



Chauffage infrarouge

Jean Callebaut, Laborelec

Décembre 2006

1	<i>Introduction</i>	3
2	<i>Principes physiques</i>	3
2.1	Le spectre électromagnétique	3
2.2	Le rayonnement des corps	3
2.3	Absorption du rayonnement.....	4
2.4	Transfert énergétique par rayonnement.....	5
3	<i>Installations électriques à infrarouges</i>	6
3.1	Les radiateurs.....	6
3.2	Les réflecteurs.....	6
3.3	L'isolement.....	6
3.4	La régulation de puissance.....	7
3.5	Choix du radiateur.....	8
4	<i>Caractéristiques d'une installation électrique à infrarouges</i>	9
5	<i>Applications industrielles</i>	11
5.1	Industrie des procédés en métallurgie	11
5.2	Les espaces chauffés.....	11
6	<i>Conclusions</i>	12
7	<i>Références et bibliographies</i>	12

European Copper Institute



L'European Copper Institute est une joint venture Européenne entre les principaux producteurs de cuivre mondiaux et les fabricants Européens de demi-produits. Créé en 1996, l'ECI assure la promotion du cuivre en Europe avec un réseau de 11 centres de développement basés en Allemagne, au Benelux, en Espagne, en France, en Grèce, en Hongrie, en Italie, en Pologne, au Royaume Uni, en Scandinavie et en Russie. L'ECI poursuit les efforts initialement engagés par le Copper Products Development Association, créé en 1959, et de l'INCRA (International Copper Research Association) créé en 1961.

Centre d'Information du Cuivre, Laiton & Alliages et Copper benelux



Ce sont les organisations professionnelles des producteurs et des transformateurs de cuivre chargées de promouvoir les applications du cuivre et de ses alliages sur les marchés français et du Benelux. Financés par les producteurs de cuivre du monde entier et par les sociétés fabricants de demi-produits, le Centre d'Information du Cuivre et Copper benelux mettent en oeuvre des programmes de développement sur leurs marchés respectifs en coordination avec les structures professionnelles internationales de leurs mandants : International Copper Association au niveau mondial, European Copper Institute au niveau Européen. Ils ont pour vocation de produire et de diffuser l'information technique relative au cuivre et à ses alliages, de faire connaître les meilleures méthodes de mise en oeuvre des produits dans chacun de leur domaine d'emploi et d'en promouvoir l'utilisation dans les grands secteurs d'application. Le Centre d'Information du Cuivre et Copper benelux sont les coordinateurs respectivement pour la France et le Benelux du programme européen Leonardo relatif à la formation en matière de «Power Quality».

Remerciements

Ce projet a été mis en oeuvre avec le soutien de la Communauté Européenne et l'International Copper Association Ltd.

Avertissement

Le contenu de ce projet ne reflète pas nécessairement la position de la Communauté Européenne. De même, il n'implique aucune responsabilité de la part de la Communauté Européenne. L'European Copper Institute, le Centre d'information du Cuivre et Copper benelux déclinent toutes responsabilités pour toutes conséquences directes ou indirectes ou les dommages qui pourraient résulter de l'utilisation du contenu ou de l'incapacité à utiliser les informations et les données de ce guide.

1 Introduction

Le rayonnement infrarouge est de même nature que le rayonnement émis par le soleil. Une source de chaleur à haute température émet des ondes infrarouges qui sont, par la suite, absorbées par un corps froid. Ainsi, la chaleur est transférée essentiellement par rayonnement électromagnétique, sans intermédiaire.

A l'intérieur des fours à résistance à haute température, la chaleur est également transférée à une large surface par rayonnement. Cependant, concernant le chauffage par infrarouges, la source de chaleur irradie le corps directement. Parfois, des surfaces réfléchives sont utilisées pour concentrer ou dévier les rayons. Le chauffage par infrarouges est typiquement une technique de traitement de surface et est préférentiellement dédié au chauffage de produits de forme géométrique simple.

2 Principes physiques

2.1 Le spectre électromagnétique

Le rayonnement infrarouge est une forme du rayonnement électromagnétique. Dans le spectre des fréquences électromagnétiques, la zone des ondes infrarouges est comprise entre la lumière visible et les micro-ondes, ce qui revient à dire que la zone est comprise entre 0,76 et 1000 μm (longueur d'ondes). Cependant, seule la zone située entre 0,76 μm et 10 μm est intéressante pour les procédés de chauffage industriels. Dans cette zone, trois régions sont traditionnellement distinguées :

- les ondes infrarouges proches 0,76 – 2 μm
- les ondes infrarouges moyennes 2 – 4 μm
- les ondes infrarouges lointaines 4 – 10 μm

2.2 Le rayonnement des corps

Le rayonnement thermique qui est transmis à travers une surface se compose de spectres continus de longueur d'ondes. La décomposition spectrale et la quantité d'énergie rayonnée dépendent de la température de la surface et de son état.

Les propriétés de rayonnement des corps sont traditionnellement étudiées en utilisant le concept du corps noir. Un corps noir est par définition un corps qui absorbe tous les rayonnements qu'il reçoit ($\alpha=1$). Il peut être démontré que ce corps émet à une température donnée, plus de rayonnement qu'un autre corps.

Deux lois essentielles décrivent le phénomène de rayonnement :

1) Loi de Stefan-Boltzmann :

La puissance totale par unité de surface rayonnée est proportionnelle à la quatrième puissance de la température de la surface.

$$M = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

σ : constante expérimentale de Stefan-Boltzmann $5,73 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4\text{)}$

T : température absolue de surface (K)

ε : coefficient d'émissivité

Le coefficient d'émissivité ε est dépendant de la température, des propriétés du corps rayonnant et de la longueur d'onde. Pour des applications industrielles, ε sera considéré comme une constante dont la valeur choisie est représentative de l'échelle de température concernée et de l'état de la surface. Ce corps est alors connu sous le nom de corps « gris » (avec ε constant).

2) La loi de Wien

Cette loi donne une expression de la longueur d'onde lorsque l'émissivité monochromatique est maximale.

$$\lambda_{\max} \times T = C$$

λ_{\max} : longueur d'onde (μm)

T : température absolue de surface (K)

C : $2898 \mu\text{m}\times\text{K}$

La loi de Wien est importante dans la pratique pour le choix d'un radiateur à infrarouges. En dernier ressort, la température du radiateur sera souvent choisie de façon à obtenir λ_{\max} aux alentours du maximum du spectre d'absorption de l'objet qui doit être chauffé. C'est de cette manière que l'on obtient un chauffage efficace.

2.3 Absorption du rayonnement

La réussite d'une application infrarouges est, pour une surface de grande étendue, dépendant du comportement d'absorption du matériau à chauffer. Seuls les rayonnements absorbés sont convertis en chaleur.

Deux propriétés importantes du transfert d'énergie par rayonnement doivent être prises en compte lors de l'utilisation du chauffage par infrarouges.

1. La position relative du rayonnant et du récepteur est importante ($\cos \alpha_1, \cos \alpha_2$).
2. Plus la distance entre l'émetteur et le récepteur est élevée, moins la densité de puissance reçue est importante ($1/R^2$).

En réalité, seule une fraction du rayonnement incident est absorbée et convertie en chaleur. Le coefficient d'absorption est défini comme étant le ratio entre le flux absorbé et le flux incident. Le coefficient α est souvent dépendant de la longueur d'onde du rayonnement incident. Lors de la conception d'une installation de chauffage par infrarouges, ce comportement est un facteur déterminant : il détermine le choix du rayonnement optimal de l'élément.

Par ailleurs, le coefficient d'absorption est également conditionné par les propriétés de la surface irradiée : rugosité de la surface, propriétés chimiques, couleur, épaisseur du matériau, température etc....

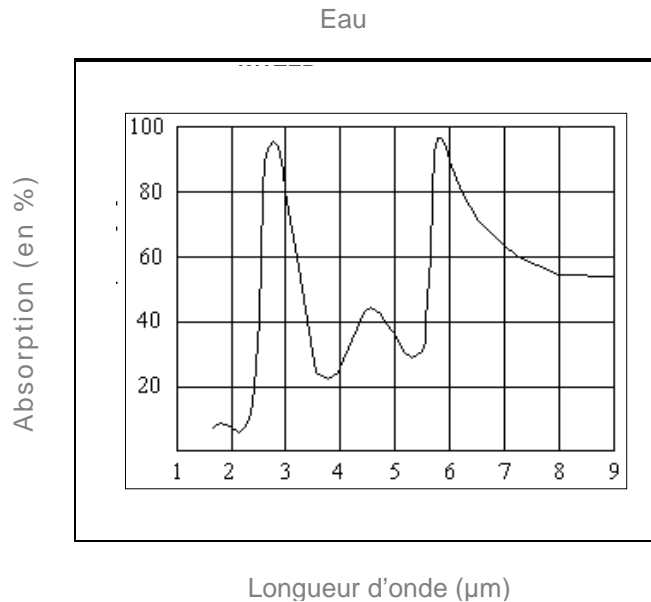


Figure 1 : Spectre d'absorption de l'eau

2.4 Transfert énergétique par rayonnement

Le transfert énergétique est complètement déterminé par la température des deux corps, de leur forme et de leurs positions respectives.

La formule de la puissance incidente est la suivante (surface rayonnante A1 et surface irradiée A2).

$$P = \sigma \cdot \epsilon' \cdot A_1 \cdot F_{12} \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

σ : constante expérimentale de Stefan-Boltzmann $5,73 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$

ϵ' : coefficient d'émissivité généralisé

A_1 : surface rayonnante [m^2]

F_{12} : facteur de forme (A_2 vu de A_1)

T_1 : température de la surface rayonnante (K)

T_2 : température de la surface irradiée(K)

Le facteur de forme F_{12} est sous dimensionné et est déterminé par la géométrie, la distance et la position des deux surfaces respectives. Pour des configurations viables, les coefficients de formes sont disponibles sous forme de diagramme.

3 Installations électriques à infrarouges

3.1 Les radiateurs

Les radiateurs électriques à infrarouges existent sous de multiples formes. La forme est avant tout déterminée par le type de rayonnement infrarouge que l'on souhaite obtenir. Il s'agit, la plupart du temps, de lampes, de tubes ou de panneaux. Les radiateurs à ondes électromagnétiques courtes possèdent de hautes températures de fonctionnement (2000°C et plus) et un pouvoir de densité extrêmement élevé (cf. loi de Stefan-Boltzmann).

La température de fonctionnement des radiateurs à ondes moyennes est située entre 900 et 1500°C. Les infrarouges ondes longues sont obtenus avec des températures de fonctionnement allant de 400 à 800°C. Tous les radiateurs électriques à infrarouges utilisent le principe de l'effet joule : un élément résistif est chauffé par le passage d'un courant électrique.

3.2 Les réflecteurs

Equivalent à la lumière visible, la lumière d'un système à rayonnements infrarouges se propage en ligne droite. Des réflecteurs sont utilisés dans le but de concentrer de façon optimale les faisceaux infrarouges vers l'objet qui doit être chauffé.

En général, l'aluminium ou l'acier inoxydable poli sont utilisés comme matériaux réflecteurs. Des périodes d'entretien sont nécessaires afin de prévenir une perte d'efficacité. Lorsque la densité de puissance est grande, le refroidissement nécessaire doit être installé dans le fond du réflecteur.

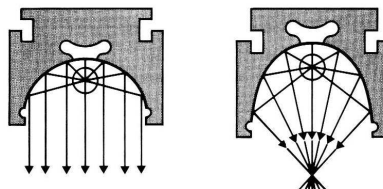


Figure 2 : exemple de géométries de réflecteurs

3.3 L'isolement

Concernant le chauffage infrarouges à ondes moyennes et longues, la proportion d'un transfert de chaleur par convection peut atteindre 50% et plus. Ce n'est bien sûr pas négligeable et, en conséquence, le four doit être totalement isolé.

Dans le cas d'un rayonnement infrarouges à ondes courtes, la part du transfert de chaleur par convection n'est pas significative.

Cependant, les parois du four sont souvent recouvertes de plaques réfléchissantes en aluminium qui (si elles ne sont pas propres) absorbent une partie du rayonnement, ce qui diminue les performances. Les isoler augmentera leur température de surface. Une partie de la chaleur absorbée est restituée sous la forme secondaire de rayonnement en ondes longues.

Dans beaucoup d'applications de chauffage infrarouge, la vapeur (eau ou solvant) doit être évacuée. Cette extraction doit être limitée au strict minimum nécessaire. Dans ce cas précis, le chauffage par infrarouges possède un avantage substantiel du point de vue énergétique en comparaison à des fours traditionnels par convection. La température ambiante dans le four restera relativement basse puisque que le rayonnement chauffe directement le produit. Si l'on désire chauffer un produit aux alentours de 150 à 200°C par exemple, la température de l'air devra être d'une centaine de degrés environ. Dans les fours par convection, cette température sera approximativement de 350 - 400°C.

3.4 La régulation de puissance

La puissance peut être réglée de plusieurs manières :

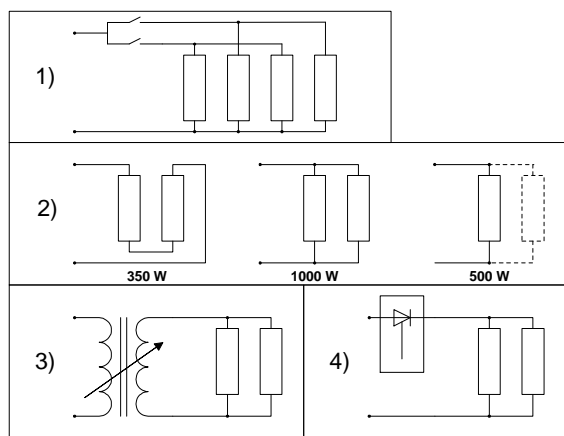


Figure 3 : La régulation de puissance

Chacune de ces techniques possèdent ses avantages et ses inconvénients, comme cela est indiqué dans le tableau suivant :

	Avantages	Inconvénients
Commutation d'unité chauffante	Pas d'harmoniques (PF=1) Spectre infrarouge constant	Densité de puissance non uniforme
Commutation série/parallèle Commutation étoile/triangle	Pas d'harmoniques (PF=1)	Répartition de la puissance non uniforme Variation du spectre du rayonnement infrarouge
Régulation de tension avec transformateur	Pas d'harmoniques Régulation de tension en continu possible	Coûteux, solution compliquée Variation du spectre du rayonnement infrarouge
Régulation de courant par thyristors (angle de phase ou trains d'ondes)	Régulation continue possible pas de parties en mouvement	Besoin d'un correcteur de facteur de puissance Variation du spectre du rayonnement infrarouge

Mesurer la température d'une installation infrarouge est moins aisée que dans les fours conventionnels. Cela provient du fait qu'effectuer une mesure de température de l'air n'est pas habituelle. Une régulation correcte est possible uniquement si l'on possède un ordre de grandeur de la température de la surface du produit.

3.5 Choix du radiateur

La première étape vise à déterminer les longueurs d'onde requises pour le process. Le facteur primordial est le comportement d'absorption du produit à chauffer. Dans la plupart des cas, il vaut mieux faire coïncider les longueurs d'ondes rayonnées avec le maximum du spectre d'absorption. L'accent doit être mis sur le fait que le spectre d'absorption dépend de la température, de la rugosité du matériau, de la couleur et de l'état de la surface du matériau.

Toutefois, d'autres critères peuvent jouer un rôle dans le choix des radiateurs électriques :

- les formes irrégulières sont traitées pour obtenir un résultat plus homogène par des longueurs d'onde plus élevées (longueurs d'ondes moyennes et longues) car une importante partie de l'échauffement a lieu par convection.
- lorsque des surfaces de couleurs différentes doivent être chauffées simultanément, les longueurs d'ondes longues peuvent être un avantage ; cela est moins restrictif (spectre plus large) et la proportion élevée de chauffage par convection permet un traitement à température homogène.
- les fortes densités de puissance sont obtenues en travaillant avec des ondes courtes infrarouges (ex : mise à niveau d'une installation de séchage)
- lorsque la production est fréquemment interrompue, des radiateurs à ondes courtes seront alors requis ; les radiateurs à ondes longues possèdent une grande inertie thermique, ce qui nécessite des mesures spéciales de protection contre les sur-réchauffements ou la combustion de produits.
- les radiateurs à ondes moyennes et longues sont robustes et résistent mieux aux chocs thermiques et mécaniques.
- les procédés de traitement de papier et de tissus de tailles différentes nécessitent une flexibilité apportée par des radiateurs séparés. Des tubes quartz à ondes courtes ou moyennes sont généralement nécessaires.

La puissance nécessaire peut être estimée en prenant en compte les vitesses de production souhaitées, les profils de température nécessaires, les caractéristiques des produits (densité, chaleur spécifique, chaleur latente, réaction à la chaleur, conductivité), les pertes thermiques, les moyens de récupération de chaleur, etc.

4 Caractéristiques d'une installation électrique à infrarouges

Economies d'espace

Une installation électrique de chauffage par infrarouges est de dimension plusieurs fois plus petite que celle d'un four à air chaud. C'est une conséquence directe des grandes densités de puissance offerte par l'excellent transfert de chaleur du radiateur au produit. L'installation en elle-même et les connexions électriques sont simplissimes. L'approvisionnement en fuel et l'évacuation des gaz de combustion ne sont pas nécessaires. Les unités de production de chauffage infrarouge sont, pour la plupart, de petites structures et si la capacité évolue, l'installation, avec un minimum de dépenses, peut s'agrandir en ajoutant un nombre de radiateurs supplémentaires ou par réadaptation de la puissance électrique.

Les radiateurs infrarouge peuvent, dans de nombreux cas, être totalement intégrés dans des installations existantes. De cette manière, il est possible, par exemple, d'augmenter la capacité de production d'une installation existante.

La régulation

La régulation électronique de la puissance est flexible, rapide et précise. Les sondes de température ont besoin d'être installées à des endroits stratégiques et les précautions nécessaires doivent être prises car cette mesure est représentative de la température du produit.

Les contrôles de température et de temps peuvent être inclus sur un certain nombre de lignes de production et sont totalement automatisés.

Consommation d'énergie

Les radiateurs infrarouges agissent surtout en chauffant la couche surfacique. Dans la pratique, il y a par conséquent quelques pertes de chaleur par convection.

Une source de rayonnement à ondes courtes convertit 90% de l'énergie électrique en rayonnement infrarouges. 70% de ce rayonnement est directement utilisé sur le produit. Celui-ci est naturellement fortement dépendant des paramètres de réflexion et d'absorption, en rapport avec le coefficient de surface du produit. En général, il peut être admis que la consommation d'énergie dans des systèmes infrarouges est plusieurs fois inférieure à celles des systèmes à air chaud. Une installation à infrarouges est assimilable à une forte résistance et possède des effets positifs sur le facteur de puissance.

Capacité de production

Par rapport aux systèmes à air chaud, il est possible d'obtenir des vitesses de production sensiblement plus élevées, grâce aux densités de puissance extrêmement intenses des radiateurs. A la mise en route, la totalité de la capacité de production est rapidement disponible pour l'utilisation car les éléments chauffés possèdent une faible inertie thermique. La figure suivante indique de manière qualitative comment le temps de production peut être réduit. Une réduction de ces temps par un coefficient 3 ou 4 est tout à fait réaliste.

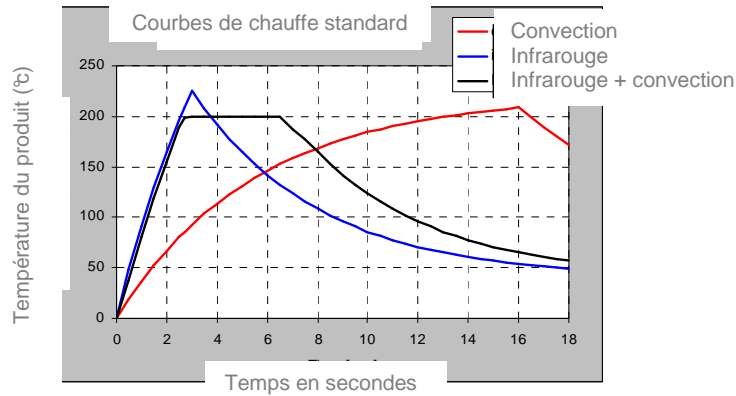


Figure 4: Courbes de chauffe standard lorsque le chauffage par infrarouges et/ou le chauffage à air chaud sont utilisés.

Maintenance et durée de vie

La durée de vie est largement dépendante des propriétés caractéristiques et des conditions d'utilisation. Dans une atmosphère polluée à l'intérieur d'un four ou si des solvants s'évaporent, l'ensemble radiateur et réflecteurs peut s'encrasser, voire se détériorer. Un nettoyage régulier est recommandé. L'utilisation d'un ventilateur pour des équipements à infrarouges peut réduire la corrosion ou la contamination par gaz ou par poussière.

Conditions d'utilisation

Un four à infrarouges ne crée pas de nuisance sonore et d'autre part n'induit pas l'apparition de « points chauds ». Les radiateurs à infrarouges qui sont utilisés pour chauffer un espace peuvent avoir un effet bénéfique sur l'environnement de travail : il n'existe pas de circulation d'air, et il n'est pas nécessaire d'évacuer les poussières. L'exploitation et la maintenance sont simples.

Qualité

Les installations électriques à infrarouges augmentent la qualité du produit fini. Les processus de séchage à infrarouges permettent d'obtenir un taux d'humidité extrêmement faible. En ajoutant une fine régulation de température et des niveaux de puissance, le résultat final est extrêmement homogène. Les produits ne sont pas en contact avec des gaz d'échappement. Lorsque les produits doivent être particulièrement stériles et propres, les systèmes électriques à infrarouges peuvent être utilisés dans un four ventilé.

Comparatif avec les radiateurs infrarouges à combustion.

Si on les compare avec les radiateurs infrarouges à combustion, les systèmes de chauffe infrarouges utilisant l'énergie électrique possèdent les avantages suivants :

- une gamme plus importante de radiateurs ; les radiateurs infrarouges par combustion sont pour la plupart dans le domaine des ondes longues.
- une efficacité accrue (>70%)
- une régulation meilleure et plus précise
- des phases de marche/arrêt rapides
- des coûts de maintenance réduits
- des conditions de travail meilleures et plus sûres pour le personnel
- aucune contamination du produit chauffé

5 Applications industrielles

Les systèmes de chauffe infrarouges peuvent être utilisés dans plusieurs branches du domaine industriel. Dans chaque branche du domaine industriel où se trouvent des opérations de chauffe ou de séchage, lorsque des produits ont besoin d'être polymérisés ou dans les cas de traitements de surface en continu, il existe un potentiel de possibilités d'applications intéressantes.

5.1 Industrie des procédés en métallurgie

Les produits métalliques sont, pour la plupart, finis par une ou plusieurs couches de peinture ou d'enduit. L'enduit protège le métal contre le risque de corrosion mais fournit également une apparence agréable.

L'ensemble liquide et poudre d'enduit sont enfournés à des températures entre 150 et 200°C. Les applications sont multiples : pièces détachées automobiles, cadres de vélos, meubles métalliques.

Le chauffage par infrarouges surpasse les installations traditionnelles à air chaud dans ces applications pour un bon nombre de raisons :

- rapidité de chauffe
- grande vitesse de production (due aux grandes densités de puissance)
- réduction de poussière : une couche protectrice se forme presque instantanément et la circulation d'air est restreinte
- bonne efficacité énergétique

Le rayonnement infrarouge est souvent combiné à de l'air chaud dans les galeries de fours industriels : la zone infrarouge est généralement suivie d'une région de chauffage par convection. De cette manière, la température nominale d'un produit peut être obtenue même si le lieu n'est pas directement irradié par les infrarouges. D'ailleurs le risque du sur-échauffement est faible et la température du produit peut être contrôlée plus facilement.

5.2 Les espaces chauffés

Dans de grands entrepôts, à l'intérieur de halls spacieux abritant des bureaux ou même encore dans des hangars ouverts ou des salles de stockage, le chauffage par infrarouges est souvent une solution efficace et peu chère. Ce chauffage radiatif (souvent mis en œuvre dans des fours en céramique) possède un nombre significatif d'avantages par rapport aux techniques de chauffe traditionnelles :

Le rayonnement est concentré sur l'endroit désiré. L'air chaud, au contraire, se dirige vers le plafond. Le rayonnement chauffe la surface et non le volume. L'air n'est pas chauffé directement mais par les calories perdues par l'objet chauffé par le rayonnement. Il n'y a donc pas de pertes de chauffe par un renouvellement d'air (ex : air conditionné). La chaleur est immédiate, le régime permanent de chauffe est rapidement obtenu. Généralement, 95% de l'énergie rayonnée est perçue dans les 5 minutes qui suivent la mise sous tension des

éléments radiatifs. L'installation de chauffe est compacte, silencieuse et exempte de toute poussière.

6 Conclusions

Ce guide d'application décrit la technologie et les applications du chauffage par rayonnement infrarouges. Les principes de base de cette technologie ainsi que les propriétés fondamentales ont été présentées. Il est montré que le transfert de l'énergie thermique est dépendant de plusieurs facteurs comme l'émissivité du matériau ainsi que de son facteur de forme.

Cependant, dans plusieurs procédés industriels, le chauffage par infrarouge offre des avantages en respectant les techniques de chauffe conventionnelles comme la convection que l'on retrouve dans les fours à air chaud. Le chauffage par infrarouge est en dernier ressort caractérisé par des densités de puissance élevées, une grande rapidité de chauffe ainsi qu'une relative simplicité d'installation. Tous ces avantages offrent la possibilité d'augmenter les vitesses de production, dans des installations compactes et pour des coûts d'investissements faibles.

7 Références et bibliographies

- [1] A.C. Metaxas, Foundations of Electroheat. A Unified Approach, John Wiley & Sons, Chichester, 1996.
- [2] M. F. Modest, Radiative Heat Transfer, 2nd ed., Academic Press, San Diego (USA), 2003.
- [3] R. Siegel, J.R. Howell, Thermal Radiation Heat Transfer, 4th ed., Taylor and Francis, London, 2002.
- [4] P. Kubin, D. Van Dommelen, C. Corrochano, Efficient Infrared Heating by Dynamic Load Absorptivity Adaptation, UIE International Conference, Durban, South Africa, 2004.
- [5] A. von Starck, A. Mühlbauer, C. Kramer (eds.), Handbook of Thermoprocessing Technologies, Vulkan Verlag, Essen, 2005.