

Les fiches techniques

27

Le chauffage industriel Les résistances blindées



27 Résistances blindées

27.1 Généralités – Domaine d'emploi

27.1.1 Rôle

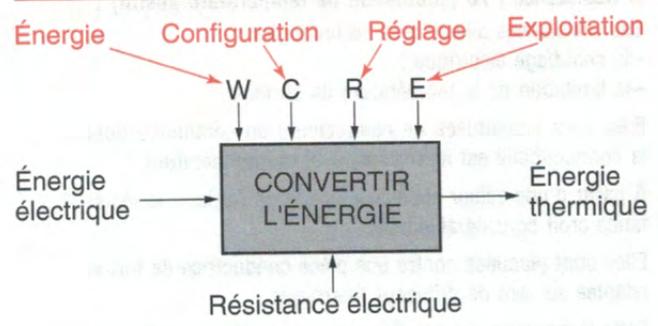
Elles sont utilisées pour le chauffage électrique et permettent de convertir l'énergie électrique en énergie thermique.

■ C'est une application de la loi de Joule :

$$W = R \cdot I^2 \cdot t$$

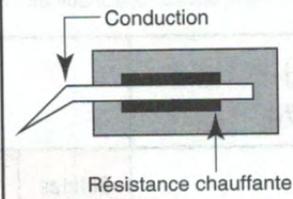
- W : énergie thermique (J) ;
- R : valeur de la résistance (Ω) ;
- I : intensité du courant (A) ;
- t : temps de passage du courant (s).

- Avantages de ce type de chauffage
 - rendement élevé (voisin de 1) ;
 - facilités de mise en œuvre et de régulation ;
 - aucune pollution.



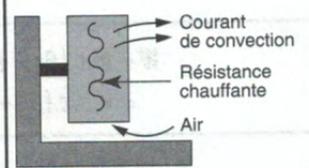
Résistances blindées : modes de transmission de la chaleur

Par **conduction** : à travers des matériaux solides, bons conducteurs de la chaleur.



Ex. : Fer à souder.

Par **convection** : un liquide ou un gaz chauffé se dilate et a tendance à s'élever.



Ex. : Radiateur (convecteur).

27.12

APPLICATION

Tous les domaines de l'activité économique : chauffage domestique, sidérurgie, four de cuisson.

Nature de l'élément à chauffer	Exemples d'application	Présentation de l'élément chauffant	
Chauffage des solides	Table de cuisson	Résistances isolées noyées dans le bloc métallique à chauffer	
	Récipient de forme cylindrique	Colliers chauffants	
	Fer à repasser	Résistances PTC*	
Chauffage des liquides	Chauffage d'un liquide en circulation Chauffage d'un bain de zingage	Thermoplongeurs immergés dans le liquide	
Chauffage de l'air et des gaz	Climatisation Chauffage des locaux en air recyclé, aérotherme	Batterie de résistances à ailettes	

D'après Vulcanic.

■ Résistance PTC (coefficient de température positif) :

Ces résistances allient deux technologies :

- le chauffage électrique ;
- la limitation de la température de surface.

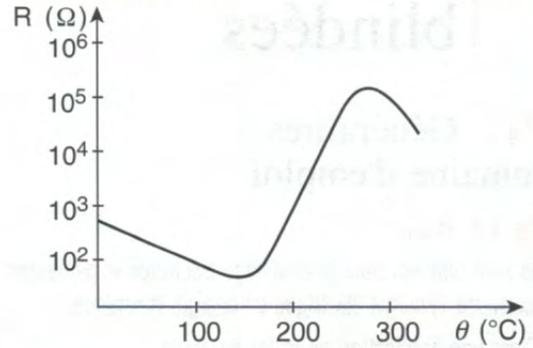
Elles sont constituées de conducteurs en céramique dont la conductibilité est importante à basse température.

À partir d'une valeur appelée « coude de Curie », la résistance croît considérablement.

Elles sont plaquées contre une pièce conductrice de forme adaptée servant de diffuseur thermique.

Cette technologie permet d'assurer une limitation de température automatique, quelle que soit la tension d'alimentation.

CARACTÉRISTIQUE ÉLECTRIQUE D'UNE RÉSISTANCE PTC



27.13 DÉTERMINATION DE LA VALEUR OHMIQUE DE L'ÉLÉMENT CHAUFFANT

L'énergie thermique dissipée dépend de la chaleur spécifique de l'élément à chauffer, de sa masse et des contraintes de température.

$$W = m.c.(\theta_2 - \theta_1)$$

$$= V.\rho.c.(\theta_2 - \theta_1)$$

Principales caractéristiques physiques

	Solides		Liquides et gaz à 15 °C/p.atm				
	ρ	Fusion(°C)	c	ρ	Fusion(°C)	c	
Acier	7,8	1 400	0,435	Air ou azote	0,0013	-	1,046
Aluminium	2,7	660	0,928	Alcool	0,8	72	2,678
Bronze ou laiton	3,4	900	0,418	Eau	1	100	4,186
Béton ou ciment	2,7	-	0,837	Éther	0,74	35	2,260
Cire	2,1	64	3,432	Méthane	0,0055	-	2,093
Cuivre	8,8	1 090	0,376	Gaz carbonique	0,002	-	0,837
Fonte	7,2	1 150	0,544	Huile ou fioul	0,9	-	2,093
Inox	7,8	1 600	0,435	Oxygène	0,0011	-	0,920
Plomb	11,3	327	1,279	Trichloréthylène	1,47	87	0,962

m : masse à chauffer en kg ;
 c : capacité thermique massique en J/(kg.°C) ;
 V : volume à chauffer en dm³ ou litres ;
 ρ : masse volumique en kg/dm³ ;
 θ_1 : température initiale en °C ;
 θ_2 : température finale en °C.

La puissance à installer est fonction de l'énergie thermique et du temps de chauffe :

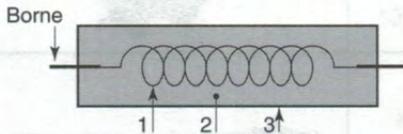
$$P = \frac{W \text{ (joule)}}{t \text{ (seconde)}}$$

On impose la tension efficace U aux bornes de la résistance.

Donc :
$$R = \frac{U^2}{P}$$

27.2 CONSTITUTION DE L'ÉLÉMENT CHAUFFANT

L'élément chauffant comporte trois parties :



- une partie électrique 1 : résistance bobinée dont la valeur est fonction des caractéristiques du matériau utilisé : $R = \rho_1 \times \ell / S$;
- une partie isolante 2 : matériau réfractaire qui entoure la résistance et qui conduit la chaleur vers l'enveloppe ;
- une partie mécanique 3 : enveloppe de protection. Elle communique la chaleur au produit à chauffer.

	Constitution	Caractéristiques
Partie électrique 1	Fil nickel-chrome en résistance bobinée.	- Résistivité élevée : $\rho = 1,08.10^{-6} \Omega.m.$ - Bonne malléabilité.
Partie isolante 2	Magnésie électrofondue.	- Bonne rigidité diélectrique. - Très bonne tenue aux températures élevées ($\theta_{\text{fusion}} = 1\ 500\ ^\circ\text{C}$). - Bonne conduction thermique.
Partie mécanique 3	- Inox : résistances à ailettes ; chauffage de bain acide. - Acier : chauffage de bain d'huile. - Cuivre : chauffage de l'eau.	- Conduction thermique élevée. - Bonne résistance mécanique aux chocs. - Charge spécifique.

27.3

CHARGE SPÉCIFIQUE

<p>La surface d'échange entre l'élément chauffant et le fluide dépend de la nature de ce dernier.</p> <p>Par exemple, les gaz nécessitent une surface d'échange importante obtenue avec des ailettes.</p> <p>Cela se traduit par une caractéristique appelée charge spécifique qui détermine la puissance dissipable par l'enveloppe de protection par unité de surface.</p> <p>Elle s'exprime en W/cm^2.</p> <p>Nota : Pour une même puissance installée, plus les dimensions de l'enveloppe de protection diminuent et plus la charge spécifique augmente.</p>	Valeur		
	Charge spécifique (W / cm^2)	Constitution de l'enveloppe de protection	Domaine d'emploi
	2	Acier huilé	Thermoplongeur immergé dans l'huile
	4 à 6	Inox décapé dépassivé	Résistance à ailettes, radiateur à bain d'huile ou acide
8	Cuivre nickelé	Thermoplongeur immergé dans l'eau	

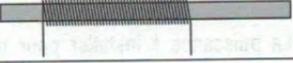
La valeur de la charge spécifique est fonction :

- de l'écart de température entre la surface de l'élément chauffant et l'air (pour une résistance à ailettes) ou le liquide pour un thermoplongeur ;
- d'un coefficient d'échange variable (pour une résistance à ailettes, il dépend du nombre d'ailettes et du type de convection ou de ventilation).

Une valeur non adaptée peut entraîner une surchauffe excessive de l'élément résistant (destruction du thermoplongeur) et un danger dans le cas de chauffage de liquides tel l'huile ou le fioul (détérioration du liquide à chauffer).

27.4

FABRICATION DE L'ÉLÉMENT CHAUFFANT

Séquence de fabrication	Activités recherchées
① Bobinage du fil résistant	Fabrication de l'élément résistant. Le fil est bobiné sur un mandrin. On obtient des spires jointives. 
② Bornage	Raccordement, par soudage, de bornes aux extrémités de l'élément résistant : connectique.
③ Étirage à chaud	Séparer les spires jointives par étirage à chaud. L'élément chauffant est traversé par un courant dont l'intensité est suffisante pour le porter à incandescence. Son étirage est rendu plus aisé par une meilleure élasticité.
④ Positionnement dans l'enveloppe de protection	Centrage de l'élément chauffant. 
⑤ Injection de magnésie	Isolation électrique entre l'élément chauffant et l'enveloppe de protection par injection de magnésie tout en conservant une bonne conduction thermique.
⑥ Laminage	Tasser au maximum la magnésie.
⑦ Recuit	Diminuer la dureté de l'enveloppe de protection.
⑧ Formage	Donner à l'élément chauffant sa forme géométrique (droite ou courbe) finale en fonction des contraintes d'utilisation et d'encombrement.
⑨ Mise en place des épingles sur bride	Pour un thermoplongeur triphasé, les trois éléments chauffants (ou trois épingles) sont reliés mécaniquement sur une fixation appelée bride.
⑩ Étuvage	Diminuer au maximum le taux d'humidité de la magnésie
⑪ Essais d'étanchéité	Vérification de l'étanchéité dans le cas d'un élément chauffant immergé dans un liquide.
⑫ Essais diélectriques	Vérifier la tension d'isolement de l'élément chauffant à 1,5 kV ou à $(2 \times U) + 1\ 000$ pour l'air et de 3 à 5 kV lorsque l'élément est immergé dans un liquide.

27.5

CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE INDUSTRIEL
CALCUL DE LA PUISSANCE À INSTALLER

27.51

CHAUFFAGE D'UN VOLUME DE LIQUIDE CONTENU DANS UNE CUVE

La puissance à fournir pour chauffer un volume V de liquide dans un temps T désiré est donnée par la relation :

$$P(\text{kW}) = \frac{V \cdot \rho \cdot c \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{T}$$

V : volume à chauffer en litres ou dm^3 ;
 ρ : masse volumique en kg/dm^3 ;
 c : capacité thermique massique $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;
 T : temps de chauffe en secondes ;
 θ_1 : température initiale en $^\circ\text{C}$;
 θ_2 : température finale en $^\circ\text{C}$.

APPLICATION NUMÉRIQUE :

On désire chauffer 100 litres d'eau de 20°C à 70°C en 1 heure.
 Calcul de la puissance P nécessaire :
 (rappel pour l'eau : $c = 4\,186 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ et $\rho = 1 \text{ kg}/\text{dm}^3$).

$$P = \frac{100 \times 4\,186 \times 1 \times (70 - 20)}{3\,600} = 5,8 \text{ kW}$$

Influence des déperditions de chaleur

Le volume étant porté à la température désirée, il faut tenir compte ensuite des déperditions de chaleur.

Ces pertes thermiques dépendent du type de calorifugeage de la cuve et du temps durant lequel le volume de liquide doit être maintenu à la température désirée.

La puissance à installer pour tenir compte des déperditions de chaleur se calcule par la formule :

$$P_1 = K \cdot P$$

K est approximatif et suppose l'élément chauffant entièrement immergé dans le liquide à chauffer.

Tableau des coefficients K à utiliser

Cuve non calorifugée

Volume (m^3) \backslash Temps	$t \leq 1 \text{ h}$	2 h	5 h	10 h	20 h
	0,1	1,1	1,2	1,4	1,7
1	1,05	1,1	1,2	1,3	1,6
10	1,03	1,05	1,21	1,2	1,3

Cuve calorifugée

Volume (m^3) \backslash Temps	$t \leq 1 \text{ h}$	2 h	5 h	10 h	20 h
	0,1	1	1,05	1,1	1,2
1	1	1	1,05	1,1	1,2
10	1	1	1	1,05	1,1

27.52 INTRODUCTION PÉRIODIQUE DE PIÈCES OU DE LIQUIDE DANS UN VOLUME DE LIQUIDE

Le bain étant chaud (température θ_2), le calcul de la puissance à installer se décompose ainsi. On calcule :

- la puissance P_1 pour élever le bain de la température θ_1 à la température θ_2 dans un temps prévu ;
- la puissance d'entretien P_2 .

P_2 représente la somme de la puissance P_f (nécessaire pour compenser les déperditions thermiques) et de la puissance P_e (nécessaire pour réchauffer les produits introduits périodiquement).

$$P_2 = P_f + P_e$$

$$P_f = 2 \cdot P_1 \times \frac{K-1}{K}$$

$$P_e(\text{kW}) = \frac{m \times c \times (\theta_2 - \theta_1) \times 1,1}{3\,600}$$

m représente le poids en kg de pièces introduites par heure ;
 c , la capacité thermique massique des pièces introduites.
 Le coefficient 1,1 tient compte du liquide entraîné au moment où l'on retire les pièces du bain.

27.53

OPTIMISATION DU CHAUFFAGE

On choisit pour dimensionner le thermoplongeur, la plus élevée des puissances P_1 ou P_2 .

Pour optimiser le chauffage, il est intéressant d'obtenir $P_1 = P_2$ sous réserve que d'autres contraintes (dimensions des cuves, débit maximum possible, ...) ne l'empêchent pas.

Si P_1 est supérieure à P_2 , on peut :

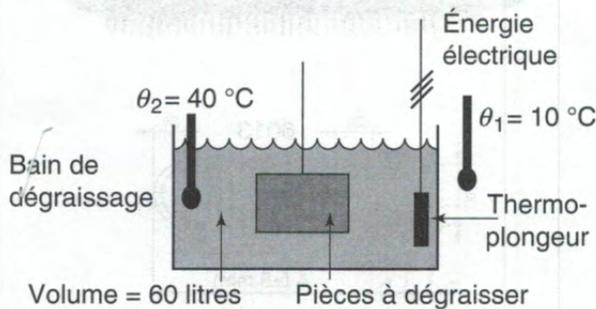
- introduire plus de pièces par heure ainsi P_2 augmente jusqu'à la valeur P_1 ;
- augmenter le temps T de mise en chauffe ainsi P_1 diminue jusqu'à la valeur P_2 .

27.54

EXEMPLE D'APPLICATION

Dans une chaîne de traitement de surface, les pièces avant zingage nécessitent un dégraissage.

- Le bain de dégraissage doit être porté à la température de 40 °C. On désire chauffer le volume de liquide du bain de dégraissage (60 litres).
- La montée en température de 10 °C à 40 °C s'effectue en 30 min.
- La cuve est non calorifugée et doit rester à la température désirée durant 5 heures de suite.
- La masse des pièces introduites est de 100 kg/h.
- La température initiale des pièces est de 10 °C.
- On considère que les caractéristiques (ρ et c) du liquide de dégraissage sont égales à celles de l'eau.
- Les pièces introduites sont en acier : $c = 0,435$.

**Conclusion :**

Pour optimiser le chauffage du bain de dégraissage, il faut choisir un thermoplongeur d'une puissance au moins égale à 3,9 kW.

a) Calculs de la puissance P_1 à installer et de la puissance d'entretien P_2

$$P = \frac{60 \times 1 \times 4186 \times (40 - 10)}{3600 \times 0,5} = 4,2 \text{ kW.}$$

$$K = 1,4 \Rightarrow P_1 = P \times K = 5,9 \text{ kW.}$$

$$P_f = \frac{2 \times 5,86 \times (1,4 - 1)}{1,4} = 3,35 \text{ kW.}$$

$$P_e = \frac{100 \times 435 \times (40 - 10) \times 1,1}{3600} = 0,4 \text{ kW.}$$

$$P_2 = P_f + P_e = 3,75 \text{ kW ;}$$

$P_1 > P_2$, on peut optimiser le chauffage.

b) Optimisation du chauffage

On peut augmenter le temps de chauffe du volume de liquide de dégraissage. Ex. : $T = 45$ min.

$$\Rightarrow P = \frac{60 \times 1 \times 4186 \times (40 - 10)}{3600 \times 3/4} = 2,8 \text{ kW.}$$

$$P_1 = 1,4 \times 2,8 = 3,9 \text{ kW.}$$

$$P_f = 2 \times P_1 \frac{(K - 1)}{K} = 2,3 \text{ kW}$$

et augmenter le nombre de pièces à traiter par heure : 300 kg par exemple :

$$\Rightarrow P_e = \frac{300 \times 435 \times (40 - 10) \times 1,1}{3600} = 1,2 \text{ kW.}$$

$$\Rightarrow P_2 = P_f + P_e = 3,5 \text{ kW}$$

$P_2 \approx P_1$: optimisation.

27.6

CRITÈRES DE CHOIX DE L'ÉLÉMENT CHAUFFANT

Outre la puissance à installer, il faut définir l'enveloppe mécanique de protection et son encombrement, les systèmes de fixation et de raccordement de l'élément chauffant.

Pour résoudre chaque problème rencontré dans le domaine de l'électrothermie, il faut définir :

- la puissance à installer ;

- les emplacements disponibles ;
- la nature du liquide, solide ou gaz à chauffer ;
- les températures de surface ;
- la rigidité mécanique souhaitée de l'élément chauffant ;
- l'étanchéité désirée ;
- les risques d'explosion ou d'inflammation fonctions du produit à chauffer.

27.7 Éléments chauffants

27.71 Chauffage de liquide

Thermoplongeur Vulcaloy

Utilisation : Thermoplongeur particulièrement étudié pour le chauffage d'eau perdue ou recyclée (traitée ou non), stagnante ou en circulation, jusqu'à 110 °C/10 bar. Peut être utilisé en présence de toute autre solution aqueuse compatible avec les matériaux et le taux d'émission sélectionnés.

Caractéristiques :

Tension d'alimentation monophasée ou triphasée jusqu'à 440 V nominal (standard 230/400 V TRI).

Longueur non chauffante standard Nc = 95 mm.

Boîtier de raccordement IP 55 en matière plastique rouge auto-extinguible.

Pression d'épreuve : 15 bar.

27.72 Chauffage d'air par convection naturelle ou forcée

Résistance à ailettes rectangulaires 40 × 80

Utilisation :

Chauffage de l'air et des gaz non corrosifs par convection.

Avantages : La présence d'ailettes augmente la surface et le coefficient d'échange. Cette technologie permet donc d'améliorer la densité de puissance par unité de volume afin de concevoir des batteries de chauffe compactes. Le tube chauffant et les ailettes en acier protégé supportent sans dégradation des températures de surface jusqu'à 400 °C (ceux en inox jusqu'à 650 °C).

27.73 Chauffage de formes

Rubans chauffants autorégulants

Ils sont prévus pour le maintien en température ou le chauffage de cuves et de tuyauteries métalliques.

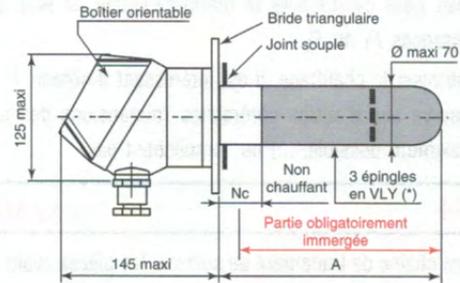
Grâce à sa limitation progressive de température, le ruban autorégulant s'adapte aux variations de température de l'élément à chauffer.

Le ruban est constitué de deux conducteurs en cuivre noyés dans un élément dont la résistivité varie avec la température.

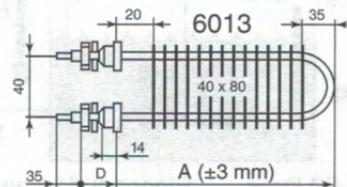
L'augmentation de la valeur ohmique avec la température autolimité la quantité de chaleur dégagée.

D'après Vulcanic.

THERMOPLONGEUR VULCALOY



RÉSISTANCE À AILETTES RECTANGULAIRES 40 × 80



RUBANS CHAUFFANTS AUTORÉGULANTS

