}-\text{H} \\   \quad   \\ \text{F} \quad \text{H} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \text{F}-\text{C}-\text{C}-\text{F} \\   \quad   \\ \text{F} \quad \text{H} \end{array}$	
ODP	1 [3]	0.11 [3]	0 [3]	2 [4]
GWP	3800 [3]	600 [3]	1430 [3]	8.9 [4]
Lebensdauer an der Atmosphäre	45 Jahre [9]	9.2 Jahre [15]	7.4 Jahre [8]	22 Tage [4]

Substanzklasse	Classe de substances
Typischer Vertreter	Représentant caractéristique
Strukturformel	Formule structurelle
ODP	PDO
GWP	PRG
Lebensdauer an der Atmosphäre	Durée de vie dans l'atmosphère
CFC Chlor Fluor Kohlenstoff	CFC Chlore Fluor Carbone
HCFC Hydro Chlor Fluor Kohlenstoff	HCFC Hydro Chlore Fluor Carbone
HFC Hydro Fluor Kohlenstoff	HFC Hydro Fluor Carbone
HFO Hydro Fluor Olefin	HFO Hydro Fluor Oléfine
45 Jahre	45 ans
9.2 Jahre	9,2 ans
7.4 Jahre	7,4 ans
22 Tage	22 jours

**Tableau 1 :** représentants caractéristiques des hydrocarbures halogénés utilisés comme agents propulseurs.

La capacité d'une substance à endommager la couche d'ozone sous l'effet des rayons UV est qualifiée de potentiel de déplétion ozonique (PDO). Il s'agit d'une valeur relative. Un PDO de 1 a été défini pour le CFC-11. L'objectif initial de l'évolution technique était de trouver des agents propulseurs présentant un PDO bien inférieur à celui des CFC.

Les hydrochlorofluorocarbures (HCFC), qui présentaient des valeurs bien inférieures à 1, ont constitué la première avancée majeure en ce qui concerne le PDO. Pour le HCFC-141b mentionné, la valeur indiquée est de 0,11 <sup>[3]</sup>. Les HCFC se composent d'hydrogène (d'où le H), de chlore, de fluor et de carbone et ils présentent uniquement des liaisons simples.

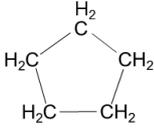
Par la suite ont été développés les hydrofluorocarbures (HFC), constitués uniquement d'hydrogène, de fluor et de carbone et présentant eux aussi des liaisons simples uniquement. Leur PDO est nul, ce qui a permis de résoudre durablement le grave problème environnemental lié à cette classe de substances.

Cependant, les classes de substances décrites jusqu'à présent (CFC, HCFC, HFC) présentent un autre inconvénient commun ; à savoir leur effet en tant que gaz à effet de serre. Cette valeur est connue sous le nom de potentiel de réchauffement global, abrégé par l'acronyme PRG (tiré de l'anglais « Global Warming Potential ») <sup>[7]</sup>. Cette valeur est indiquée par rapport au CO<sub>2</sub> (PRG = 1) et elle concerne tous les ordres de grandeur des hydrocarbures halogénés supérieurs au CO<sub>2</sub>. Ce faisant, la durée de vie atmosphérique est un bon indicateur de la capacité d'une substance à agir comme un gaz à effet de serre. La durée de vie d'une substance dans l'atmosphère indique le temps nécessaire pour que cette substance se décompose naturellement. Des périodes de plusieurs années pouvant aller jusqu'à plusieurs décennies sont classiques pour les classes de substances évoquées, qui ne présentent que des liaisons simples.

Les hydrofluoroléfinés (HFO) représentent la toute dernière innovation en la matière. Ces derniers contiennent au moins une double liaison moléculaire ; c'est ce qu'exprime le terme oléfine. La double liaison est indiquée dans la formule structurale par la double ligne entre les deux atomes de carbone intermédiaires. En outre, elles contiennent au minimum de l'hydrogène, du fluor et du carbone. Sur le plan chimique, cette double liaison est très importante. À cette position dans l'atmosphère, la décomposition de la molécule commence sous l'effet des rayons UV. Enfin, l'eau et l'oxygène attaquent cette double liaison, ce qui réduit la durée de vie de ces substances dans ces conditions (rayons UV, humidité) à quelques jours. Cela empêche tout transport dans les couches supérieures de l'atmosphère, et entraîne une réduction du potentiel de réchauffement global des HFO à zéro.

### Hydrocarbures simples

Les conclusions concernant l'appauvrissement de la couche d'ozone ont eu pour conséquence directe l'emploi d'hydrocarbures de faible masse moléculaire (HC) comme agents propulseurs depuis les années 1980 <sup>[8]</sup>. Ces derniers contiennent uniquement du carbone et de l'hydrogène ; ils sont donc exempts d'halogènes. Jusqu'alors, les avantages techniques de ces substances pour la production de mousse étaient bien connus, mais leur inflammabilité élevée a longtemps empêché leur utilisation technique dans ce secteur. Toutefois, la mise au point des installations adaptées, qui permettent de traiter en toute sécurité les polyols et les isocyanates en présence de HC, a changé la donne en peu de temps. Le tableau 2 présente les candidats possibles et un aperçu des valeurs de conductibilité thermique explique la raison pour laquelle le cyclopentane s'est imposé comme agent propulseur physique pour les mousses de PUR et de PIR. Une fois les investissements dans l'ingénierie système et dans le stockage de l'agent propulseurs réalisés, on dispose d'un agent propulseur présentant une faible conductibilité thermique, mais aussi économique et pour ainsi dire neutre sur le plan écologique.

Substanz	Iso-Butan	Iso-Pentan	N-Pentan	Cyclopentan
Struktur-Formel	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{H}_3\text{C} - \text{C} - \text{CH}_3 \\   \\ \text{H} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{H}_3\text{C} - \text{C} - \text{CH}_2 - \text{CH}_3 \\   \\ \text{H} \end{array}$	$\text{H}_3\text{C} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_3$	
ODP	0 [10]	0 [10]	0 [10]	0 [10]
GWP	11 [10]	11 [10]	11 [10]	11 [10]
Lebensdauer an der Atmosphäre	Wenige Tage [10]	Wenige Tage [10]	Wenige Tage [10]	Wenige Tage [10]
$\lambda$ - Wert [W/m*K]	0.016 @ 25 °C [10]	0.014 @ 25 °C [10]	0.015 @ 25 °C [10]	0.013 @ 25 °C [10]

Substanz	Substance
Strukturformel	Formule structurelle
ODP	PDO
GWP	PRG
Lebensdauer an der Atmosphäre	Durée de vie dans l'atmosphère
$\lambda$ - Wert [W/m*K]	Valeur $\lambda$ [W/m*K]
Iso-Butan	Isobutane
Iso-Pentan	Isopentane
N-Pentan	N-Pentane
Cyclopentan	Cyclopentane
Wenige Tage	Quelques jours

**Tableau 2 :** représentants caractéristiques des hydrocarbures utilisés comme agents propulseurs.

### Comparaison avec les agents propulseurs physiques

Si le cyclopentane est aujourd'hui encore l'agent propulseur standard pour les tuyaux dans le domaine du chauffage à distance, le tableau 3 indique que les HFO représentent actuellement le compromis idéal en matière de disponibilité, de conductibilité thermique, de sécurité écologique et de sécurité de fonctionnement.

La valeur  $\lambda$  très faible du CFC-11 reste donc inégalée, mais celle du HFO donnée en exemple est nettement inférieure à celle du CO<sub>2</sub> ou même du cyclopentane.

Du point de vue des coûts, les systèmes à eau seraient privilégiés, mais les valeurs d'isolation qu'ils permettent d'obtenir ne répondent depuis longtemps plus aux besoins du marché ni aux objectifs d'économies d'énergie (voir la comparaison dans le paragraphe suivant).

Zellgas	$\lambda$ - Wert	ODP	GWP	Kosten	Sonstiges
	[W/m*K]				
CFC11	0.008 @ 25 °C [13]	1 [3]	3800 [3]	Mittel	Nicht mehr zugelassen
HCFC-141b	0.010 @ 25 °C [12]	0.11 [3]	600 [3]	Mittel	Nicht mehr zugelassen
HFC-245fa	0.013 @ 25 °C [11]	0 [3]	1430 [3]	Mittel	Nicht mehr zugelassen
HFO-1336mzz	0.011 @ 25 °C [4]	0 [4]	2.0 [4]	Hoch	Seit Kurzem kommerziell verfügbar
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	0.016 @ 25 °C [9]	0 [9]	1 [9]	0	Hohe Wärmeleitfähigkeit
Cyclopentan	0.013 @ 25 °C [10]	0 [10]	5 [10]	Niedrig	Brennbar
Stickstoff (N <sub>2</sub> )	0.026 @ 20 °C [14]	-	-	-	Aus der Umgebungsluft

Zellgas	Gaz cellulaire
CFC11	CFC11
HCFC-141b	HCFC-141b
HFC-245fa	HFC-245fa
HFO-1336mzz	HFO-1336mzz
Kohlendioxid	Dioxyde de carbone
Cyclopentan	Cyclopentane
Stickstoff	Azote
$\lambda$ - Wert	Valeur $\lambda$
[W/m*K]	[W/m*K]
ODP	PDO
GWP	PRG
Kosten	Coûts
Mittel	Moyens
Hoch	Élevés
Niedrig	Faibles
Sonstiges	Divers
Nicht mehr zugelassen	Plus autorisé
Seit Kurzem kommerziell verfügbar	Disponible sur le marché depuis peu
Hohe Wärmeleitfähigkeit	Conductibilité thermique élevée
Brennbar	Inflammable
Aus der Umgebungsluft	De l'air ambiant

**Tableau 3** : comparaison des agents propulseurs décrits et de leurs gaz cellulaires, y compris leur conductibilité thermique.

## Exigences techniques

Les exigences techniques applicables aux systèmes tubulaires flexibles isolés sont définies dans la famille de normes EN15632. En ce qui concerne les propriétés des tubes médians, de la gaine extérieure et de l'isolation, des exigences minimales quantifiables doivent être respectées. Néanmoins, en ce qui concerne les performances du matériau isolant, sur la méthode de calcul sous-jacente est décrite. Aucune exigence minimale n'est définie. Par conséquent, le pouvoir isolant lui-même sera décrit brièvement ci-après.

## Isolation thermique

La conductibilité thermique est la grandeur physique qui décrit quantitativement une isolation thermique en termes de pouvoir isolant. Elle est abrégée par la lettre grecque  $\lambda$  (lambda). Cette grandeur est exprimée en W/m\*K (ou watts par mètre fois Kelvin). Plus cette valeur  $\lambda$  est faible, plus le matériau conduit mal la chaleur. Pour les tuyaux isolés, cette valeur doit donc être aussi faible que possible.

La conductibilité thermique globale ( $\lambda_{tot}$ ) quant à elle correspond à la somme des composants individuels :

$$\lambda_{tot} = \lambda_{con} + \lambda_{solid} + \lambda_{rad} + \lambda_{gaz} / [W/m*K]$$

Où les abréviations signifient ce qui suit :

$\lambda_{con}$  : la part de la convection

$\lambda_{solid}$  : la conductibilité thermique de la matrice à proprement parler, c'est-à-dire du matériau solide qui entoure les pores

$\lambda_{rad}$  : le rayonnement thermique

$\lambda_{gaz}$  : la conductibilité thermique des gaz cellulaires

La part de la convection ( $\lambda_{con}$ ) est négligeable pour les mousses compte tenu des petits pores.

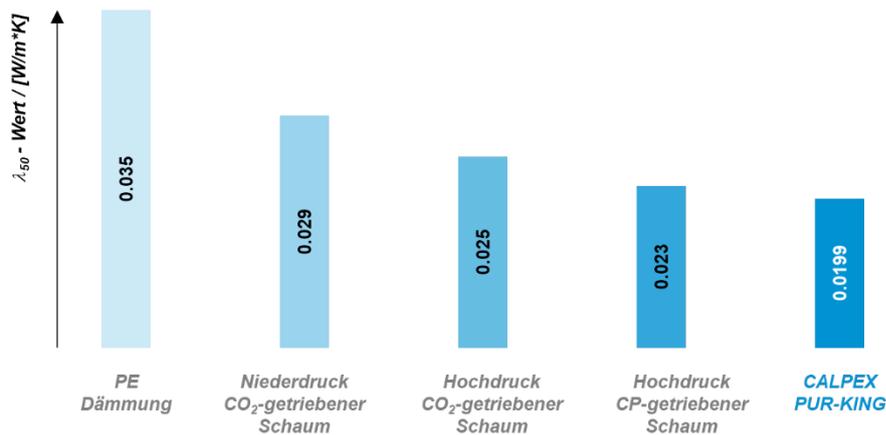
La part de la matrice fixe ( $\lambda_{solid}$ ) peut être réduite pour un matériau donné en réduisant la densité de la mousse. Cependant, cette mesure est très encadrée, car la densité ne peut être pas réduite à volonté pour des raisons de stabilité globale du tube.

La part du rayonnement thermique ( $\lambda_{rad}$ ) peut être impactée dans une certaine mesure, mais cela n'est efficace qu'à des températures élevées.

Dans la pratique, la conductibilité thermique des gaz cellulaires ( $\lambda_{gaz}$ ) et les agents propulseurs employés sont les leviers les plus efficaces pour faire diminuer la  $\lambda_{tot}$ . Les conductibilités thermiques des gaz cellulaires entre eux présentent des différences importantes. C'est aussi la raison pour laquelle les HCFC et HFC halogénés ont par le passé été utilisés comme agents propulseurs physiques dans les mousses de PUR et de PIR jusqu'à ce que leur utilisation soit limitée ou interdite par des dispositions légales.

## Facteurs U sur les tubes isolés

La détermination des facteurs U ou des valeurs  $\lambda$  s'effectue généralement sur un tuyau de diamètre nominal DN 50, car les instruments de mesure sont prévus à cet effet et que ces mesures sont relativement coûteuses. La conductibilité thermique du matériau isolant peut être calculée à l'aide des paramètres géométriques du tuyau. Cette valeur de conductibilité thermique est ensuite employée pour calculer les facteurs U des autres diamètres de tuyaux. Cela suppose bien sûr qu'ils appartiennent à la même série de produits c'est-à-dire que le matériau isolant doit être identique.



$\lambda_{50}$ - Wert / [W/m*K]	Valeur $\lambda_{50}$ /[W/m*K]
PE Dämmung	Isolant en PE
Niederdruck CO <sub>2</sub> -getriebener Schaum	Mousse soufflée au CO <sub>2</sub> basse pression
Hochdruck CO <sub>2</sub> -getriebener Schaum	Mousse soufflée au CO <sub>2</sub> haute pression
Hochdruck CP-getriebener Schaum	Mousse soufflée au CP haute pression
CALPEX PUR-KING	CALPEX PUR-KING

**Illustration 2 :** comparaison des conductibilités thermiques de différents matériaux isolants.

Étant donné que les facteurs U et les valeurs  $\lambda$  elles-mêmes dépendent de la température, la température de mesure doit impérativement être indiquée dans leur spécification. Dans le bâtiment, on parle généralement d'une température de 10 °C, et dans le chauffage à distance de 50 °C. En règle générale, une augmentation de la température de mesure de 10 °C entraîne une augmentation de la valeur  $\lambda$  de 0,001 W/m\*K.

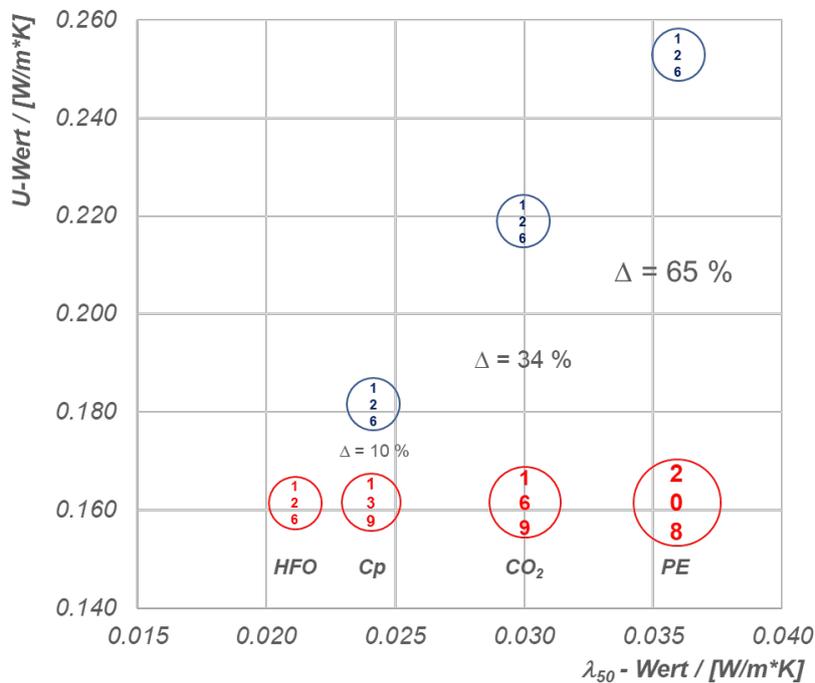
Voir l'exemple suivant :

- Tuyau isolé à paroi lisse avec un tube médian centré
- Diamètre extérieur du tube médian = 63 mm
- Épaisseur de mur du tube médian = 5,8 mm
- Épaisseur de paroi de la gaine en PE = 2,5 mm
- Conductibilité du tube médian = 0,38 W/m\*K @ 50 °C
- Conductibilité de la gaine en PE = 0,33 W/m\*K @ 50 °C
- Conductibilité de l'isolant en PE = 0,035 W/m\*K @ 50 °C

- h) Conductivité de la mousse de PUR soufflée au CO<sub>2</sub> (basse pression) = 0,029 W/m\*K @ 50 °C
- i) Conductivité de la mousse de PUR soufflée au CO<sub>2</sub> (haute pression) = 0,029 W/m\*K @ 50 °C
- j) Conductivité de la mousse de PUR soufflée au cyclopentane (CP) = 0,023 W/m\*K @ 50 °C
- k) Conductivité de la mousse de PUR soufflée au HFO (PUR-KING) = 0,0199 W/m\*K @ 50 °C

La conductivité de la mousse de PUR soufflée au HFO a été obtenue comme valeur moyenne d'un total de dix mesures individuelles auprès d'un institut accrédité.

L'illustration 1 présente les facteurs U calculés à l'aide de ces informations. Les facteurs U pour un diamètre extérieur de 126 mm avec le matériau isolant donné sont indiqués en bleu. Il est maintenant possible d'obtenir facilement un facteur U avec n'importe quel matériau, comme le tube de référence, qui possède une isolation en mousse de PUR soufflée au HFO. Cependant, cela ne peut être effectué qu'en augmentant considérablement le diamètre extérieur, c'est-à-dire l'épaisseur de la couche isolante. Par exemple, le diamètre du tuyau isolé en PE devrait être augmenté pour atteindre 208 mm, soit une augmentation de 65 %.



U-Wert / [W/m²K]	Facteur U/[W/m²K]
HFO	HFO
Cp	CP
PE	PE
λ <sub>50</sub> - Wert / [W/m²K]	Valeur λ <sub>50</sub> /[W/m²K]

**Illustration 1 :** facteurs U pour des tuyaux avec différents matériaux isolants et diamètre extérieur nécessaire pour atteindre avec ces derniers le même facteur U que le tuyau de référence isolé au HFO.

L'une des conséquences de cette mesure est l'augmentation de la quantité de matériel nécessaire pour la fabrication des tuyaux. En effet, un volume plus important doit être rempli avec le matériau isolant et une quantité plus élevée de PE doit être appliquée pour la gaine extérieure.

L'autre inconvénient de l'augmentation du diamètre extérieur est la réduction de la longueur de bague. Bien que la longueur des tuyaux puisse généralement être adaptée aux besoins des clients, les rayons d'enroulement réalisables augmentent à mesure que le diamètre extérieur progresse. En fin de compte, les diamètres extérieurs des collets annulaires qui en résultent sont le facteur limitant, car le transport standard par camion n'est assuré que jusqu'à xx m de diamètre.

Le PUR étant la technologie d'isolation la plus compacte dans le domaine du chauffage à distance, les plus grandes longueurs de livraison peuvent être atteintes et les coûts de transport peuvent être considérablement réduits (tableau 4).

<b>Diamètre</b>	<b>Longueur de bague</b> *	<b>Rayons de courbure</b>	<b>Poids</b>
<b>[mm]</b>	<b>[m]</b>	<b>[m]</b>	<b>[kg]</b>
<b>76</b>	1 000	0,45	900
<b>91</b>	715	0,55	858
<b>111</b>	450	0,60	630
<b>126</b>	291	0,65	698
<b>142</b>	260	0,70	806
<b>162</b>	149	0,90	671
<b>182</b>	86	1,10	620
<b>202</b>	80	1,40	672

**Tableau 4 :** longueurs de bague et rayons de courbure réalisables pour les tuyaux en plastique flexibles en fonction du diamètre extérieur du tuyau. \* Valable pour un diamètre extérieur de bague de 2,8 m.

### Étanchéité longitudinale

En ce qui concerne les systèmes tubulaires isolés flexibles avec tubes médians en plastique, la norme EN15632-1 distingue les tubes composites et les tubes non composites.

Dans le cas des tubes composites, le matériau isolant crée une liaison par adhérence avec les tubes médians et la gaine extérieure. Compte tenu du fait que le matériau isolant est initialement généré à partir d'un mélange 2K lors de la fabrication des tuyaux isolés, il adhère aux tubes médians. La liaison avec la gaine extérieure est obtenue grâce au fait que le film sur lequel le mélange 2K est transporté se fond avec elle dès qu'il est extrudé dessus. En principe, les tuyaux ainsi isolés présentent une étanchéité longitudinale d'après la norme EN15632-2 alinéa 6.4. L'adhérence à proprement parler est également spécifiée par la définition d'une valeur minimale de résistance au cisaillement axial.

En ce qui concerne les tubes non composites, l'isolation est, dans une certaine mesure, seulement enroulée sur les tubes intérieurs. Il n'y a donc pas de liaison par adhérence. Par conséquent, il n'est guère possible de satisfaire aux exigences d'étanchéité longitudinale et la résistance au cisaillement axial n'est pas requise. Afin d'éviter que l'humidité qui a pu pénétrer ne se répande dans l'ensemble du système tubulaire, il faut prévoir des éléments de construction spéciaux au niveau des manchons. Ces derniers peuvent ultérieurement stopper l'humidité à ces emplacements.

Autre inconvénient des tubes non composites : les tubes médians peuvent se déplacer plus ou moins librement ; ils peuvent donc être éjectés.

## Résumé

En termes de performances techniques, les matériaux isolants à base de mousse de PUR représentent à ce jour la solution idéale dans le domaine du chauffage à proximité/distance. L'utilisation des technologies les plus modernes permet d'obtenir des valeurs de conductibilité thermique faibles. Il en résulte de faibles facteurs U associés à des diamètres extérieurs réduits. Des diamètres extérieurs réduits impliquent une diminution de l'espace requis. Cela simplifie d'une part la pose des tuyaux dans les tranchées, et entraîne d'autre part une augmentation de la longueur des bobines enroulées, ce qui permet de transporter une quantité de tubes plus importante par unité de volume, réduisant ainsi les coûts logistiques.

Par ailleurs, le processus de production avec système 2K réactif garantit que la mousse forme une liaison solide avec les tubes intérieurs. L'utilisation d'agents propulseurs issus de la classe de substances des HFO constitue le développement le plus récent. Cela permet de réduire encore davantage les facteurs U tout en conservant les mêmes diamètres extérieurs.

## Bibliographie

- [1] Brevet GB357263A.
- [2] Randall, D and Lee, S., *The Huntsman polyurethanes handbook* (Guide des polyuréthanes Huntsman), John Wiley & Sons, 2002, ISBN 0-470-85041-8, p. 127.
- [3] Base de données de l'assurance accidents obligatoire allemande, consultable à l'adresse suivante : [www.gestis.itrust.de](http://www.gestis.itrust.de)
- [4] Fiche technique de la société Chemours, consultable à l'adresse suivante : [https://www.chemours.com/Formacel/en\\_US/assets/downloads/opteon-1100-product-information.pdf](https://www.chemours.com/Formacel/en_US/assets/downloads/opteon-1100-product-information.pdf)
- [5] Molina, M. J., Rowland, F. S., *Nature*, 1974 (249), 810.
- [6] Traduction française du Protocole de Montréal, consultable à l'adresse suivante : <https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/19870179/201901010000/0.814.021.pdf>
- [7] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Potentiel\\_de\\_r%C3%A9chauffement\\_global](https://fr.wikipedia.org/wiki/Potentiel_de_r%C3%A9chauffement_global)
- [8] Randall, D and Lee, S., *The Huntsman polyurethanes handbook* (Guide des polyuréthanes Huntsman), John Wiley & Sons, 2002, ISBN 0-470-85041-8, p. 133.
- [9] Randall, D and Lee, S., *The Huntsman polyurethanes handbook* (Guide des polyuréthanes Huntsman), John Wiley & Sons, 2002, ISBN 0-470-85041-8, p. 131.
- [10] Randall, D and Lee, S., *The Huntsman polyurethanes handbook* (Guide des polyuréthanes Huntsman), John Wiley & Sons, 2002, ISBN 0-470-85041-8, p. 134.
- [11] Wang et. al., *J. Chem. Eng. Data* (Journal des données chimiques et techniques), 2006 (51), 1424.
- [12] Klempner, D. and Sendjarevic, V., *Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology* (Guide des mousses de polymères et des technologies de conception de mousses), Hanser, 2004, p. 545.
- [13] Perkins, R. et. al., *J. Chem. Eng. Data* (Journal des données chimiques et techniques), 2001 (46), 428.
- [14] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), *VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang* (Guide des dégagements calorifiques selon la norme VDI, Feuille de calcul pour le transfert de thermique), ISBN 3-18-401362-6, VDI Verlag, 7. Auflage, Düsseldorf 1994, ISBN 3-18-401362-6, p. Db29.
- [15] Randall, D and Lee, S., *The Huntsman polyurethanes handbook* (Guide des polyuréthanes Huntsman), John Wiley & Sons, 2002, ISBN 0-470-85041-8, p. 132.