

Version Française

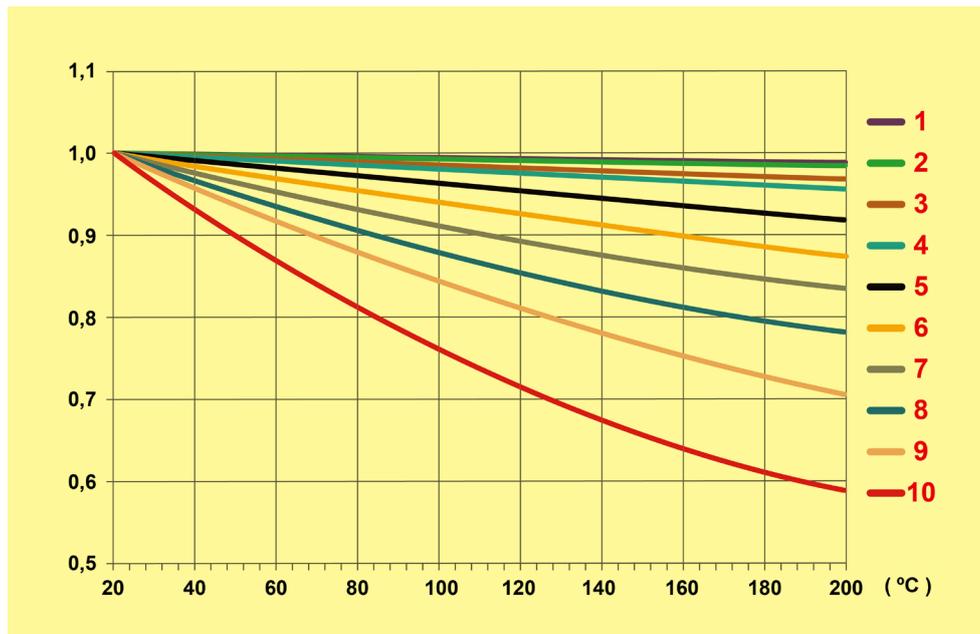


Jacques Jumeau

Technologie des composants utilisés dans le chauffage.

Chapitre 47

Introduction technique aux éléments chauffants flexibles en silicone

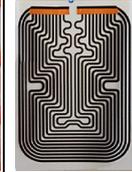
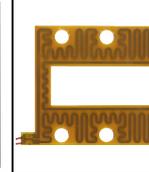


Avec l'arrivée sur le marché de nombreux constructeurs et la propagation de ventes par internet sans aucunes spécifications techniques, sont apparus de nombreux produits, simples copies visuelles, sans aucune validation technique, et dont l'achat de fait le plus souvent au vu de photographies et d'un prix. Nous souhaitons, par cette introduction technique, démontrer que notre recherche permanente de perfectionnement et d'outils technologiques modernes est le seul moyen de fournir à notre clientèle **professionnelle** des solutions **fiables et durables**, tenant compte des multiples pièges techniques des éléments flexibles en silicone. **Rien** dans la conception de nos appareils n'a été laissé au hasard ou à l'approximation. Sauf indication contraire, tous les essais ont été réalisés dans le laboratoire Ultimheat. Ultimheat est certifié **ISO 9000-2015** et **ISO 14000-2015** (les dernières versions existantes). C'est aussi une entreprise certifiée de Haute Technologie.

Sommaire de l'introduction technique

1- Comparaison des différentes technologies des éléments chauffants flexibles.....	7
2- Le réchauffage des fûts.....	7
2- 1. Dimensions normalisées des fûts.....	9
Dimensions usuelles des fûts métalliques.....	9
2- 2. Le réchauffage de fûts métalliques par des ceintures chauffantes	10
Le temps de réchauffage des fûts.....	10
Surchauffe des ceintures chauffantes installées sur des fûts vides	10
Exemples pratiques comparatifs de réchauffage de fûts par des ceintures chauffantes flexibles en silicone.....	11
Comparaison des temps de chauffe nécessaires en fonction de différents liquides couramment réchauffés par des ceintures chauffantes silicone	14
3- Le réchauffage des tuyauteries.	15
3- 1. Température de surface des tuyauteries.....	15
Résultats des essais sur des tubes en acier inoxydable	16
Résultats des essais sur des tubes en acier galvanisé	17
Résultats des essais sur des tubes en PVC-U.....	18
4- Réchauffage de parois avec des éléments chauffants flexibles en silicone.....	19
4- 1. Température de surface de parois en fonction de la puissance surfacique	19
Mesures sur des résistances chauffantes dans l'air	19
Mesures sur des résistances chauffantes installées sur des parois métalliques non immergées.....	20
5- Paramètres de construction des résistances souples en silicone.....	21
5- 1. Paramètres généraux.....	21
Quelques méthodes modernes de formage de fils chauffants pour les résistances souples en silicone.....	21
5- 2. Utilisation des fils résistifs à coefficient de température positif, nul ou négatif, et en conséquence, la variation de la puissance en fonction de la température.....	22
5- 3. Conception du support en feuilles de silicone armé fibres de verre	23
5- 4. Habillage des parois des résistance silicones	23
5- 5. Résistance mécanique des éléments chauffants souples en silicone	24
Résistance au déchirement	24
Allongement sous contrainte permanente (Fluage).....	25
Résistance à l'arrachage des crochets de montage.....	26
Résistance à la séparation des différentes couches vulcanisées	27
Résistance à la flexion	27
Résistance à l'arrachement des boîtiers de protection silicone des thermostats, limiteurs, capteurs de température.	28
Comparaison des différentes techniques de vulcanisation et colles utilisées pour la fixation des capuchons silicone sur des surfaces chauffantes souples en silicone.....	28
5- 6. Méthodes de raccordement des fils, câbles, capteurs de température et thermostats	29
Raccordement de fils sur résistance chauffante souples en silicone (IP54)...	30
Raccordement de câble et de limiteur de température sur résistances chauffantes souples en silicone (IP65).....	31
Raccordement de câble et de capteur de température sur résistances chauffantes souples en silicone (IP65)	32
Raccordement de câble et de thermostat bimétallique réglable sur résistance chauffante souples en silicone (IP54).....	32
Raccordement de câble et de thermostat réglable à bulbe et capillaire sur résistance chauffante souples en silicone (IP54).....	32
5- 7. Paramètres d'isolation électrique des éléments chauffants flexibles en silicone.....	33
Résistance d'isolement à froid.....	33
Tension de claquage à froid	33
Courant de fuite à la température d'utilisation	34
5- 8. Conformité Rohs et Reach.....	34

1: Comparaison des différentes technologies de résistances chauffantes flexibles*

	Tissus chauffants	Résistances flexibles en silicone			Résistances sous films	
Modèles	1 Conducteur chauffant incorporé dans le tissu	2 Conducteur chauffant en Zig-Zag	3 Conducteur chauffant spiralé autour d'une âme isolante et vulcanisé dans du silicone	4 Réseau chauffant obtenu par découpe chimique d'une fine feuille métallique et vulcanisé dans un élastomère	5 Réseau chauffant imprimé en sérigraphie sur un film isolant	6 Réseau chauffant obtenu par découpe chimique d'une fine feuille métallique et collé sur un film isolant
Illustration						
Plage de température	Valeurs usuelles : -20+120°C. Ces valeurs dépendent du tissu utilisé et de l'âme du fil chauffant. Elles vont de -20+120°C pour du PA66 à -60+250°C pour la fibre de verre ou l'aramide.	-60°C à 230°C.	-60°C à 230°C.	-60°C à 230°C.	-20+80°C. La résistance en température dépend principalement de la nature de l'encre résistive utilisée. Les films supports peuvent être en PVC, PET et même en polyimide. Puissance surfacique limitée à 0.2W/cm²	Valeurs usuelles : -60+230°C. Ces valeurs dépendent de la matière du film isolant et de l'adhésif utilisé. Les films peuvent être en PET (température maximale 120°C) ou en Kapton (température maximale de 230°C en raison des adhésifs)
Flexibilité	Bonne résistance au pliage et aux flexions répétées	Résistance limitée au pliage et flexions répétées	La meilleure résistance aux flexions répétées	Utilisation en applications statiques uniquement en raison de la faible résistance à la flexion du réseau métallique	Très faible résistance des encres à la flexion	Utilisation en applications statiques uniquement en raison de la faible résistance à la flexion du réseau métallique
Utilisations	Manteaux chauffants industriels. Couvertures chauffantes domestiques et industrielles, tapis chauffant. Vêtements chauffants	Résistances flexibles en silicone pour usages industriels. Applications en faibles quantités.	Résistances flexibles en silicone pour usages industriels. Applications en faibles quantités.	La plupart des applications industrielles et commerciales en quantités importantes demandant une bonne résistance en température et une forte charge surfacique	Applications à bas prix et faible tenue en températures élevées, par exemple réchauffage des rétroviseurs et des sièges chauffants automobiles	Applications requérant une faible masse ou une mise en température rapide. Très large gamme de température grâce à l'utilisation du Kapton

Introduction technique aux éléments chauffants flexibles en silicone

	Tissus chauffants	Résistances flexibles en silicone			Résistances sous films	
Modèles	1 Conducteur chauffant incorporé dans le tissu	2 Conducteur chauffant en Zig-Zag	3 Conducteur chauffant spiralé autour d'une âme isolante et vulcanisé dans du silicone	4 Réseau chauffant obtenu par découpe chimique d'une fine feuille métallique et vulcanisé dans un élastomère	5 Réseau chauffant imprimé en sérigraphie sur un film isolant	6 Réseau chauffant obtenu par découpe chimique d'une fine feuille métallique et collé sur un film isolant
Technologie	<p>La technologie la plus ancienne qui remonte à la fin du 19ème siècle. Le conducteur résistif est enroulé autour d'un noyau en fibre de verre ou en aramide. (C'était de l'amiante jusqu'il y a 50 ans). Ensuite, l'élément chauffant plat peut être fabriqué en utilisant 2 solutions techniques :</p> <p>1 / - Fabrication d'un tissu chauffant dont les fils de chaîne sont en fibre de verre, coton, aramide ou polyimide et les fils de trame sont constitués de ces fils chauffants bobinés</p> <p>2 / - Par couture des fils sur un tissu. Cette solution permet d'utiliser des fils avec une isolation primaire en silicone ou en FEP. Ensuite, l'isolant primaire peut recevoir une tresse métallique pour la mise à la terre. C'est l'unique moyen de produire des chauffages flexibles avec une tresse de mise à la terre, ce qui est demandé dans certaines applications industrielles.</p>	<p>Le conducteur résistif est formé en zig-zag plat et assemblé en réseau. Cette technologie produit des éléments chauffants sans augmentation notable d'épaisseur, similaires aux modèles obtenus par gravure chimique. C'est la solution la moins chère pour les petites quantités, (Technologie brevetée par Ultimheat)</p>	<p>Le conducteur résistif est enroulé autour d'un noyau en fibre de verre ou en polyimide. Ensuite, le réseau chauffant est déposée à la main sur le silicone non vulcanisé. Ensuite, la bande chauffante est vulcanisée entre 2 feuilles de caoutchouc de silicone renforcé de fibre de verre. En raison du processus d'assemblage long et fastidieux, ces éléments chauffants ne conviennent que pour de petites quantités. Dans une nouvelle technologie brevetée par Ultimheat, le réseau des conducteurs chauffants bobinés est conçu par ordinateur, et automatiquement intégré au support avant la vulcanisation. Cela permet une production entièrement automatisée et des applications à grand volume.</p>	<p>La bande conductrice de l'élément chauffant est constituée d'une mince feuille métallique gravée chimiquement avec une technologie similaire au traitement des circuits imprimés. Ensuite, cette bande métallique peut être vulcanisée entre 2 feuilles souples et isolantes. Les feuilles peuvent être faites de n'importe quel type de caoutchouc ou d'élastomères. En raison des larges pistes, d'un espacement moindre entre les éléments et d'un meilleur transfert de chaleur, la densité de puissance peut être jusqu'à 2 fois supérieure à celle des modèles à enroulement filaire classiques. Ils conviennent aux moyennes et grandes quantités.</p>	<p>Les films chauffants à couche épaisse sont réalisés par sérigraphie d'encres conductrices et résistives. Ces encres sont imprimées sur un substrat flexible. Ils peuvent être produits en utilisant une encre autorégulante en température, ou en tant que dispositif de chauffage à puissance fixe.</p>	<p>Les éléments chauffants flexibles en Kapton sont fabriqués avec une feuille métallique mince comme élément de résistance. Le modèle de résistance est conçu par ordinateur et transféré sur la feuille selon un processus similaire à celui utilisé pour la fabrication des circuits imprimés. La feuille métallique est ensuite fixée par laminage et collage sur le substrat isolant (Adhésif de type FEP ou acrylique). La compound feuille métallique et substrat est ensuite traitée à l'acide pour produire l'élément chauffant gravé. La couche supérieure est ensuite ajoutée et laminée avec un adhésif comme pour le premier côté. L'élément chauffant flexible en polyimide offre une stabilité dimensionnelle et une résistance à la traction élevée. Il est également résistant à la plupart des produits chimiques. (Kapton est une marque déposée de Dupont pour le polyimide).</p>

*Les modèles 1, 2, 3, 4 sont fabriqués par Ultimheat.

2- Le réchauffage des fûts

2-1. Dimensions normalisées des fûts

Une des applications les plus courantes des résistances chauffantes souples en silicone est le réchauffage des fûts. Il est donc nécessaire d'en préciser les dimensions théoriques et pratiques.

Le plus courant, le fût de 200 litres (connu sous le nom de fût de 55 gallons aux États-Unis et de 44 gallons au Royaume-Uni) est un récipient cylindrique d'une capacité nominale de 200 litres (55 US ou 44 gal). La capacité exacte peut varier selon le fabricant, l'application ou d'autres paramètres. Les fûts standard ont des dimensions intérieures de 572 millimètres (22,5 pouces) de diamètre et 851 millimètres (33,5 pouces) de hauteur intérieure. Ces dimensions donnent un volume d'environ 218,7 litres (57,8 gallons US ; 48,1 gal anglais), mais les fûts sont couramment remplis jusqu'à environ 200 litres.

Les dimensions extérieures sont typiquement de 584 mm (23 pouces) de diamètre au niveau des sertissages supérieurs et inférieurs, de 597 mm (23,5 pouces) de diamètre sur les nervures autour du fût et de 876 mm (34,5 pouces) de hauteur.

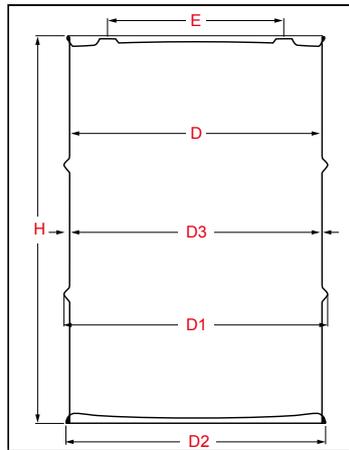
Les dimensions extérieures sont identiques à quelques millimètres près dans les versions US et ISO. Les diamètres nominaux des filetages des bords situés sur le couvercle supérieure sont identiques, mais différent par le pas utilisé :

Selon la norme américaine ANSI MH2, les filetages sont de type NPT.

Selon la norme internationale ISO 15750 les filetages sont de type G2" et G3/4" (norme ISO 228-1)

Cette disposition se retrouve dans de nombreux fûts en plastique de la même taille. Divers composants peuvent être montés sur le fût par ces orifices, tels que des pompes et des mélangeurs.

Dimensions usuelles des fûts métalliques



Volume Litres (Gallons)	Hauteur totale H en mm ± 6.4 (en pouces $\pm 1/4$)	Diamètre intérieur D en mm ± 3.2 (en pouces $\pm 1/8$)	Diamètre sur nervures D1 en mm ± 3.2 (en pouces $\pm 1/8$)	Diamètre sur sertissage D2 en mm ± 3.2 (en pouces $\pm 1/8$)	Diamètre extérieur hors nervures D3 en mm ± 3.2 (en pouces $\pm 1/8$)	Entre axe des bords E en mm (pouces)	Nombre de nervure
19-20 (5)	283 (11-1/8)	356 (14)	371 (14-5/8)	363 (14-5/16)	359 (14-1/8)	210 (8-1/4)	2
30 (8)	412 (16-1/4)	356 (14)	371 (14-5/8)	363 (14-5/16)	359 (14-1/8)	210 (8-1/4)	2
38 (10)	489 (19-1/4)	356 (14)	371 (14-5/8)	363 (14-5/16)	359 (14-1/8)	210 (8-1/4)	2
60 (16)	733 (28-7/8)	356 (14)	371 (14-5/8)	363 (14-5/16)	359 (14-1/8)	210 (8-1/4)	2
75 (20)	552 (21-3/4)	463 (18-1/4)	486 (19-1/8)	475 (18-11/16)	466 (18-3/8)	343 (13-1/2)	2
110/120 (30)	749 (29-1/2)	463 (18-1/4)	486 (19-1/8)	475 (18-11/16)	466 (18-3/8)	343 (13-1/2)	2
200/220 (55)	878 (34-1/2)	572 (22-1/2)	593 (23-3/8)	586 (23-1/16)	574 (22-5/8)	444 (17-1/2)	2

Pour les ceintures chauffantes en silicone, c'est le diamètre D3 qui doit être pris en compte. En aucun cas la ceinture chauffante ne doit s'appliquer sur les diamètres D1 ou D2

2-2. Le réchauffage de fûts métalliques par des ceintures chauffantes

Le temps de réchauffage des fûts

C'est la question la plus fréquente : Combien de temps faudra-t-il pour réchauffer un fût.

Une première approche doit tenir compte d'un certain nombre de paramètres critiques, et les principaux sont :

1-Le volume total chauffé.

Pour une puissance donnée un grand volume chauffera moins vite qu'un petit volume

2-La puissance totale appliquée.

Une puissance plus importante chauffera en principe plus vite

3-La répartition de la puissance.

Un chauffage réparti sur toute la masse ou sur toutes les parois chauffera plus vite qu'un chauffage localisé sur une faible surface du réservoir

4-La conductibilité thermique du liquide.

Plus le liquide a une conductibilité thermique importante, plus vite la chaleur se transmet à la totalité de la masse

5-La capacité calorifique du liquide.

La capacité calorifique représentant l'énergie qu'il faut appliquer à une masse de liquide pour l'échauffer, les liquides avec une capacité calorifique faible chaufferont, à puissance égale, plus vite que ceux avec une capacité calorifique élevée

6-La viscosité cinématique (ν) du liquide.

Plus un liquide est visqueux, moins il y a de courants de convection. Donc l'énergie calorifique s'y transmet moins vite. Il peut être nécessaire dans certains cas d'ajouter un appareil de brassage pour des produits visqueux peu conducteurs.

7-L'isolation thermique.

En éliminant les pertes thermiques vers l'extérieur, on concentre l'énergie calorifique sur le réservoir. Un réservoir isolé chauffera donc plus vite. Il existe des manteaux isolants prévus pour toutes les tailles de fûts.

8-Le type de régulation de température.

Une régulation de température de type PID réduit la puissance fournie au réservoir à proximité du point de consigne, en conséquence la durée de chauffage est augmentée mais les surchauffes habituelles des systèmes de régulation tout-ou-rien sont supprimées. Un mauvais positionnement du point de mesure de la température, par exemple au milieu du liquide réchauffé, augmente le risque de surchauffe des parois, en raison du temps mis par l'énergie calorifique à atteindre cet emplacement central.

9- Les sécurités thermiques.

Lorsque des sécurités thermiques sont installées dans les systèmes de chauffage, elles limitent la température atteinte par l'élément chauffant afin d'éviter sa destruction par surchauffe. Cette limitation peut augmenter la durée du chauffage, en particulier lorsque les échanges thermiques avec le liquide sont mauvais, en raison de sa conductibilité thermique ou de sa viscosité.

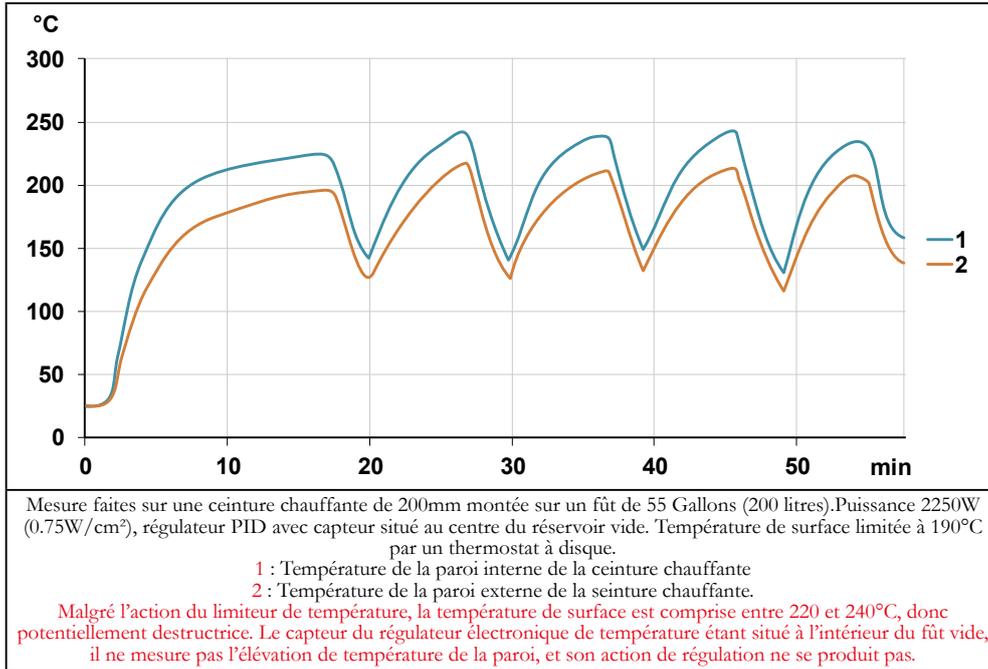
10-La surface de chauffage.

Les ceintures chauffantes silicone ne couvrent qu'une faible partie de la surface des réservoirs. Le chauffage se fait donc par conduction thermique de cette surface entre la paroi et le produit réchauffé, et l'homogénéité de la température est longue à se faire. On, chaque fois que c'est possible, la surface de la ceinture chauffante doit être choisie pour recouvrir la plus grande surface possible.

Surchauffe des ceintures chauffantes installées sur des fûts vides

Nous déconseillons fortement cette utilisation, car les températures de paroi atteintes sont quasiment toujours supérieures la température de destruction de ceinture en silicone. Si malgré tout l'application comporte cette possibilité, nous recommandons l'usage d'un système de contrôle de température de la surface (par exemple limiteur à 190°C), en plus de la régulation par thermostat électronique ou mécanique, et une limitation de la puissance surfacique à 0.75W/cm²

Introduction technique aux éléments chauffants flexibles en silicone

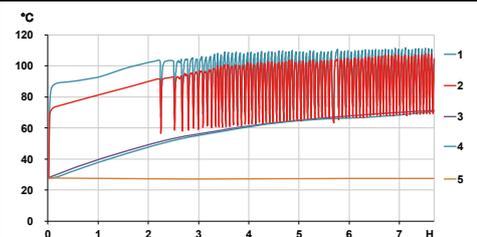


Exemples pratiques comparatifs de réchauffage de fûts par des ceintures chauffantes flexibles en silicone

Régulation de température par thermostat mécanique à bulbe et capillaire monté en surface. La valeur de consigne de 90°C a été sélectionnée pour éviter de porter l'eau à ébullition. (Sans limiteur de température de surface)

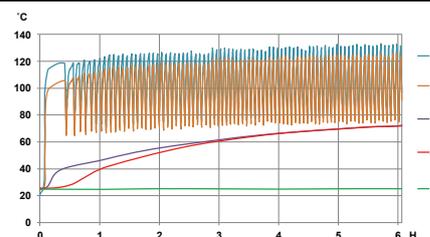


Variation de la température dans le temps de la température d'un fût métallique de 220 litres, rempli d'eau, réchauffé par une ceinture chauffante silicone de largeur 200mm, sans isolation thermique, de puissance 2250W (charge surfacique $0.75\text{W}/\text{cm}^2$).



1: Température de la paroi du réservoir sous la résistance chauffante
2 : Température de la surface extérieure de la ceinture silicone
3: Température de l'eau, au centre du diamètre, à 50mm de la paroi supérieure
4: Température de l'huile au centre du diamètre, à mi hauteur
5: Température de l'huile, au centre du diamètre, à 50mm du fond

Variation de la température dans le temps de la température d'un fût métallique de 220 litres, rempli d'huile hydraulique HF 24-6, réchauffé par une ceinture chauffante silicone de largeur 200mm, sans isolation thermique, de puissance 2250W (charge surfacique $0.75\text{W}/\text{cm}^2$).



1: Température de la paroi du réservoir sous la résistance chauffante
2 : Température de la surface extérieure de la ceinture silicone
3: Température de l'huile, au centre du diamètre, à 50mm de la paroi supérieure
4: Température de l'huile au centre du diamètre, à mi hauteur
5: Température de l'huile, au centre du diamètre, à 50mm du fond

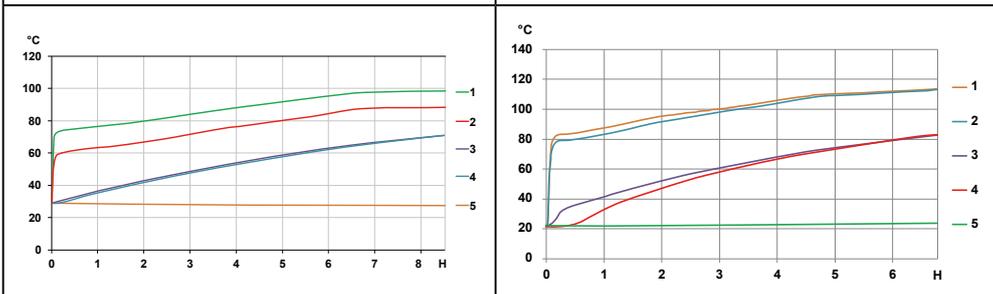
Introduction technique aux éléments chauffants flexibles en silicone

<p>Analyse des résultats : On remarque dans ces essais que la différence de température entre le milieu et le dessus du réservoir est quasiment nulle. Le fond du réservoir ne se réchauffe pas. Le temps de chauffe est de 7h30 minutes pour que la température du liquide au niveau de la ceinture chauffante atteigne 70°C. Le fonctionnement du thermostat réglé à 90°C se traduit par de larges oscillations de température au niveau des parois de la ceinture chauffante</p> <p style="color: red;">L'efficacité énergétique est très faible (35%) comparée aux manteaux chauffants isolés qui peuvent atteindre 85 à 90%</p>	<p>Analyse des résultats : On remarque dans ces essais que la différence de température entre le milieu et le dessus du réservoir devient rapidement égale. Le fond du réservoir ne se réchauffe pas. Le temps de chauffe est de 5h pour que la température du liquide au niveau de la ceinture chauffante atteigne 70°C. Le fonctionnement du thermostat réglé à 90°C se traduit par de larges oscillations de température au niveau des parois de la ceinture chauffante, avec des valeurs maximales pouvant atteindre 130°C</p> <p style="color: red;">L'efficacité énergétique est très faible (32%) comparée aux manteaux chauffants isolés qui peuvent atteindre 85 à 90%</p>
---	--

Chauffage avec régulation électronique à distance, par régulateur à action PID, point de consigne réglé à 90°C, capteur Pt100 monté en surface de la ceinture chauffante. (Sans limiteur de température de surface)



<p>Variation de la température dans le temps de la température d'un fût métallique de 220 litres, rempli d'eau, réchauffé par une ceinture chauffante silicone de largeur 200mm, sans isolation thermique, de puissance 1500W (charge surfacique 0.5W/cm²).</p>	<p>Variation de la température dans le temps de la température d'un fût métallique de 220 litres, rempli d'huile hydraulique HF 24-6, réchauffé par une ceinture chauffante silicone de largeur 200mm, sans isolation thermique, de puissance 1500W (charge surfacique 0.5W/cm²).</p>
---	---



- | | |
|---|---|
| <p>1: Température de la paroi du réservoir sous la résistance chauffante</p> <p>2: Température de la surface extérieure de la ceinture silicone</p> <p>3: Température de l'eau, au centre du diamètre, à 50mm de la paroi supérieure</p> <p>4: Température de l'eau au centre du diamètre, à mi hauteur</p> <p>5: Température de l'eau, au centre du diamètre, à 50mm du fond</p> | <p>1: Température de la paroi du réservoir sous la résistance chauffante</p> <p>2: Température de la surface extérieure de la ceinture silicone</p> <p>3: Température de l'huile, au centre du diamètre, à 50mm de la paroi supérieure</p> <p>4: Température de l'huile au centre du diamètre, à mi hauteur</p> <p>5: Température de l'huile, au centre du diamètre, à 50mm du fond</p> |
|---|---|

<p>Analyse des résultats : On remarque dans ces essais que la différence de température entre le milieu et le dessus du réservoir est quasiment nulle. Le fond du réservoir ne se réchauffe pas. Le temps de chauffe est de 8h30 minutes pour que la température du liquide au niveau de la ceinture chauffante atteigne 70°C.</p> <p style="color: red;">L'efficacité énergétique est très faible (30%) comparée aux manteaux chauffants isolés qui peuvent atteindre 85 à 90%</p>	<p>Analyse des résultats : On remarque dans ces essais que la différence de température entre le milieu et le dessus du réservoir est quasiment nulle. Le fond du réservoir ne se réchauffe pas. Le temps de chauffe est de 4h30 minutes pour que la température du liquide au niveau de la ceinture chauffante atteigne 70°C. Par rapport au réchauffage de l'eau dans les mêmes conditions, le gain de temps est important (rapport de 0.55).</p> <p style="color: red;">L'efficacité énergétique est très faible (30%) comparée aux manteaux chauffants isolés qui peuvent atteindre 85 à 90%</p>
--	---

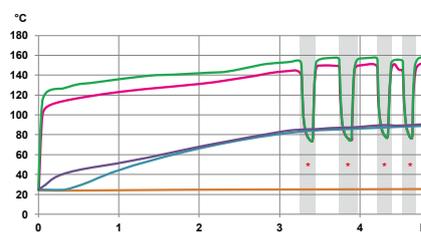
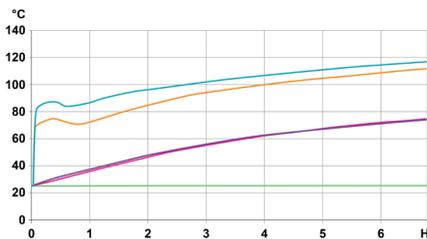
Introduction technique aux éléments chauffants flexibles en silicone

Chauffage avec régulation électronique à distance, par régulateur à action PID, capteur Pt100 immergé au centre du réservoir, température de surface de la ceinture chauffante protégé par un limiteur de température à disque bimétallique réglé à 190°C, pour éviter la destruction de l'élément chauffant par surchauffe.



Variation de la température dans le temps de la température d'un fût métallique de 220 litres, rempli d'eau, réchauffé par une ceinture chauffante silicone de largeur 200mm, sans isolation thermique, de puissance 2250W (charge surfacique 0.75W/cm²).

Variation de la température dans le temps de la température d'un fût métallique de 220 litres, rempli d'huile hydraulique HF 24-6, réchauffé par une ceinture chauffante silicone de largeur 200mm, sans isolation thermique, de puissance 2250W (charge surfacique 0.75W/cm²).



- 1: Température de la paroi du réservoir sous la résistance chauffante
- 2: Température de la surface extérieure de la ceinture silicone
- 3: Température de l'eau, au centre du diamètre, à 50mm de la paroi supérieure
- 4: Température de l'eau au centre du diamètre, à mi hauteur
- 5: Température de l'eau, au centre du diamètre, à 50mm du fond

- 1: Température de la paroi du réservoir sous la résistance chauffante
- 2: Température de la surface extérieure de la ceinture silicone
- 3: Température de l'huile, au centre du diamètre, à 50mm de la paroi supérieure
- 4: Température de l'huile au centre du diamètre, à mi hauteur
- 5: Température de l'huile, au centre du diamètre, à 50mm du fond

Analyse des résultats : On remarque dans ces essais que la différence de température entre le milieu et le dessus du réservoir sont très rapidement identiques, alors que le fond du réservoir n'est absolument pas réchauffé. Le temps de chauffe est de 6h 30 minutes pour que la température du liquide au niveau de la ceinture chauffante atteigne 70°C.

L'efficacité énergétique est très faible (35%) comparée aux manteaux chauffants isolés qui peuvent atteindre 85 à 90%

Analyse des résultats : On remarque dans ces essais que la différence de température entre le milieu et le dessus du réservoir sont très rapidement identiques, alors que le fond du réservoir n'est absolument pas réchauffé. Il faut 2h30 minutes pour que la température du liquide au niveau de la ceinture chauffante atteigne 70°C.

Par rapport au réchauffage de l'eau dans les mêmes conditions, le gain de temps est important (rapport de 0.4) Mais la température de surface de l'élément chauffant atteint la limite de 190°C en raison de la faible conductibilité thermique de l'huile et de sa capacité calorifique plus basse. Le limiteur de température de surface est indispensable (Les zones * sont les périodes où le limiteur a coupé l'alimentation de l'élément chauffant).

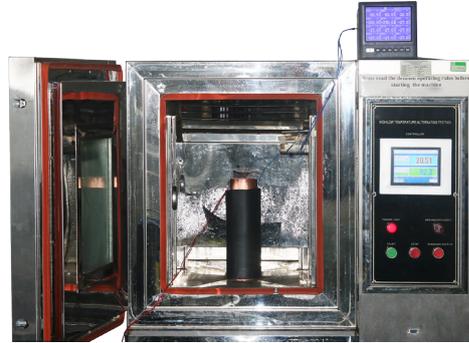
L'efficacité énergétique est très faible (25%) comparée aux manteaux chauffants isolés qui peuvent atteindre 85 à 90%.

Comparaison des temps de chauffe nécessaires en fonction de différents liquides couramment réchauffés par des ceintures chauffantes silicone

Afin de permettre de donner une idée aux utilisateurs réchauffant des produits particuliers, nous avons réalisé, dans des conditions d'essai identiques, des test comparatifs en enregistrant le temps nécessaire et l'évolution de la température lors du réchauffage d'un litre de produit, de 20°C à 90°C (mesure effectuée au centre géométrique du réservoir).

Ces essais ont été faits avec deux valeurs différentes de puissance surfacique : 0.1W/cm² et 0.4W/cm²

Conditions des essais : Chauffage effectué dans un réservoir cylindrique diamètre 76 mm hauteur 280mm, à fond plat, en cuivre rouge de 2mm d'épaisseur, dont la totalité de la partie cylindrique remplie du produit (250mm) est réchauffée par une résistance souple silicone, isolée par 20mm de mousse PVC-NBR. Le chauffage est réalisé sans régulation de température ni limiteur de température de sécurité. La température ambiante est maintenue à 20°C dans une enceinte climatique. Le test est stoppé quand la température au centre du produit a atteint 90°C.



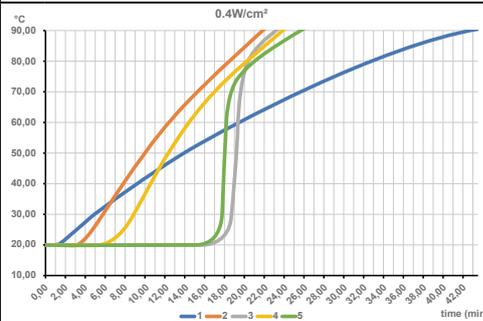
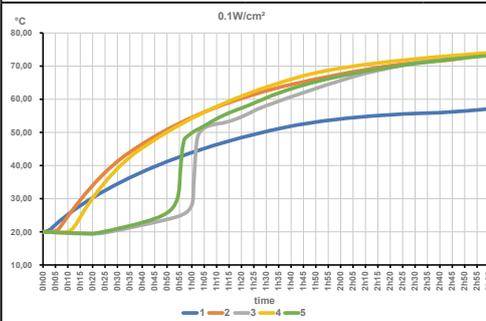
Appareil d'essai

Caractéristiques des produits ayant servi aux essais

Produits	Conductivité thermique W/m.K	Chaleur massique (kJ/kg.K)	Viscosité cinématique à 20°C mm ² /s	Densité Kg/m ³
Eau	0.597@20°C	4.182	1.006@20°C	0.998@20°C
Huile d'olive	0.189@15°C	1.25	91.5@20°C	0.922 @20°C
Gras de porc (saindoux)	0.407@25°C	2.1	Figé (fusion entre 35 et 42°C)	0.924-0.930
Huile minérale ISO VG680	0.134@40°C	1.99	4000@20°C	0.850
Beurre	0.197 @46°C	2.3	Figé (fusion entre 27 et 32°C)	0.87-0.93

Avec une charge surfacique de 0.1W/cm² (60W)

Avec une charge surfacique de 0.4W/cm² (240W)



1: Eau 2: Huile d'olive 3: Huile animale (saindoux) 4: Huile minérale ISO VG680 ; 5 : Beurre

Analyse des résultats : L'eau, avec une capacité calorifique de 2 à 4 fois plus importantes que les autres produits, demande donc plus d'énergie pour se réchauffer et s'échauffe donc nettement moins vite. Les produits figés à la température ambiante (Beurre, graisse animale) conservent longtemps une partie centrale froide par manque de courants de convection, avant de rejoindre rapidement la température des autres huiles lorsqu'ils se liquéfient.

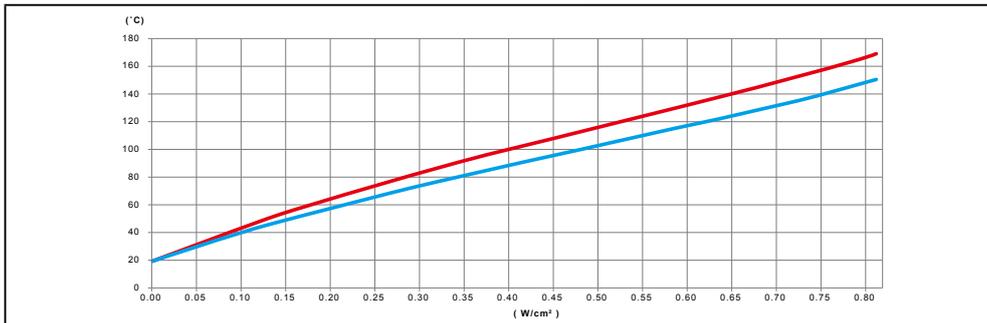
3- Le réchauffage des tuyauteries.

3-1 Température de surface des tuyauteries

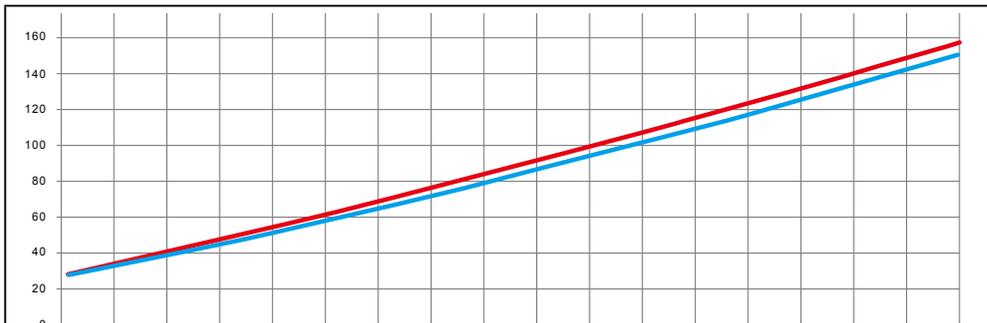
Une deuxième application des éléments chauffants souples en silicone est le réchauffage ou la mise hors gel des tuyauteries. La température atteinte sur la surface des tuyauteries est le paramètre le plus important. Nous avons donc effectué un certain nombre d'essais afin de permettre aux utilisateurs d'avoir des repères avant de sélectionner une résistance silicone souple pour ces applications.



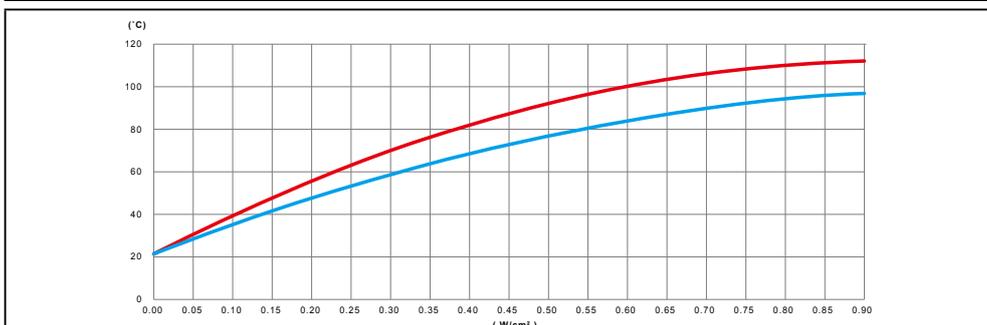
Résultats des essais sur des tubes en acier inoxydable



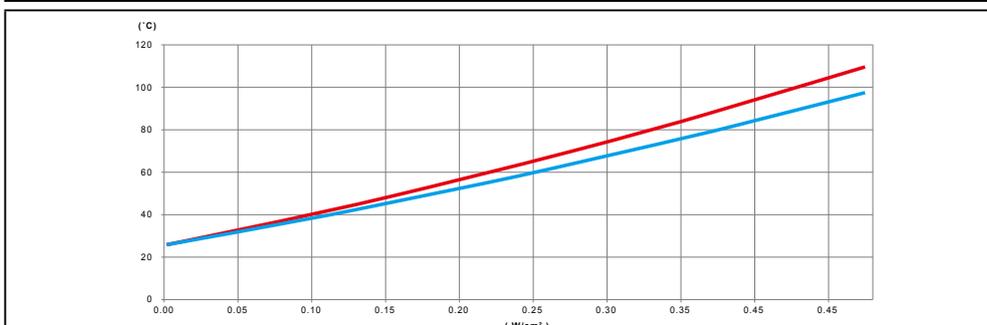
Variation, en fonction de la puissance en W/cm^2 du ruban chauffant en silicone, de la température de paroi d'un tube en acier inoxydable vide, non isolé thermiquement



Variation, en fonction de la puissance en W/cm^2 du ruban chauffant en silicone, de la température de paroi d'un tube en acier inoxydable vide, isolé thermiquement par 20mm de mousse PVC-NBR



Variation, en fonction de la puissance en W/cm^2 du ruban chauffant en silicone, de la température de paroi d'un tube en acier inoxydable rempli d'eau non circulante, non isolé thermiquement

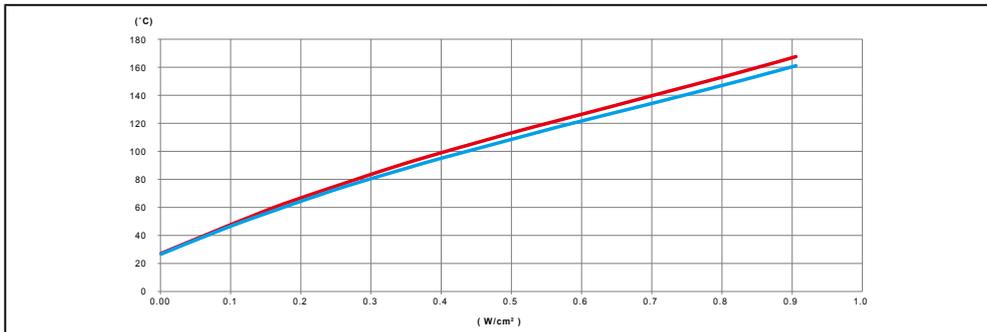


Variation, en fonction de la puissance en W/cm^2 du ruban chauffant en silicone, de la température de paroi d'un tube en acier inoxydable rempli d'eau non circulante, isolé thermiquement par 20mm de mousse PVC-NBR

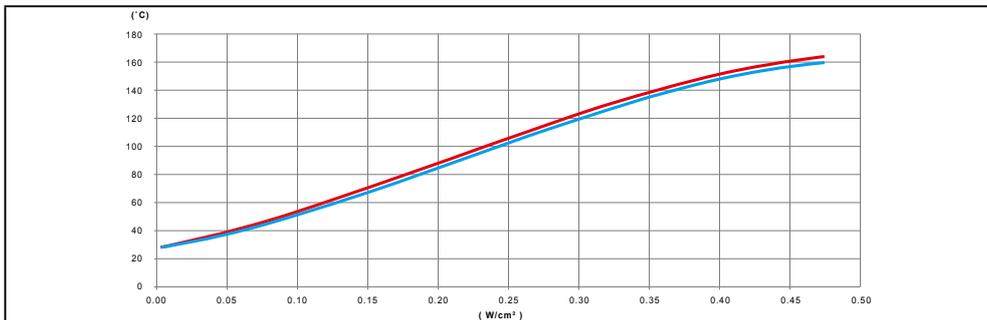
Analyse des résultats :

- **Homogénéité de température** : les tubes en acier inoxydable étant d'assez mauvais conducteurs de la chaleur, on note de fortes différences de température entre les zones chauffées et les zones non chauffées, en particulier pour des tubes vides. Cette différence est atténuée lors de l'emploi de tubes isolés.
- **Puissance recommandée** : Pour des tubes en acier inoxydable non isolés avec une eau en général non circulante, tels que des tubes d'alimentation en eau domestique, une valeur de $0,42 W/cm^2$ est suffisante pour protéger contre le gel jusqu'à $-20^{\circ}C$. Pour des tubes isolés, cette valeur est de $0,3 W/cm^2$

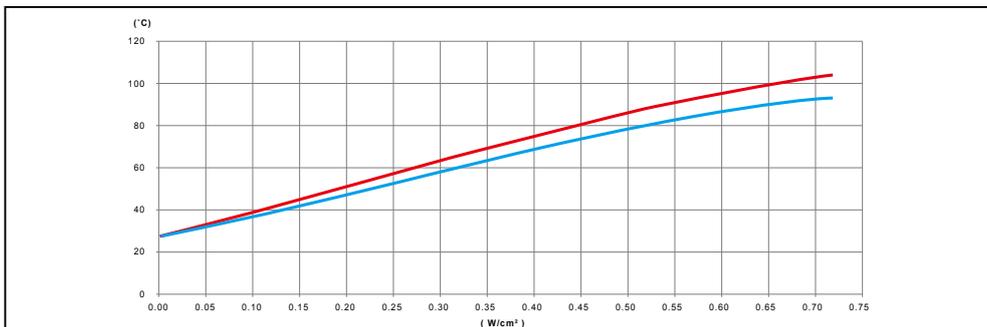
Résultats des essais sur des tubes en acier galvanisé



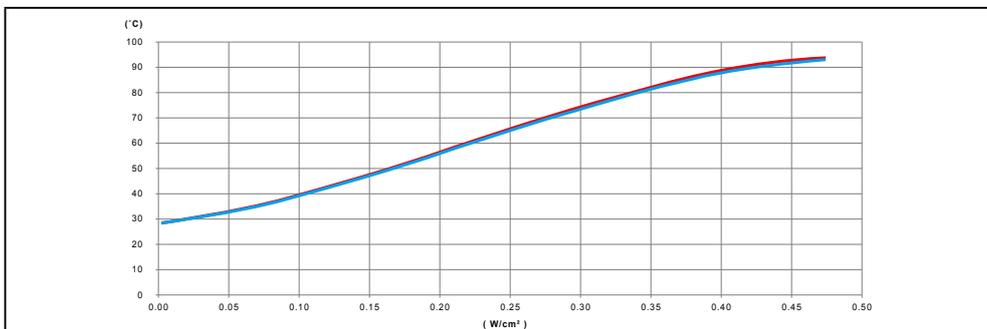
Variation, en fonction de la puissance en W/cm^2 du ruban chauffant en silicone, de la température de paroi d'un tube en acier galvanisé vide, non isolé thermiquement



Variation, en fonction de la puissance en W/cm^2 du ruban chauffant en silicone, de la température de paroi d'un tube en acier galvanisé vide, isolé thermiquement par 20mm de mousse PVC-NBR



Variation, en fonction de la puissance en W/cm^2 du ruban chauffant en silicone, de la température de paroi d'un tube en acier galvanisé rempli d'eau non circulante, non isolé thermiquement



Variation, en fonction de la puissance en W/cm^2 du ruban chauffant en silicone, de la température de paroi d'un tube en acier galvanisé rempli d'eau non circulante, isolé thermiquement par 20mm de mousse PVC-NBR

Analyse des résultats :

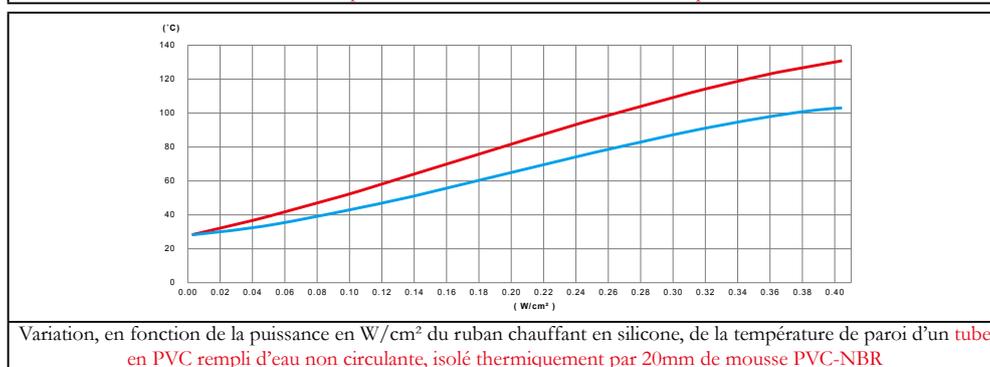
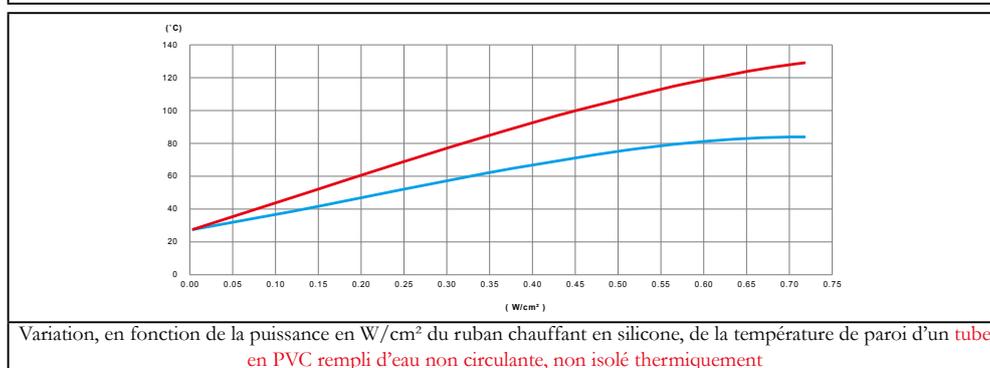
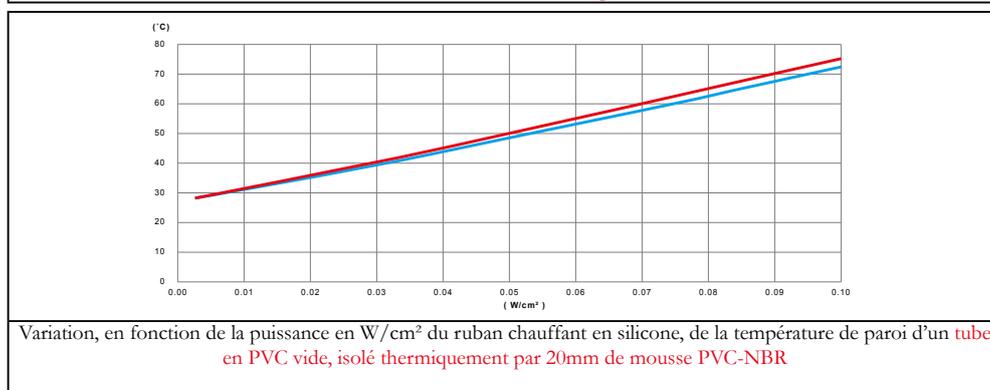
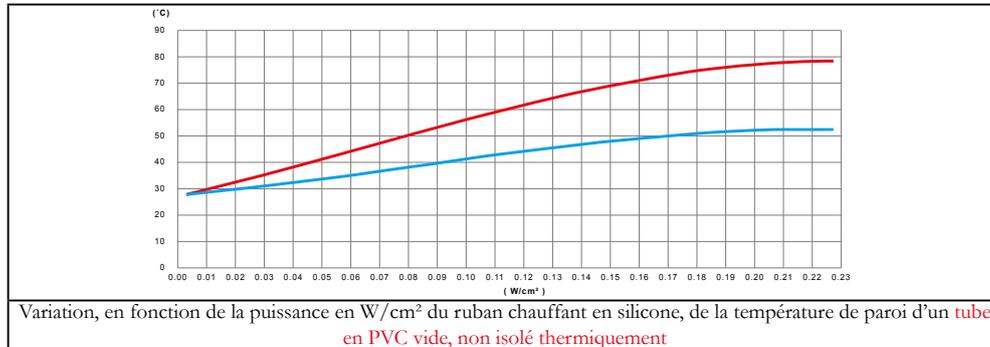
- **Homogénéité de température** : les tubes en acier étant d'assez bon conducteurs de la chaleur, on note une bonne homogénéité de température entre les zones chauffées et les zones non chauffées, les deux devenant quasiment identiques dans les tubes isolés.

- **Puissance recommandée** : Pour des tubes en acier non isolés avec une eau en général non circulante, tels que des tubes d'alimentation en eau domestique, une valeur de $0,4 W/cm^2$ est suffisante pour protéger contre le gel jusqu'à $-20^{\circ}C$. Pour des tubes isolés, cette valeur est de $0,27 W/cm^2$

Résultats des essais sur des tubes en PVC-U

Le réchauffage des tuyaux en plastique est limité par la température de ramollissement de ceux-ci.

Il est important de noter que si le tube en PVC risque de se trouver à vide en période où il est réchauffé, la température sous le ruban chauffant doit rester inférieure à cette température de ramollissement, qui se situe en 80 et 100°C selon les matières (PVC, U-PVC, C-PVC).



Analyse des résultats :

- **Homogénéité de température** : les tubes en PVC étant de mauvais conducteurs de la chaleur, on note une très forte différence de température entre les zones chauffées et les zones non chauffées, qui s'atténue dans les tubes isolés mais atteint encore plus de 20°C.

- **Puissance recommandée** : Pour des tubes en PVC ou en U-PVC isolés avec une eau en général non circulante, tels que des tubes d'alimentation en eau domestique, une valeur de 0,45 W/cm² est suffisante pour protéger contre le gel jusqu'à -20°C. Pour des tubes isolés, cette valeur est de 0,22 W/cm².

4-Réchauffage de parois avec des éléments chauffants flexibles en silicone

4-1. Température de surface de parois en fonction de la puissance surfacique

En fonction de la puissance surfacique en W/cm^2 , la température d'une paroi chauffée se stabilisera à différentes valeurs. Cette température, variera en fonction du niveau de ses échanges thermiques avec son environnement. (Dans l'air calme, dans l'air ventilé, en contact avec des parois en différents métaux ou matières plastique). Les essais ci-dessous permettent de se faire une idée générale de l'évolution de cette température. (Mesures sans contact effectués par thermographie)

Mesures sur des résistances chauffantes dans l'air

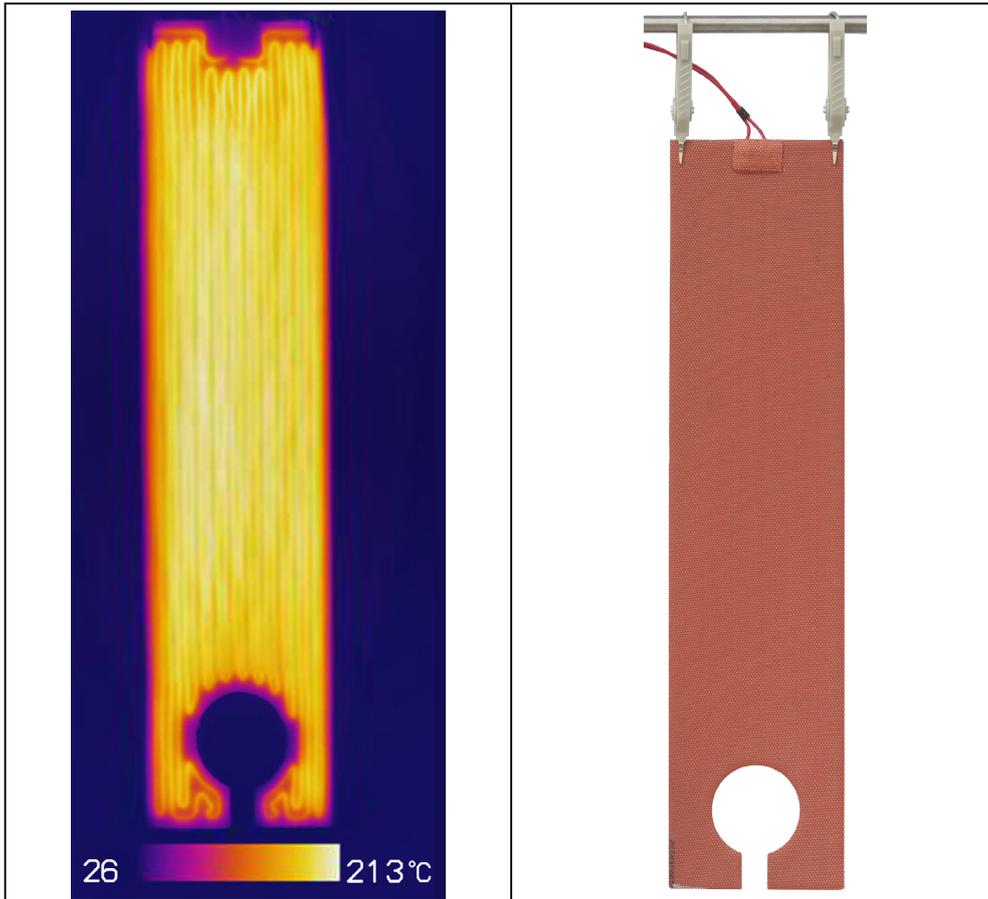
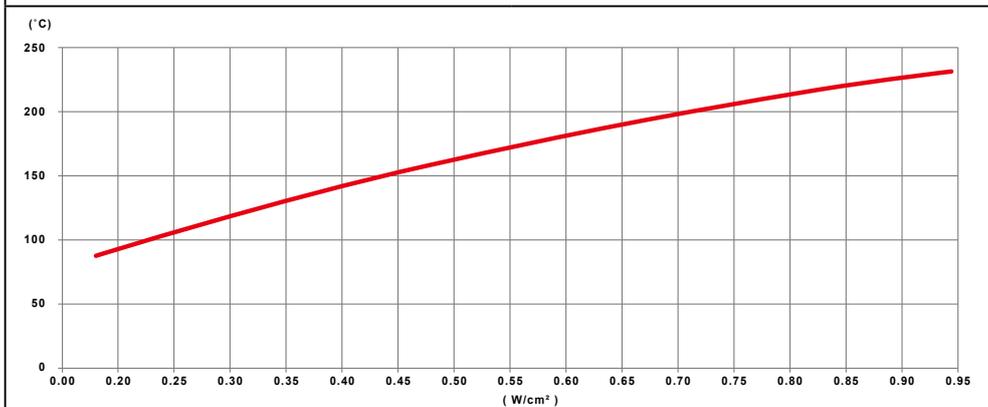
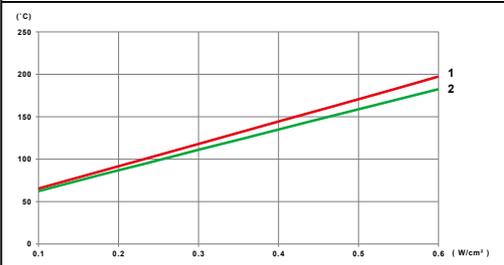
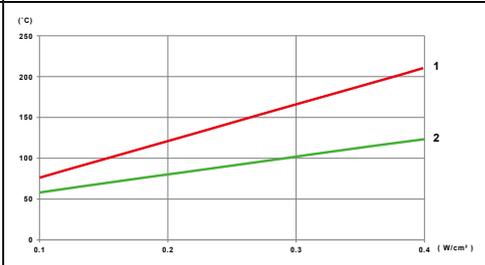


Image thermographique d'une résistance chauffante plate silicone épaisseur 2,4 mm chargée à $1W/cm^2$, suspendue dans l'air calme, non fixée sur une paroi, à une température ambiante de $25^{\circ}C$. La température de surface atteint $213^{\circ}C$, soit une valeur proche de la destruction.



Variation de la température de surface d'une résistance plate silicone épaisseur 2,5mm en fonction de la charge surfacique. La résistance est suspendue dans l'air calme, non fixée sur une surface métallique, à température ambiante de $25^{\circ}C$. La résistance n'est pas protégée par un système de limitation de température. Dans ces conditions, la résistance est détériorée de manière irréversible à $235^{\circ}C$.

Mesures sur des résistances chauffantes installées sur des parois métalliques non immergées

Sans isolation thermique	Avec isolation thermique par 10mm de mousse silicone
	
	
<p>1 : Température moyenne de la plaque en aluminium. 2 : Température moyenne de la face extérieure de l'élément chauffant silicone.</p>	<p>1 : Température moyenne de la plaque en aluminium. 2 : Température moyenne de la face extérieure de la mousse isolante de 10mm.</p>
<p>Variation de la température de surface d'une résistance plate silicone épaisseur 2,5mm vulcanisée sur une plaque aluminium lisse de 6mm en fonction de la puissance surfacique. La température ambiante est de 25°C. La plaque en aluminium atteint une température de surface de 195°C pour une charge surfacique de 0.6W/cm². L'écart de température entre la plaque aluminium et la face externe reste faible.</p>	<p>Variation de la température de surface d'une résistance plate silicone épaisseur 2,5mm vulcanisée sur une plaque aluminium lisse de 6mm en fonction de la puissance surfacique. <u>Une mousse isolante de 10mm d'épaisseur est vulcanisée sur la surface externe de l'élément chauffant.</u> La température ambiante est de 25°C. La plaque en aluminium atteint une température de surface de 210°C pour une charge surfacique de 0.4W/cm. La différence de température entre la mousse isolante et la paroi en aluminium atteint 90°C à 0.4W/cm²</p>

5- Paramètres de construction des résistances souples en silicone

5-1. Paramètres généraux

Les caractéristiques principales des résistances chauffantes en silicone sont : la flexibilité et la possibilité de produire une forte puissance surfacique. Les conséquences de ces caractéristiques ont une influence primordiale sur les méthodes de construction.

1- Pour obtenir des puissances de chauffe importantes, il faut des résistances chauffantes avec une faible résistance car la puissance est égale à U^2/R , donc pour une tension donnée la résistance est inversement proportionnelle à la puissance.

2- Pour conserver la flexibilité, les conducteurs chauffants doivent être du plus petit diamètre possible, et disposés dans une configuration qui facilite la flexion.

3- Pour obtenir une bonne homogénéité de température, il faut la plus forte longueur de fil par unité de surface.

4- Pour éviter les points chauds et la destruction de la feuille en silicone vulcanisée autour du fil chauffant, il faut que la puissance linéique reste limitée afin que la température de surface du fils reste en-dessous celle supportée par le silicone.

On voit donc que ces paramètres 2, 3 et 4 sont a priori incompatibles avec le premier, et que la fabrication de résistances chauffantes souples de forte puissance semble impossible. En effet les constructeurs de fils chauffants ont surtout développé des alliages à forte résistivité afin de réduire la longueur de fils nécessaires, et donc d'en réduire le coût.

Donc les seuls paramètres restants qui peuvent être modifiés sont :

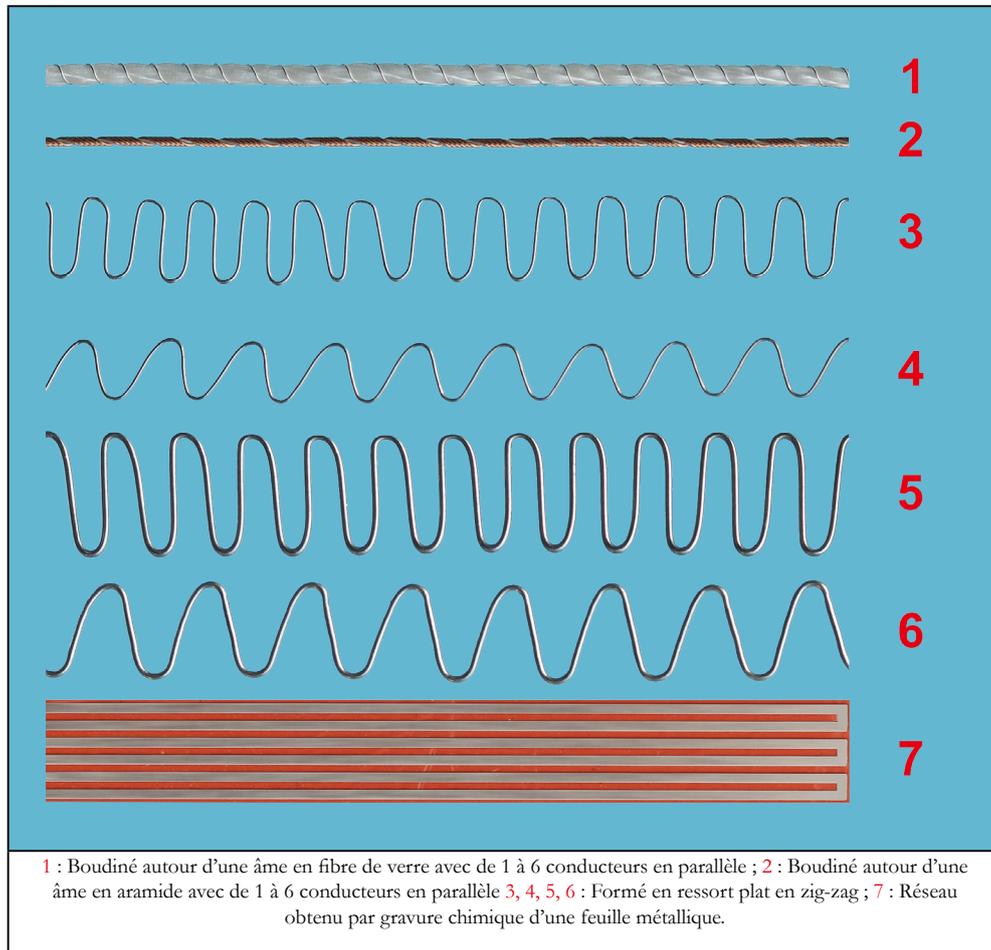
- Les méthodes de formage du fil (en boudiné de faible diamètre autour d'une âme en fibre de verre, en zig-zag, en ressort plat),

- Le montage de plusieurs circuits en parallèle afin de diviser la puissance par circuit,

- La sélection de fils chauffants en alliages à faible résistivité.

C'est la combinaison de ces solutions techniques, étudiées au cas par cas qui garantit une bonne flexibilité et une bonne densité de fils chauffants par unité de surface et donc une bonne homogénéité de température sans points chauds.

Quelques méthodes modernes de formage de fils chauffants pour les résistances souples en silicone



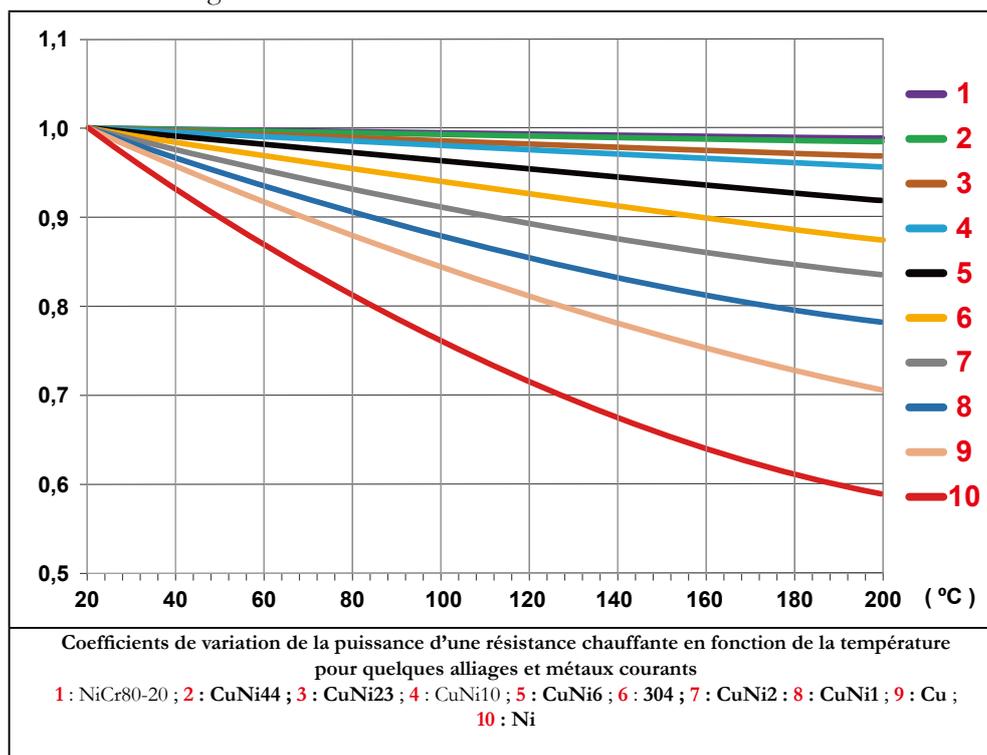
5-2. Utilisation des fils résistifs à coefficient de température positif, nul ou négatif, et en conséquence, la variation de la puissance en fonction de la température.

Un paramètre peu connu des éléments chauffants souples en silicone est la variation de leur puissance lorsque la température s'élève.

Alors que dans les éléments chauffants haute température, les constructeurs recherchent des fils chauffants ayant un coefficient de variation de la résistivité en température proche de zéro, et une bonne tenue sans oxydation aux températures élevées, en utilisant par exemple des alliages Nickel-chrome, dans les éléments flexibles en silicone, la tenue en température requise est plus faible, puisque la température maximale d'utilisation est d'environ 250°C.

Cette température maximale plus faible permet d'utiliser une gamme de métaux et d'alliages plus large, avec une gamme de valeurs de résistivité allant de 0.017 à plus de 0.50 Ohms.mm²/m. Cette très large plage de résistivité utilisable permet de construire des éléments chauffants d'à peu près toutes les surfaces, tout en restant dans des diamètres de fils chauffants flexibles. Cependant tous ces alliages et métaux ont des caractéristiques de variation de la résistivité en fonction de la température complètement différents. Il est donc possible d'utiliser ce paramètre pour réaliser des éléments chauffants qui vont s'autoréguler (ou non) lorsque la température monte.

Par exemple, en utilisant l'alliage N°9 du tableau ci-dessous, une résistance chauffante verra sa puissance quasiment divisée par 2 entre 20 et 200°C, alors qu'elle restera constante si l'alliage N°1 est utilisé.



5-3. Conception du support en feuilles de silicone armé fibres de verre

L'élément qui a la plus d'incidence sur le prix des résistances flexibles en silicone est le poids de silicone par m². Le silicone est un composant cher, et donc le développement des éléments chauffants flexibles est basé sur l'utilisation minimale de cette matière.

La base est une trame en fibre de verre qui sera enduite de chaque côté d'une couche de résine silicone, ensuite polymérisée par le passage dans un laminoir chauffant. L'épaisseur totale de silicone est calculée pour fournir l'isolation électrique (fonction de la tension d'utilisation), et la trame en fibre de verre est utilisée pour fournir la résistance mécanique, en particulier à l'élongation. Plusieurs couches peuvent être vulcanisées ensemble pour répondre à des applications spécifiques.

Les éléments chauffants flexibles en silicone peuvent être réalisés dans 6 configurations principales de construction :

A- En épaisseur totale de 1.5 à 1.6mm, qui correspond à une épaisseur d'isolant de 0.75 à 0.8mm de part et d'autre des conducteurs chauffants. Réalisée avec des fils

Introduction technique aux éléments chauffants flexibles en silicone

chauffants bobinés, elle procure la meilleure résistance à la flexion. Cette solution est la plus économique, en particulier pour les petites séries, mais sa résistance mécanique est réduite par la faible épaisseur. Elle est surtout utilisée pour des éléments chauffants de faible surface, ou destinés à être collés. Ayant une faible masse, elle permet une mesure de température plus rapide des thermostats et des capteurs de température montés sur sa surface.

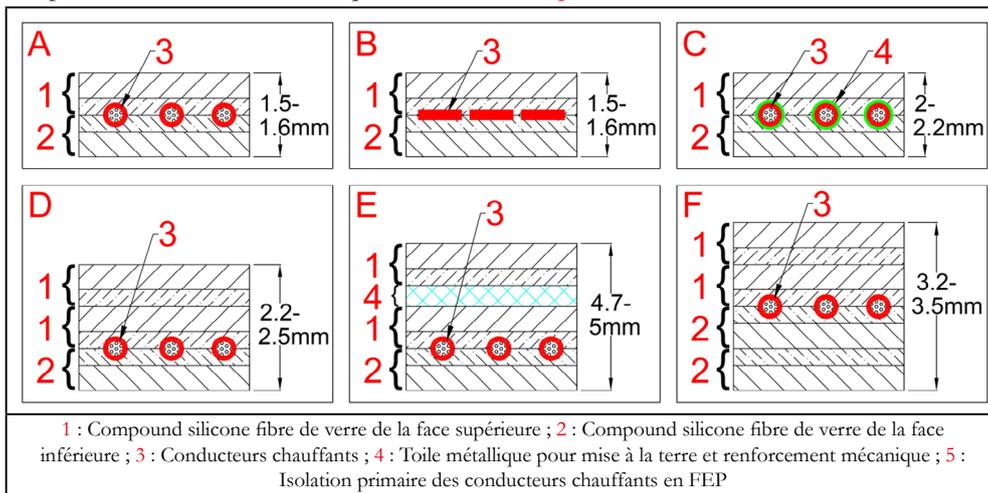
B- En épaisseur totale de 1.5 à 1.6mm, qui correspond à une épaisseur d'isolant de 0.75 à 0.8mm de part et d'autre d'un réseau chauffant réalisé par gravure chimique. Cette solution est la plus économique pour la réalisation de grandes séries, mais la moins résistante à la flexion. Ayant la plus faible masse, la meilleure répartition de chaleur, elle permet une mesure de température plus rapide des thermostats et des capteurs de température montés sur sa surface.

C- En épaisseur totale de 2 à 2.2mm, qui correspond à une épaisseur d'isolant de 1 à 1.1mm de part et d'autre des conducteurs chauffants. Cette solution améliore l'isolation électrique vers l'extérieur de la partie chauffante car l'utilisation de conducteurs chauffants avec une isolation primaire en FEP confère la classe d'isolation 2 à cet assemblage, sans trop en augmenter l'épaisseur. Cette solution est utilisée dans les appareils chauffants soumis à une réglementation obligeant une classe d'isolation 2.

D- En épaisseur totale de 2.4 à 2.5mm, qui correspond à une épaisseur d'isolant de 0.75 à 0.8mm d'un côté et de 1.6mm de l'autre des conducteurs chauffants. Cette solution améliore la résistance mécanique et l'isolation électrique vers l'extérieur de la partie chauffante. Elle est utilisée pour les ceintures chauffantes devant être montées et démontées fréquemment, les éléments de grande surface soumis à des contraintes mécaniques

E- En épaisseur totale de 2.5 à 2.6mm, qui correspond à une épaisseur d'isolant de 0.75 à 0.8mm d'un côté et de 1.6mm de l'autre côté des conducteurs chauffants. Dans cette épaisseur de 1.6mm est prise en sandwich une toile métallique fine de protection contre le poinçonnement et qui permet aussi une mise à la terre efficace. Cette solution améliore la protection électrique et la résistance à l'élongation, mais réduit la flexibilité. Une variante de cette solution consiste à utiliser des conducteurs chauffants comportant une isolation électrique primaire recouverte d'une tresse métallique.

F- En épaisseur totale de 3.2 à 3.4 mm, qui correspond à une épaisseur d'isolant de 1.6mm de part et d'autre des conducteurs chauffants. Cette solution procure la plus forte résistance mécanique et permet de réaliser des appareils à double isolement (Classe 2), mais cette surépaisseur entre les conducteurs chauffants et la surface augmente le temps de transmission thermique et donc les risques de surchauffe.



5-4. Habillage des parois des résistance silicones

Les éléments flexibles peuvent recevoir des équipements qui sont assemblés sur leur surface, afin de répondre à différentes applications.

Les principales combinaisons sont les suivantes :

A : Aucun équipement

B : Un côté avec mousse isolante silicone collée ou vulcanisée, procurant une isolation thermique vers l'extérieur

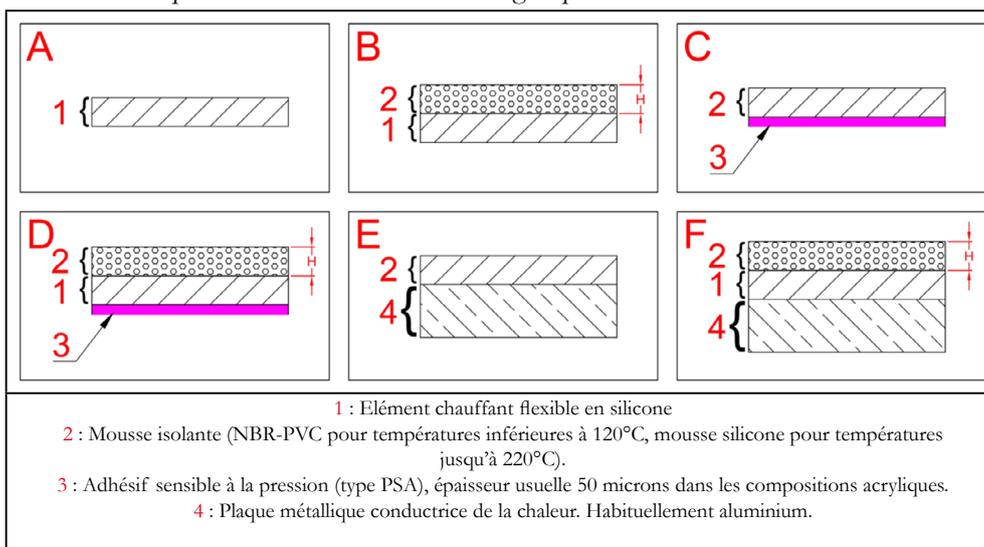
C : Un côté avec adhésif de type PSA, en général de type acrylique, de très faible épaisseur, permettant de coller l'élément chauffant sur la paroi à réchauffer. Il existe des adhésifs utilisables jusqu'à 200°C.

Introduction technique aux éléments chauffants flexibles en silicone

D : Un côté avec adhésif de type PSA, en général de type acrylique, de très faible épaisseur, permettant de coller l'élément chauffant sur la paroi à réchauffer, le côté opposé étant équipé d'une mousse isolante silicone collée ou vulcanisée, procurant une isolation thermique vers l'extérieur.

E : Élément chauffant collé sur une plaque métallique conductrice de la chaleur. Cette solution permet d'uniformiser la température de surface et d'atteindre des charges surfaciques plus élevées.

F : Élément chauffant collé sur une plaque métallique conductrice de la chaleur. Cette solution permet d'uniformiser la température de surface et d'atteindre des charges surfaciques plus élevées. La face extérieure de la résistance reçoit une mousse silicone isolant thermique améliorant l'efficacité énergétique.



5-5. Résistance mécanique des éléments chauffants souples en silicone

Les résistances chauffantes souples en silicone sont souvent soumises à des contraintes mécaniques durant leur installation ou durant leur utilisation. Pour résister à ces contraintes des solutions techniques et des essais de validation sont nécessaires.

Les principales contraintes de leurs applications industrielles sont en particulier :

1- La résistance au déchirement, critique lorsque des éléments chauffants sont fixés par des trous pratiqués dans leur épaisseur, par exemple pour y placer des vis, cordons, rivets, ou lorsque des aspérités existent sur la surface

2- La résistance au fluage, critique lorsque les éléments chauffants sont tendus en permanence par des ressorts sur un réservoir cylindrique, par exemple dans les ceintures chauffantes.

3- La résistance à l'arrachage des crochets de montage des ressorts sur les ceintures chauffantes

4- La résistance à l'arrachement des fils et câbles électriques d'alimentation, dont les valeurs minimales sont données par les normes électriques.

5- La résistance à la séparation des différentes couches vulcanisées, paramètre critique du bon fonctionnement de ces éléments chauffants.

6- La résistance à la flexion, qui permet de vérifier que les éléments chauffants pourront être placés sur des parois cylindriques, paramètre critique des ceintures chauffantes et des rubans pour le traçage électrique.

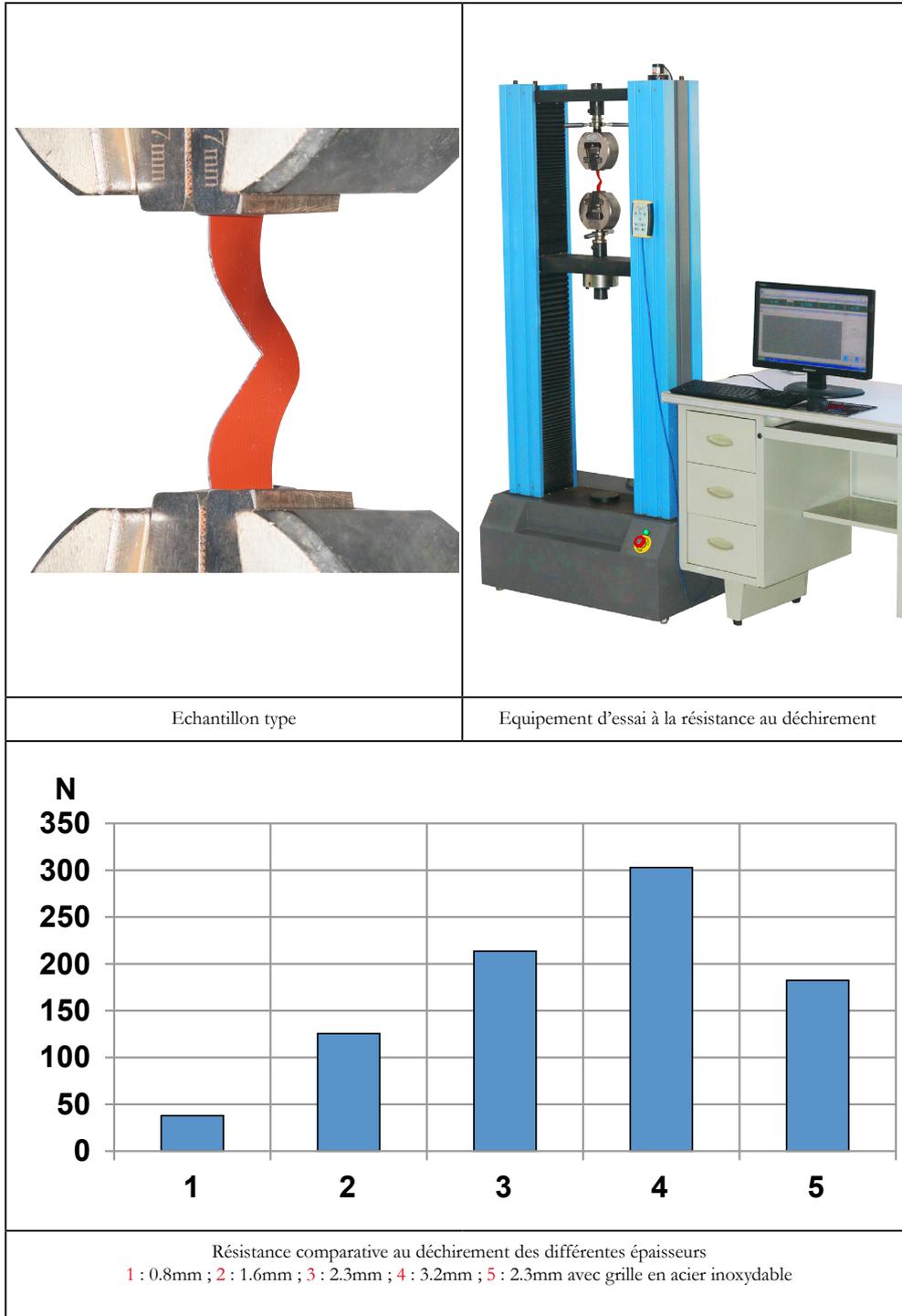
7- La résistance à l'arrachement des boîtiers de protection en silicone des thermostats, limiteurs, capteurs de température, qui doit garantir que les systèmes de sécurité ou de contrôle de température conservent leur fonction et donc que leur désolidarisation de la surface chauffante ne puisse se produire.

Toutes ces contraintes ont fait l'objet d'essais de validation avant que les appareils soient mis en circulation sur le marché.

Résistance au déchirement

La résistance au déchirement est testée dans les différentes épaisseurs des versions A (1.5/1.6mm), B (2.2/2.5mm), C (2.3/2.6mm) et D (3.2/3.5mm), décrites ci-dessus, sur des spécimens découpés au laser, ayant des dimensions conformes à celles spécifiées dans la norme EN 60335-2-17§21.110.1.

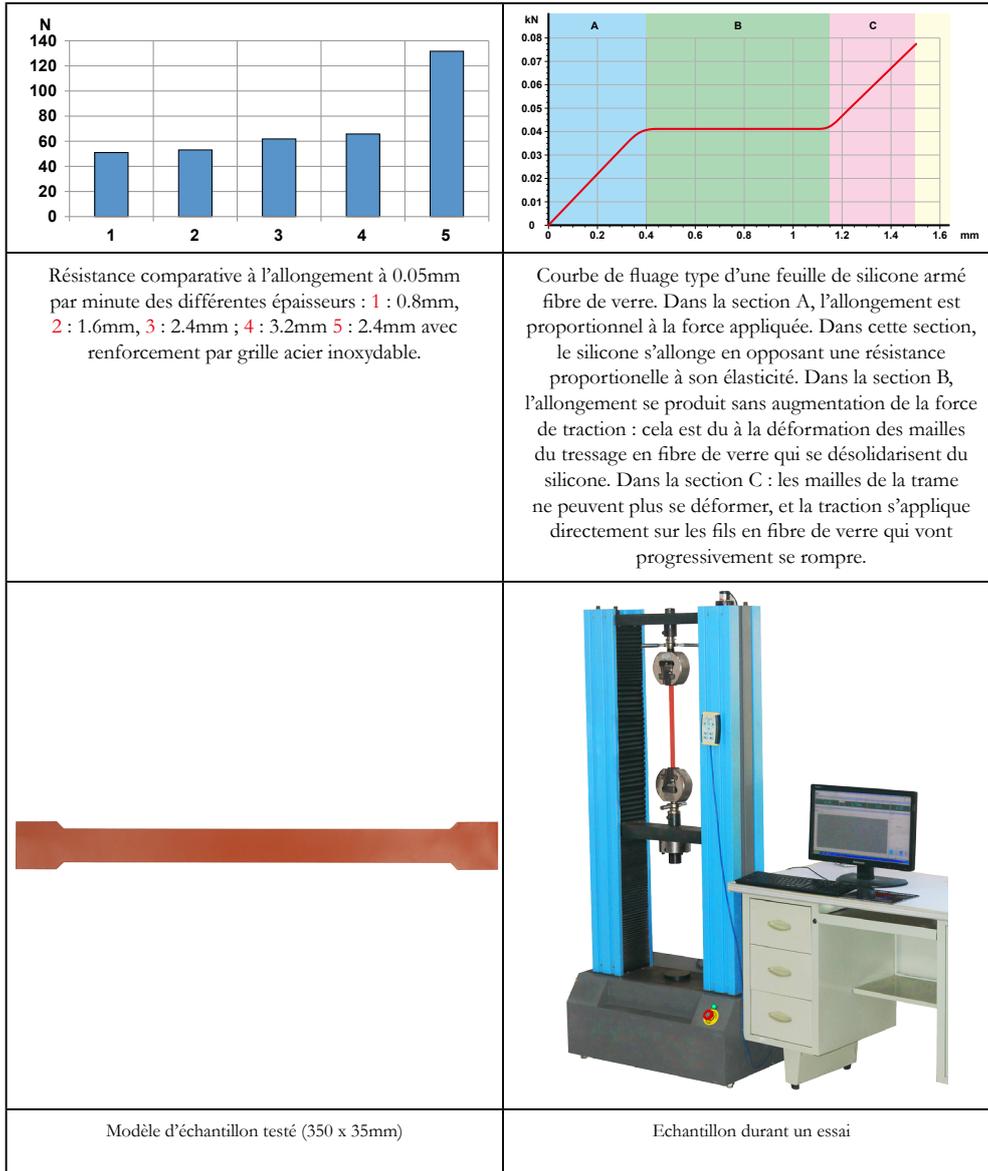
Cet essai permet de vérifier la qualité de la fabrication de la trame en fibre de verre



Allongement sous contrainte permanente (Fluage)

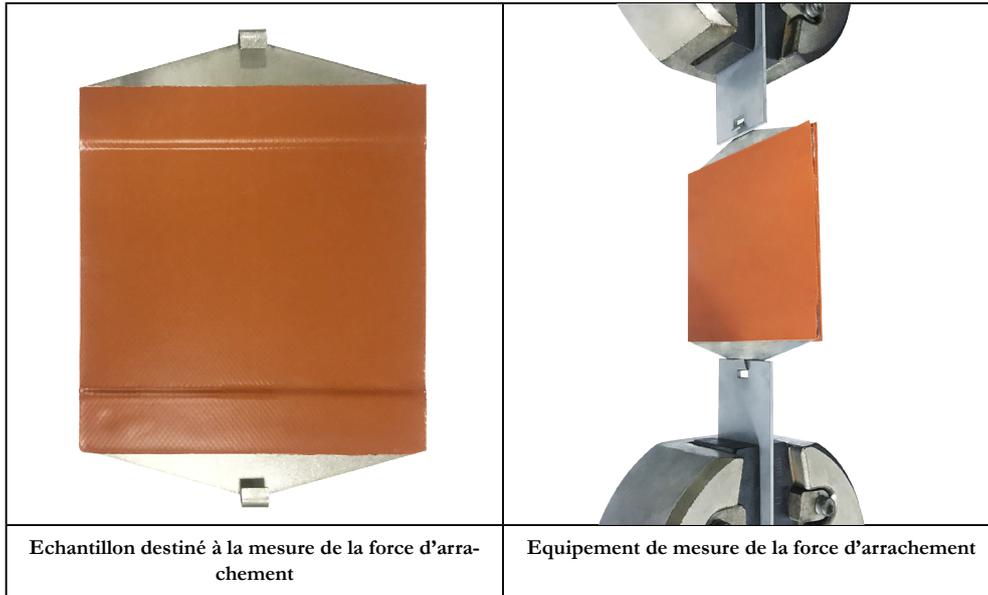
Dans les applications dans lesquelles une contrainte permanente est appliquée, un allongement des résistances flexibles en silicone peut résulter en un desserrage et provoquer un écartement par rapport à la paroi à chauffer. La modification des échanges thermiques en résultant peut produire une surchauffe. Nous avons donc mesuré la force nécessaire pour provoquer un allongement de 1.5mm en 30 minutes sur une résistance type de 350mm de longueur dans les différentes configurations d'épaisseurs. (La version de 1.6mm d'épaisseur est la base de référence).

Cet essai nous permis de sélectionner les feuilles silicone armé fibre de verre les moins sensibles au fluage. Les essais montrent que le fluage est quasiment indépendant du nombre de couches de silicone armé fibre de verre, mais surtout dépendant de la qualité de la jonction entre le silicone et la trame de fibre de verre.



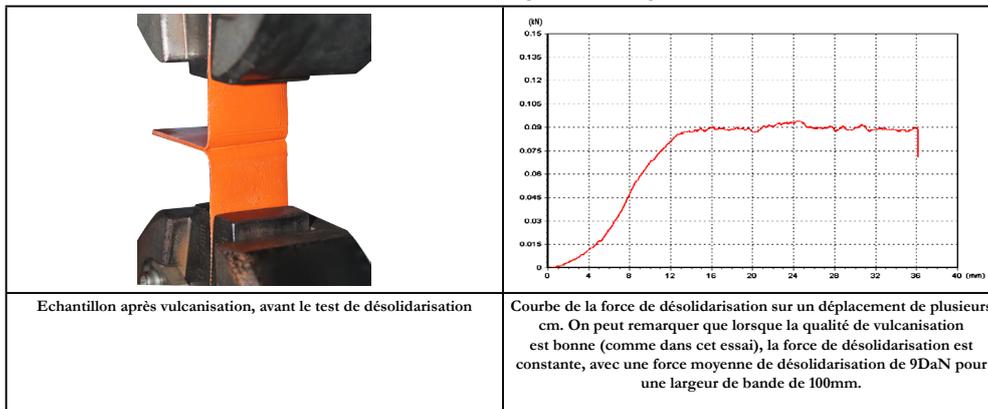
Résistance à l'arrachage des crochets de montage

L'arrachement d'un crochet servant à tendre les ceintures chauffante provoquera la désolidérisation de celle-ci du fût sur laquelle elle est installée, et la surchauffe et la destruction immédiate de la ceinture, ce qui peut être la cause d'un incendie. Grâce aux moyens mis en œuvre lors de la fabrication, la force nécessaire pour arracher les supports des crochets de la ceinture chauffante **est au minimum supérieure de 50% à la force nécessaire pour déformer et redresser les crochets.**



Résistance à la séparation des différentes couches vulcanisées

Un des défauts critiques **et invisible** des éléments chauffants souples en silicone est une vulcanisation incomplète des couches entre lesquelles est inséré le fil chauffant. Cette vulcanisation incomplète peut être due à une pression insuffisante, une température insuffisante, une durée de compression trop courte, une résine silicone mal dosée ou dont la durée de conservation est dépassée. Ce défaut va provoquer la désolidarisation des couches, la formation de bulles, et la destruction prématurée du fil chauffant. Il est donc important de pouvoir quantifier cette adhésion afin d'optimiser les paramètres vulcanisation. Cet essai permet en particulier de mesurer le vieillissement des résines silicone semi-vulcanisées, car leur durée de stockage est limitée. Il permet de vérifier aussi la constance de la vulcanisation sur une grande longueur.



Résistance à la flexion

Dans les éléments chauffants flexibles, la résistance à la flexion permet de vérifier que les fils chauffants sont correctement formés et incorporés entre les feuilles de silicone armé. Cet essai, réalisé dans un équipement spécialement réalisé, permet de vérifier qu'un pli dans l'élément chauffant selon un rayon précis de résultera pas en une contrainte mécanique du conducteur qui provoquerait sa rupture immédiatement ou après plusieurs flexions. Il est inspiré des spécifications des normes UL817 et EN60335-1-25.

Cet essai consiste en une flexion alternée à 60 cycles par minutes, à 90° (45° de chaque côté de la verticale) sur un rayon de 5mm. Une charge de 100 gr. par tranche de 100 mm de largeur est ajoutée à l'extrémité libre de l'éléments chauffant. Critère d'acceptation : 500 cycles sans rupture de conducteur ou variation de plus de 1% de sa résistance électrique.



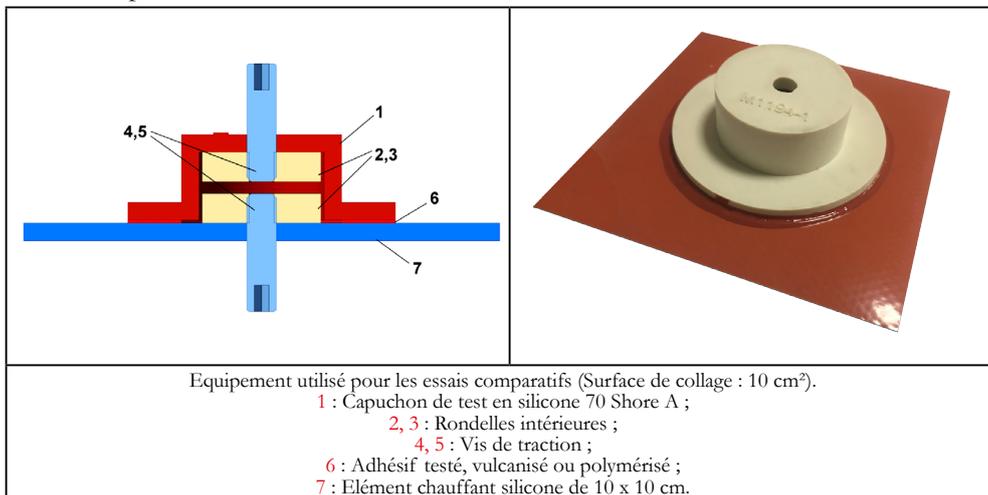
Résistance chauffante flexible en cours d'essai

Résistance à l'arrachement des boîtiers de protection silicone des thermostats, limiteurs, capteurs de température.

Tous les capuchons et boîtiers de protection sont vulcanisés sur les feuilles en silicone. Ces composants sont réalisés dans du silicone semi-souple d'une dureté de 70 Shore A, comportant une collerette avec une large surface de contact pour la vulcanisation. De ce fait leur résistance à l'arrachement est environ **10 fois** supérieure aux modèles traditionnels collés. Dans certains modèles, un remplissage additionnel, après vulcanisation, est réalisé avec une résine RTV conductrice de la chaleur pour assurer une protection contre les pénétrations d'eau et/ou un meilleur échange thermique avec la surface de l'élément chauffant.

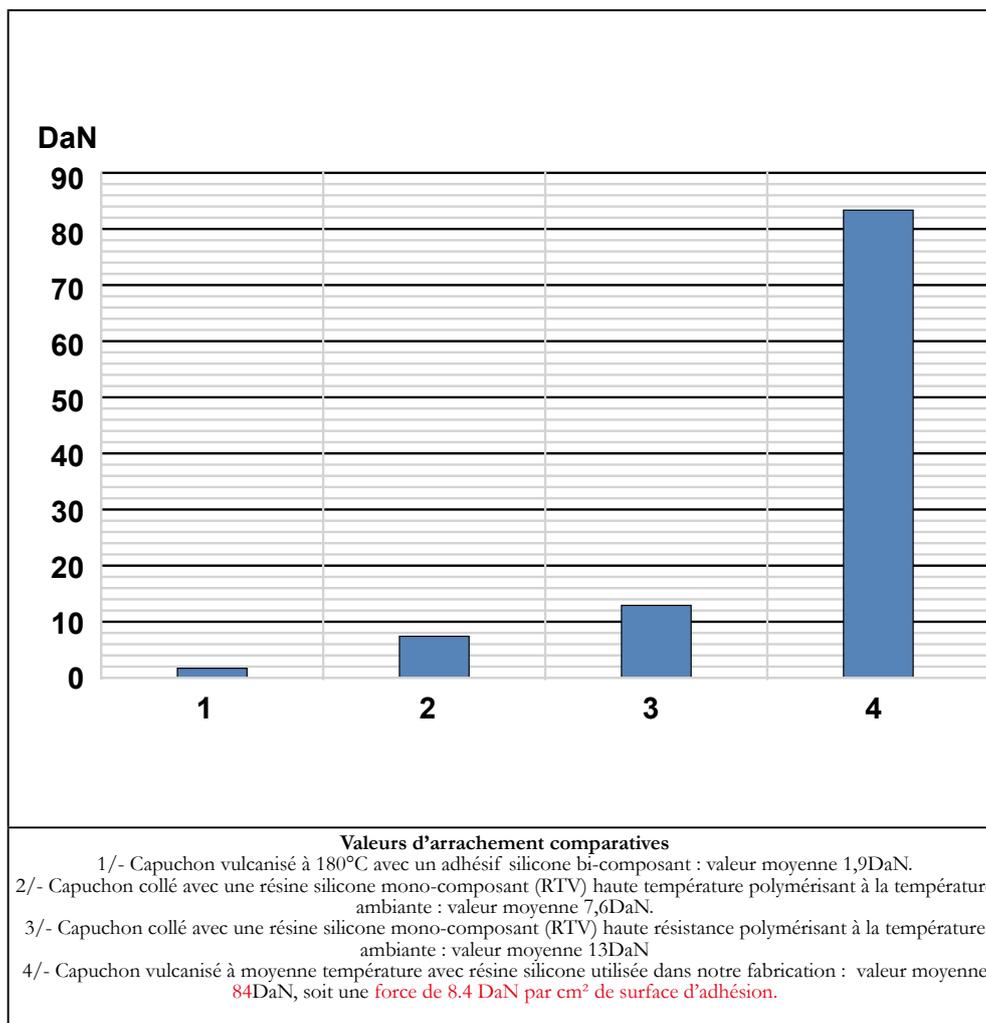
Comparaison des différentes techniques de vulcanisation et colles utilisées pour la fixation des capuchons silicone sur des surfaces chauffantes souples en silicone.

Ces essais sont effectués avec un capuchon de test particulier permettant d'avoir des résultats reproductibles.



Equipement utilisé pour les essais comparatifs (Surface de collage : 10 cm²).

- 1 : Capuchon de test en silicone 70 Shore A ;
- 2, 3 : Rondelles intérieures ;
- 4, 5 : Vis de traction ;
- 6 : Adhésif testé, vulcanisé ou polymérisé ;
- 7 : Élément chauffant silicone de 10 x 10 cm.



5-6. Méthodes de raccordement des fils, câbles, capteurs de température et thermostats

Deux types de raccordement des conducteurs d'alimentation sont utilisés dans les éléments chauffants souples en silicone :

- Le raccordement par des fils indépendants (un pour chaque phase), destinés aux résistances chauffantes dont l'incorporation dans un appareil est réalisée par le constructeur de cet appareil. La section des conducteurs est déterminée par la puissance de l'élément chauffant. Dans cette version, la résistance mécanique à l'arrachement est réalisée par un patch vulcanisé.

- Le raccordement par un câble, à deux ou trois conducteurs, généralement muni d'une fiche, destiné aux appareils destinés à un utilisateur final. Dans ce cas la résistance mécanique à l'arrachement est réalisée par un capuchon silicone vulcanisé, et éventuellement un système de blocage du câble par serrage mécanique. Dans les conditions d'utilisation les plus critiques le capuchon vulcanisé peut être riveté à l'élément chauffant.

Les valeurs d'arrachement auxquelles les câbles et fils sont soumis sont conformes aux spécifications de la norme EN60335-1-25.12 :

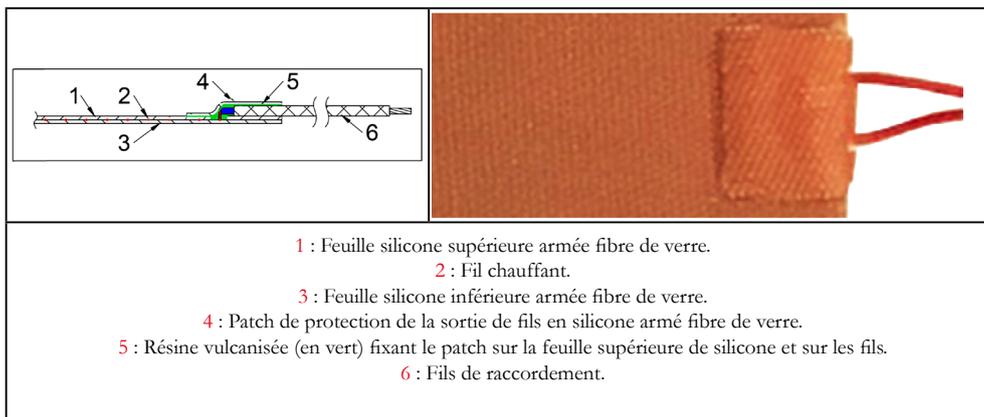
- 3 DaN pour les résistances chauffantes de masse inférieures à 1kg, - 6 DaN pour celles de masse de 1 à 4 kg,
- 10 DaN pour celles de plus de 4 kg.

Ces contraintes déterminent la conception et les caractéristiques des patches et capuchons utilisés.

Raccordement de fils sur résistance chauffante souples en silicone (IP54)

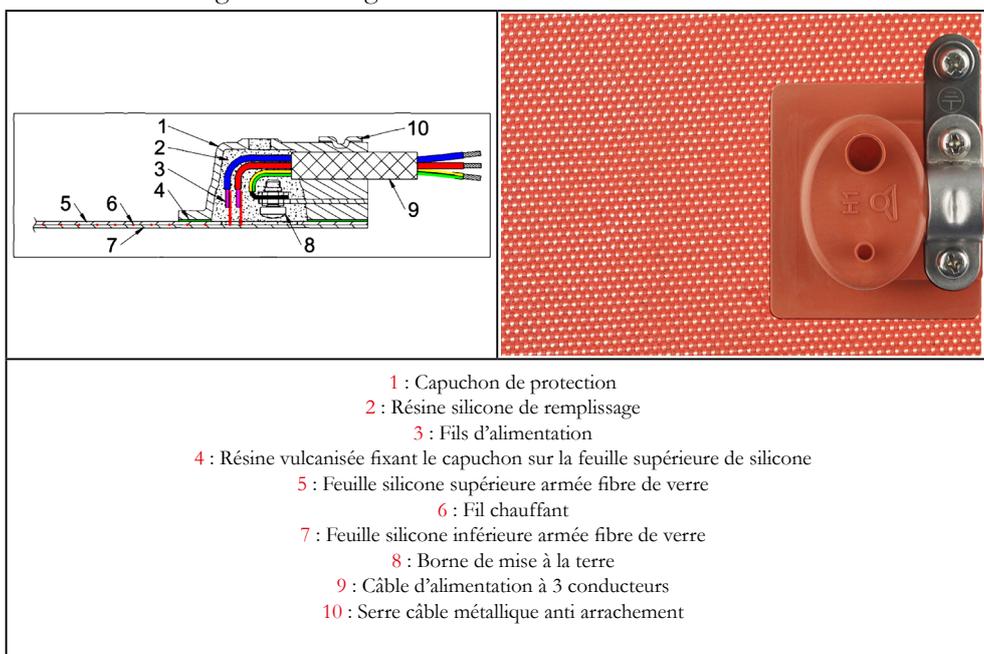
Ce raccordement, le plus courant sur les éléments chauffants souples de petite dimensions, est réalisé par un patch en silicone vulcanisé sur la soudure entre les conducteurs d'alimentation et les fils chauffants. Il assure le maintien mécanique et une étanchéité relative (IP54).

Introduction technique aux éléments chauffants flexibles en silicone



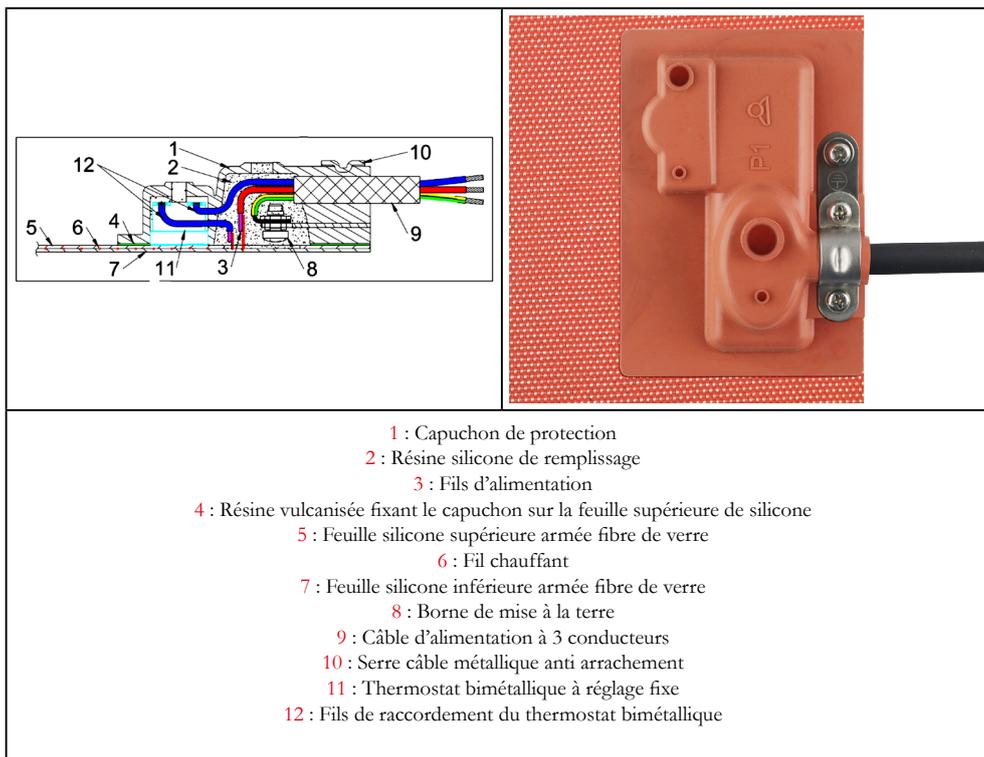
Raccordement de **câble** sur résistances chauffantes souples en silicone (IP65)

Ces capuchons permettent le raccordement de câbles ronds à 3 conducteurs. Ils permettent le raccordement de la terre du cordon d'alimentation sur un bornier intérieur, ce qui permet, pour les résistances souples avec une trame métallique, de raccorder celle-ci à la terre. Une borne extérieure aussi raccordée à la terre, permet le raccordement des parties métalliques des réservoirs ou des parois réchauffées. Le remplissage du capuchon par une résine silicone rend l'ensemble extrêmement résistant à l'arrachement et garanti un degré d'étanchéité IP65.



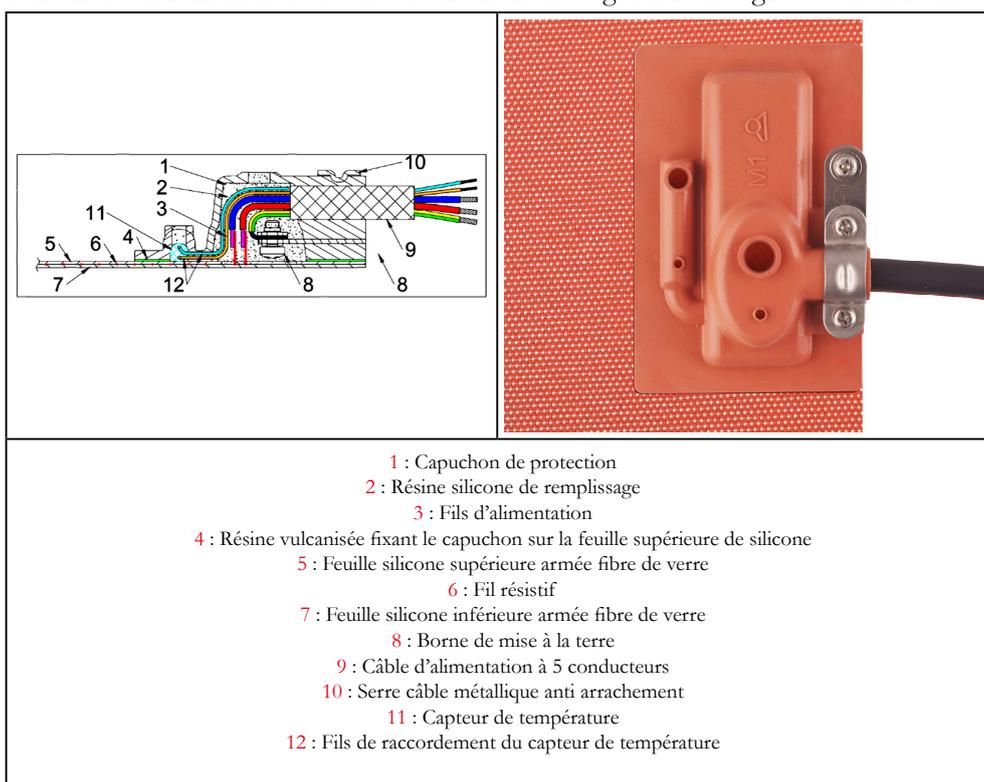
Raccordement de **câble et de limiteur de température** sur résistances chauffantes souples en silicone (IP65)

Ces capuchons permettent le raccordement de câbles ronds à 3 conducteurs. Ils permettent tout d'abord le raccordement de la terre du cordon d'alimentation sur un bornier intérieur, ce qui permet, pour les résistances souples avec une trame métallique, de raccorder celle-ci à la terre. Une borne extérieure aussi raccordée à la terre, permet le raccordement des parties métalliques des réservoirs ou des parois réchauffées. Ils permettent ensuite le raccordement d'un limiteur de température en série sur la résistance chauffante. Le remplissage du capuchon par une résine silicone rend l'ensemble extrêmement résistant à l'arrachement et garanti un degré d'étanchéité IP65.



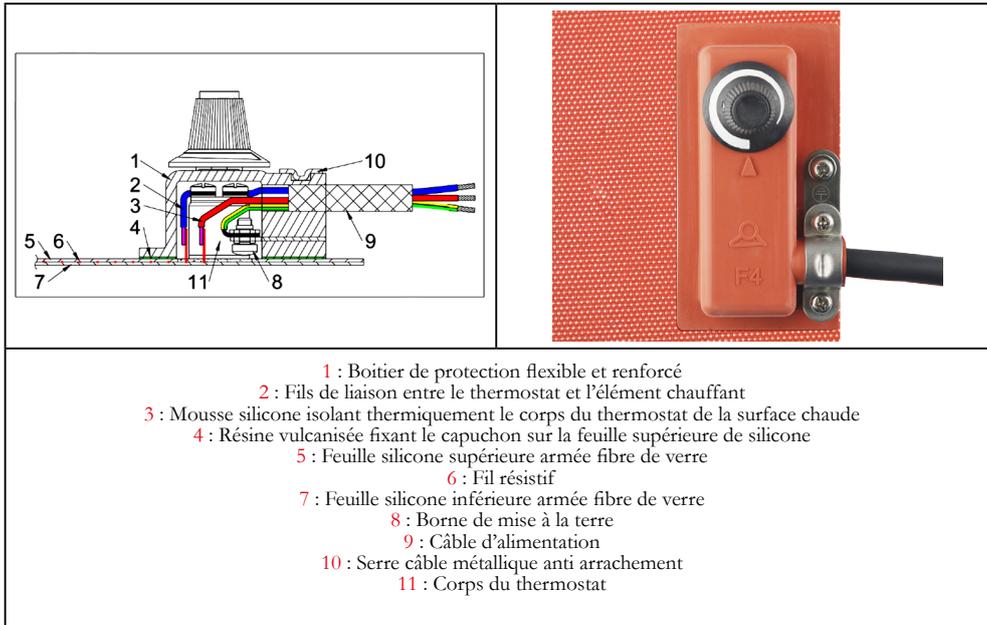
Raccordement de câble et de capteur de température sur résistances chauffantes souples en silicone (IP65)

Ces capuchons permettent le raccordement de câbles ronds à 5 conducteurs. Ils permettent tout d'abord le raccordement de la terre du cordon d'alimentation sur un bornier intérieur, ce qui permet, pour les résistances souples avec une trame métallique, de raccorder celle-ci à la terre. Une borne extérieure aussi raccordée à la terre, permet le raccordement des parties métalliques des réservoirs ou des parois réchauffées. Ils permettent ensuite le raccordement d'un capteur de température à 2 conducteurs (Pt100 à 2 fils, NTC, Thermocouple). Le remplissage du capuchon par une résine silicone rend l'ensemble extrêmement résistant à l'arrachement et garanti un degré d'étanchéité IP65.



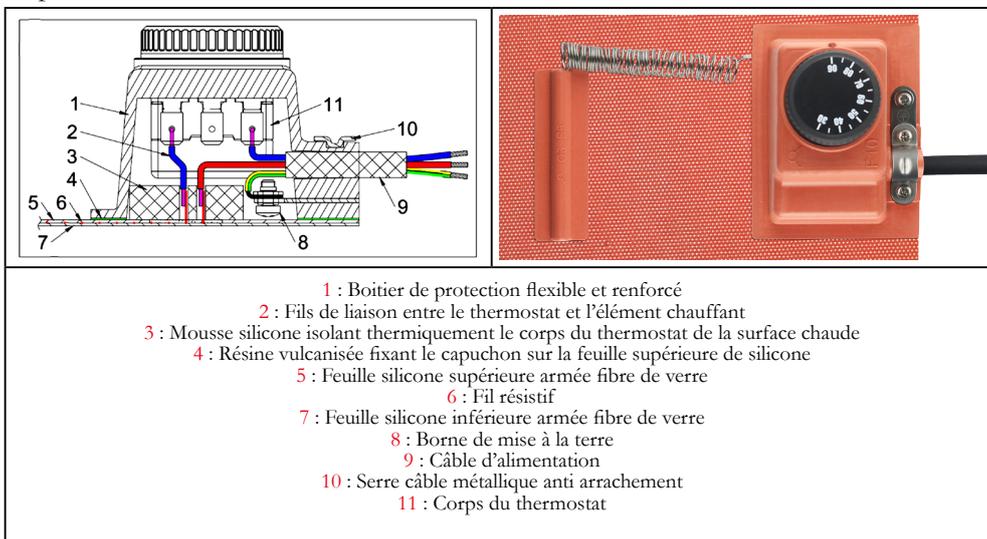
Raccordement de câble et de thermostat bimétallique réglable sur résistance chauffante souples en silicone (IP54)

Ces boîtiers souples permettent le raccordement de câbles ronds à 3 conducteurs. Ils permettent tout d'abord le raccordement de la terre du cordon d'alimentation sur un bornier intérieur, ce qui permet, pour les résistances souples avec une trame métallique, de raccorder celle-ci à la terre. Une borne extérieure aussi raccordée à la terre, permet le raccordement des parties métalliques des réservoirs ou des parois réchauffées. Ils permettent ensuite le raccordement d'un thermostat réglable bimétallique mesurant la température de la paroi située sous sa face inférieure. Les larges surface de vulcanisation du boîtier sur la paroi chauffante rendent l'ensemble extrêmement résistant à l'arrachement. Le degré de protection de ce modèle est IP54.



Raccordement de câble et de thermostat réglable à bulbe et capillaire sur résistance chauffante souples en silicone (IP54)

Ces boîtiers souples permettent le raccordement de câbles ronds à 3 conducteurs. Ils permettent tout d'abord le raccordement de la terre du cordon d'alimentation sur un bornier intérieur, ce qui permet, pour les résistances souples avec une trame métallique, de raccorder celle-ci à la terre. Une borne extérieure aussi raccordée à la terre, permet le raccordement des parties métalliques des réservoirs ou des parois réchauffées. Ils permettent ensuite le raccordement d'un thermostat réglable à bulbe et capillaire. Une plaque en mousse silicone isolante garanti l'isolation thermique du corps du thermostat de la paroi chauffante. Les larges surface de vulcanisation du boîtier sur la paroi chauffante rendent l'ensemble extrêmement résistant à l'arrachement. Le degré de protection de ce modèle est IP54.



5-7. Paramètres d'isolation électrique des éléments chauffants flexibles en silicone

Résistance d'isolement à froid

La résistance d'isolement décroît avec la longueur de fil chauffant utilisé. Si cette longueur peut descendre à quelques mètres dans les éléments chauffants de petite taille, elle peut dépasser plus de 250 mètres sur les modèles les plus grands.

Les valeurs d'isolement mesurées à la température ambiante sont réalisées à 100% en production. Notre limite minimale d'acceptation est de 0.1Gohms (soit **100 x** la limite de la norme EN60335-2-17 § 19.112.3).

Cette mesure est effectuée avec l'élément chauffant repris entre deux feuilles métalliques couvrant la totalité de la surface et pressées l'une contre l'autre avec une charge de 35 DaN/m².



Dispositif de mesure de la résistance d'isolement.
Les valeurs mesurées sont toujours supérieures à 0.1Gohm

Tension de claquage à froid

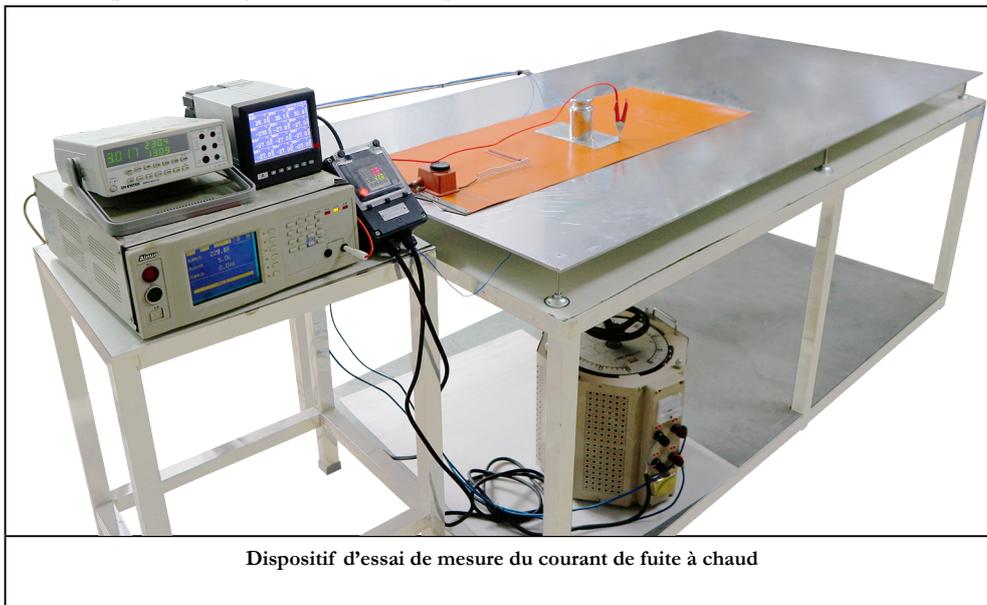
Dans tous les éléments chauffants protégés, il existe un courant de fuite passant au travers de leur isolation. Ce courant de fuite augmente avec la tension appliquée. Dans le cas des éléments souples en silicone, un essai en production de la mesure du **courant de fuite total** est réalisé en plaçant la couverture entre deux plaques métalliques et en appliquant une tension de 1750 volts entre les conducteurs et les plaques métalliques selon 60-335-2-17 § 22.115. En application des norme EN60519-1, le courant de fuite maximum admis à froid pendant **1 minute** est fonction de l'intensité nominale de la résistance chauffante, il est de 3mA pour les intensités inférieures à 7A (1600W en 230V) et de 0.5mA par ampère pour les intensités supérieures (par exemple 10mA pour 2000W, 15mA pour 3000W). La valeur importante du courant de fuite sur les résistances de grandes dimensions impose leur raccordement sur un circuit d'alimentation électrique protégé par un disjoncteur différentiel taré à 20mA.



Equipement de mesure du courant de fuite total à froid

Courant de fuite à la température d'utilisation

La mesure du courant de fuite sur les surfaces accessibles à chaud, est un paramètre destiné à vérifier la sécurité d'un appareil pour éviter des chocs électriques lorsqu'on le touche alors qu'il est en fonctionnement. **C'est une manière de vérifier que son isolation électrique ne se dégrade pas et reste suffisante lorsque la température de fonctionnement est atteinte.** Les essais consistent, en conformité avec les articles des normes EN60335-1-13.1 et 13.2, à placer une plaque métallique de 10 x 20 cm (simulant la taille d'une main) sur l'élément chauffant, et à mesurer le courant passant entre cette plaque et les conducteurs sous tension lorsque l'élément chauffant a atteint sa température maximale, qui peut atteindre 200°C pour certains modèles. La valeur limite du courant de fuite est de 0.75mA sous 240V. Nos essais sont validés par une valeur moyenne de 3 à 6 mesures (selon la surface) effectuées à des emplacements différents, sous une puissance égale à 1.15 fois la puissance nominale.



Dispositif d'essai de mesure du courant de fuite à chaud

5-8. Conformité Rohs et Reach

Rohs : Les matières utilisées dans les éléments chauffants en silicone sont conformes à la directive Européenne 2015/863, annexe II modifiant la directive 2011/65.

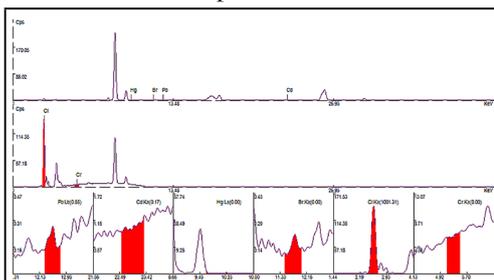
Ces essais font partie du contrôle qualité standard chez Ultimheat, et sont réalisés systématiquement pour la validation de chaque livraison de fournisseur.

Ils sont réalisés dans notre propre laboratoire, avec des instruments de mesure de dernière génération.

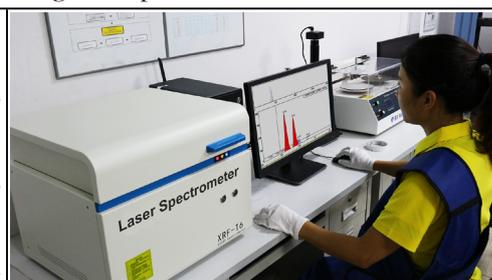
Si souhaité, nous pouvons fournir des certificats réalisés par un laboratoire extérieur agréé.

Reach : Les matières utilisées dans les éléments chauffants en silicone sont conformes aux directives Européennes REACH selon la directive de Juin 2017 ajoutant 173 substances SVHC (Substances of Very High Concern) de la liste publiée par l'ECHA le 12 Janvier 2017, s'appliquant à la directive REACH 1907/2006.

Certificats réalisés par un laboratoire extérieur agréé disponibles sur demande.



Spectrogramme ROHS d'une feuille de silicone armée fibre de verre (Laboratoire Ultimheat)



Analyse spectrométrique en cours (Laboratoire Ultimheat)