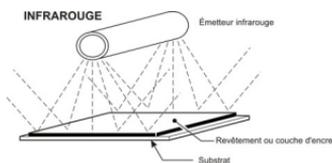
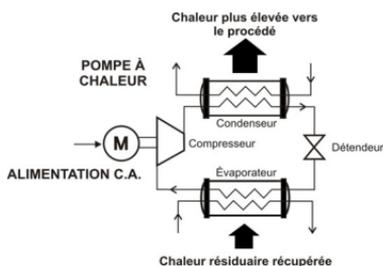
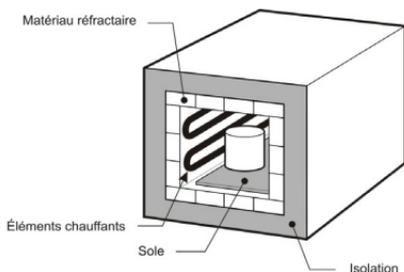


Guide d'amélioration du rendement énergétique des ÉLECTROTECHNOLOGIES

À l'intention des petites et moyennes industries



CLAUSE DE NON-RESPONSABILITÉ : Ni

CEA Technologies Inc., ni les auteurs, ni les commanditaires, ou toute autre personne agissant en leur nom, ne seront en aucun cas tenus responsables quant à l'utilisation, ou aux dommages résultant de l'utilisation, des informations, matériels, équipements, produits, méthodes ou procédés, quels qu'ils soient, décrits dans le présent guide.

Il est conseillé de faire appel à des professionnels accrédités pour la mise en œuvre des directives et recommandations contenues dans le présent guide.

Ce guide a été préparé par Stricker Associates Inc pour le Groupe d'intérêt sur les Solutions énergétiques pour les clients (GISEC) de CEA Technologies Inc. (CEATI) avec le parrainage des entreprises d'électricité membres du Groupe ci-après :



Natural Resources
Canada

Ressources naturelles
Canada

BC hydro

POWER SMART

hydro
one

Hydro
Québec

Manitoba
Hydro

OPA
Ontario Power Authority

SaskPower

CEATI

© 2007 CEA Technologies Inc. Tous droits réservés.

Des remerciements vont à Ontario Hydro, Ontario Power Generation et tous autres organismes qui ont fourni les matériels employés dans la préparation de ce guide.

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre		Page
1	Introduction	9
2	Réponse Aux Besoins Des Entreprises	13
	a. Réduire l'énergie nécessaire à la production	14
	b. Réduire les gaz à effet de serre	14
	c. Améliorer la qualité des produits	14
	d. Augmenter la cadence de production	15
	e. Améliorer l'environnement de travail des employés	15
3	Aperçu des Applications Possibles Dans L'Industrie	17
4	Pompes à Chaleur Industrielles et Recompression Mécanique de la Vapeur	21
	a. Principe	21
	b. Types de systèmes	22
	c. Applications	24
	d. Avantages	26
	e. Limites	26
	f. Rendement type	26
	g. Considérations de mise en œuvre	27
	h. Composants et terminologie	27

i.	Exemples d'installations	28
j.	Sources pratiques d'information	30
k.	Fournisseurs d'équipements et de services	31
5	Chauffage Par Rayonnement Infrarouge	33
a.	Principe	33
b.	Types de systèmes	34
c.	Applications	34
d.	Avantages	37
e.	Limites	37
f.	Rendement type	37
g.	Considérations de mise en œuvre	38
h.	Composants et terminologie	38
i.	Exemple d'installation	39
j.	Sources pratiques d'information	40
k.	Fournisseurs d'équipements et de services	40
6	Chauffage Par Induction	43
a.	Principe	43
b.	Types de systèmes	44
c.	Applications	45
d.	Avantages	46
e.	Limites	47
f.	Rendement type	47

g.	Considérations de mise en œuvre	48
h.	Composants et terminologie	49
i.	Exemple d'installation	50
j.	Sources pratiques d'information	50
k.	Fournisseurs d'équipements et de services	51
7	Chauffage Par Radiofréquence	55
a.	Principe	55
b.	Types de systèmes	56
c.	Applications	56
d.	Avantages	58
e.	Limites	59
f.	Rendement type	60
g.	Considérations de mise en œuvre	61
h.	Composants et terminologie	61
i.	Exemples d'installations	63
j.	Sources pratiques d'information	63
k.	Fournisseurs d'équipements et de services	64
8	Chauffage Par Micro-ondes (Hyperfréquences)	67
a.	Principe	67
b.	Types de systèmes	68
c.	Applications	68

d.	Avantages	69
e.	Limites	70
f.	Rendement type	71
g.	Considérations de mise en œuvre	71
h.	Composants et terminologie	72
i.	Exemple d'installation	73
j.	Sources pratiques d'information	74
k.	Fournisseurs d'équipements et de services	74
9	Chauffage Direct Par Résistance	77
a.	Principe	77
b.	Types de systèmes	78
c.	Applications	78
d.	Avantages	79
e.	Limites	79
f.	Rendement type	80
g.	Considérations de mise en œuvre	80
h.	Composants et terminologie	80
i.	Exemple d'installation	81
j.	Sources pratiques d'information	82
k.	Fournisseurs d'équipements et de services	82
10	Chauffage Indirect Par Résistance	85
a.	Principe	85

b.	Types de systèmes	86
c.	Applications	86
d.	Avantages	87
e.	Limites	87
f.	Rendement type	88
g.	Considérations de mise en œuvre	88
h.	Composants et terminologie	88
i.	Exemple d'installation	91
j.	Sources pratiques d'information	91
k.	Fournisseurs d'équipements et de services	91
11	Traitement Aux Rayons Ultraviolets	93
a.	Principe	93
b.	Types de systèmes	94
c.	Applications	94
d.	Avantages	94
e.	Limites	95
f.	Rendement type	95
g.	Considérations de mise en œuvre	96
h.	Composants et terminologie	96
i.	Exemple d'installation	98
j.	Sources pratiques d'information	99
k.	Fournisseurs d'équipements et de services	100

12	Autres Électrotechnologies	101
a.	Arc électrique	101
b.	Laser	101
c.	Plasma	102
d.	Membranes	103
13	Bibliographie	109
14	Glossaire des Termes Employés	113
15	Index	119

1 INTRODUCTION

Ce guide d'amélioration du rendement énergétique des électrotechnologies présente brièvement les descriptions, caractéristiques, avantages et inconvénients des divers procédés industriels employés dans les petites et moyennes installations industrielles. Ces procédés particuliers mettent en jeu l'emploi d'énergie sous forme d'électricité, de gaz naturel ou d'autres combustibles

En raison de la hausse des coûts de tous les combustibles, de la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, et de la concurrence accrue, les industries doivent continuellement rechercher des méthodes visant la réduction de l'énergie indispensable à la production, l'accroissement des cadences de production et l'amélioration de la qualité de leurs produits. Le présent guide a été élaboré en tenant compte de ces trois objectifs.

Bien qu'elles emploient un type d'énergie plus coûteux – l'électricité – les électrotechnologies présentent des avantages particuliers par rapport aux autres technologies mises en œuvre et peuvent en fait consommer beaucoup moins d'énergie pour effectuer un travail équivalent. Par exemple, chauffer une pièce de métal à haute température peut être réalisé de façon beaucoup plus efficace, plus rapide et avec un bien meilleur contrôle si l'on y induit des courants de Foucault (chauffage par induction) plutôt que de la chauffer dans un four à convection ou un four à rayonnement infrarouge.

Le matériel contenu dans ce guide a été élaboré à partir d'informations fournies par des entreprises d'électricité, des universités, des laboratoires de recherche et des fournisseurs

1 Introduction

d'équipements industriels; cela aidera le lecteur à retrouver aisément le type d'équipement approprié.

Ce guide propose également des liens vers des sources de renseignements complémentaires. Comme certaines sources évoluent avec le temps, il se peut que le lecteur soit réorienté. Il est d'ailleurs conseillé de toujours rechercher l'information la plus récente sur le sujet considéré.

Par souci de concision et de respect des objectifs du présent guide, les sujets traités comportent assez de détails pour offrir au lecteur les rudiments essentiels de la terminologie, des principes employés et des particularités qui assurent un haut rendement énergétique aux électrotechnologies. Pour de plus amples détails, le lecteur est prié de communiquer avec un préposé du service à la clientèle de son entreprise d'électricité locale, avec l'association industrielle ou avec les fournisseurs d'équipements visés dont la liste figure dans chacun des chapitres.

10

Les électrotechnologies traitées dans ce guide appartiennent aux huit grandes catégories suivantes :

1. Pompes à chaleur industrielles & recompression mécanique de la vapeur (PC & RMV).
2. Chauffage par rayonnement infrarouge.
3. Chauffage par induction.
4. Chauffage par radiofréquence (on dit aussi chauffage par haute fréquence ou RF).
5. Chauffage par hyperfréquences (micro-ondes ou MW).

6. Chauffage direct par résistance.
7. Chauffage indirect par résistance.
8. Traitement aux rayons ultraviolets.

Dans chacune des catégories sont décrites diverses configurations d'équipement et applications types.

2 RÉPONSE AUX BESOINS DES ENTREPRISES

La mondialisation, la délocalisation de la fabrication vers des pays où les salaires sont beaucoup moins élevés, ainsi que les prix croissants de l'énergie contraignent les industries manufacturières d'Amérique du Nord, si elles veulent survivre, à devenir plus efficaces, à fabriquer des produits de meilleure qualité et à rester concurrentielles. Parmi ses responsabilités, un directeur d'usine doit minimiser la quantité d'énergie consommée par l'installation, optimiser la qualité des produits, maintenir la cadence de fabrication la plus élevée possible, et réduire au minimum l'impact de l'exploitation sur l'environnement.

Il existe normalement plusieurs options en matière de procédés industriels mettant en œuvre le chauffage, la fusion, le recuit, le séchage, la distillation, la séparation, le revêtement, le séchage, etc. Le présent guide se penche sur l'utilisation des électrotechnologies du point de vue commercial, c.-à-d. qu'il examine et met en lumière les caractéristiques qui rendent un procédé moins énergivore et plus rapide, et offrent un meilleur contrôle sur la qualité du produit. Dans les pages qui suivent, on trouvera quelques exemples montrant comment la mise en œuvre des électrotechnologies les mieux appropriées permet d'atteindre ces objectifs.

a. Réduire l'énergie nécessaire à la production

L'idée est de chauffer un composant fabriqué en produisant de la chaleur à l'intérieur du matériau par induction, chauffage diélectrique ou hyperfréquences, plutôt que de le chauffer de l'extérieur vers l'intérieur, en utilisant un four, un système de chauffage par rayonnement, etc. qui doivent être alimentés en permanence pendant le processus de production.

b. Réduire les gaz à effet de serre

Certains procédés intermittents exigent que les appareils de chauffage à combustion soient en marche en permanence. Il est souvent possible de remplacer de tels appareils par des dispositifs électrotechnologiques qui ne consomment aucune énergie pendant les périodes d'attente, comme par exemple le chauffage par induction et par radiofréquence dans des environnements à atmosphère contrôlée.

c. Améliorer la qualité des produits

Dans les applications de séchage, on peut employer diverses électrotechnologies qui amélioreront la qualité et la valeur des produits tout en économisant de l'énergie : par exemple, pour contrôler la siccité des bords durant l'enroulement de bandes de papier, pour empêcher le voilement du bois d'œuvre lors du séchage, ou pour le séchage final des produits alimentaires. Dans ces applications, le chauffage par radiofréquence (diélectrique), le séchage par pompe à chaleur par abaissement du point de rosée et le chauffage par micro-ondes (hyperfré-

quences) des produits pratiquement secs, répondent aux besoins indiqués.

d. Augmenter la cadence de production

Dans les procédés qui nécessitent le chauffage d'un produit, il faut en général attendre une certaine période de temps jusqu'à ce que le produit atteigne la température voulue du procédé, en raison de la masse du matériau, de sa conductivité, des propriétés de surface, ainsi que des limites de température imposées pour éviter l'endommagement du produit ou des changements non souhaitables. Plusieurs électrotechnologies aident à accélérer la vitesse de chauffage du matériau sans dépasser les températures limites de surface, tout en éludant les problèmes de conductivité thermique et de propriétés de surface. Le rendement des ces procédés est en principe beaucoup plus élevé que celui des fours, tunnels de chauffage et autres appareils de chauffage par rayonnement classiques. Un coefficient supérieur de transfert de chaleur et un rendement plus élevé se traduisent par une cadence de fabrication plus rapide et un coût en énergie plus faible.

e. Améliorer l'environnement de travail des employés

Étant donné que les électrotechnologies peuvent remplacer les équipements de chauffage à combustion, l'environnement de travail s'en trouve normalement amélioré grâce à de plus basses températures d'exploitation et à l'élimination des produits de combustion dans l'atelier.

2 Réponse aux besoins des entreprises

3 APERÇU DES APPLICATIONS POSSIBLES DANS L'INDUSTRIE

Le tableau 1 ci-après procurera au lecteur un aperçu des électrotechnologies potentiellement applicables dans certains groupes particuliers d'industries selon les procédés employés dans les usines respectives. Cette "feuille de route" aidera les directeurs d'exploitation à saisir les possibilités d'application des électrotechnologies dans leurs installations. Excellent point de départ pour évaluer ces possibilités, cette feuille de route dresse le plan des principales électrotechnologies en fonction du Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN). Les cases d'intersections du tableau portent une indication des possibilités d'application qualitatives (Élevées, Moyennes ou Faibles).

Par exemple, la classification Fabrication d'aliments (SCIAN 311) inclut les industries qui transforment de grandes quantités de liquides et d'aliment frais. Dans ce cas, les électrotechnologies mettant en jeu les pompes à chaleur industrielles, la recompression mécanique de la vapeur, le chauffage par micro-ondes et le chauffage indirect par résistance sont très probablement applicables. Les industries de fabrication de produits métalliques (SCIAN 322) présentent des possibilités élevées d'application pour pratiquement toutes les électrotechnologies en haute température, car ces industries font appel à des procédés exigeant des hautes températures et un traitement de surface ou de finition.

3 Aperçu des applications possibles dans l'industrie

Tableau 1. Plan des possibilités d'application des électrotechnologies dans le Système de classification des industries de l'Amérique du Nord

Électro-technologie	Système de classification à 3 chiffres des industries de l'Amérique du Nord									
	Aliments 311	Boissons & produits du tabac 312	Usines de textiles 313; Usines de produits textiles 314	Fabrication de vêtements 315	Produits en cuir et produits analogues 316	Fabrication de produits en bois 321	Fabrication du papier 322	Impressions et activités connexes de soutien 323	Produits du pétrole et du charbon 324	Fabrication de produits chimiques 325
PAC ind. & RMV	H	H	M	L	L	H	M	L	M	M
Infrarouges	M	M	H	M	M	M	H	H	M	M
Induction	L	L	M	L	L	L	L	L	L	M
Courant à haute fréquence	M	M	H	L	L	M	M	L	L	L
Hyperfréquences	H	M	L	L	L	L	L	L	L	M
Direct par résistance	M	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Indirect par résistance	H	M	M	M	M	M	M	M	M	M
Ultraviolet	L	L	M	L	L	M	M	H	L	L

LÉGENDE : - Possibilités d'application

H = élevées

M = moyennes

L = faibles

3 Aperçu des applications possibles dans l'industrie

Électro-technologie	Système de classification à 3 chiffres des industries de l'Amérique du Nord									
	Produits en plastique et en caoutchouc 326	Produits minéraux non métalliques 327	Première transformation des métaux 331	Fabrication de produits métalliques 332	Fabrications de machines 333	Fabrication de produits informatiques et électroniques 334	Matériel, appareils et composants électriques 335	Fabrication de matériel de transport 336	Fabrication de meubles et de produits connexes 337	Activités diverses de fabrication 339
PAC ind. & RMV	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
Infrarouges	H	H	M	H	H	H	H	H	M	H
Induction	M	M	H	H	H	M	H	H	M	M
Courant à haute fréquence	H	L	L	H	H	L	H	L	M	L
Hyperfréquences	M	M	M	L	L	L	H	L	L	L
Direct par résistance	L	M	H	H	M	M	M	M	M	M
Indirect par résistance	M	M	M	H	M	M	M	M	M	M
Ultraviolet	M	L	L	H	H	H	H	H	M	M

LÉGENDE : - Possibilités d'application

H = élevées **M** = moyennes **L** = faibles

3 Aperçu des applications possibles dans l'industrie

Pour une évaluation plus approfondie des possibilités, on devra étudier les spécifications particulières d'un procédé donné et déterminer alors l'électrotechnologie qui procurera les avantages les plus importants.

Le présent guide propose en outre de nombreux liens Web fort utiles vers des sources de données externes, lesquelles peuvent se révéler précieuses pour l'évaluation des applications des diverses électrotechnologies.

4 POMPES À CHALEUR INDUSTRIELLES ET RECOMPRESSION MÉCANIQUE DE LA VAPEUR

a. Principe

On utilise les pompes à chaleur industrielles pour récupérer, dans une étape d'un procédé, la chaleur résiduaire dont on élève la température pour chauffer des composants dans une autre étape. Le procédé fondamental que l'on utilise pour y parvenir est la compression mécanique de la vapeur. Ainsi, l'énergie thermique est transférée d'une source à basse température vers un dissipateur à température plus élevée par évaporation et circulation de vapeur avec compression et condensation. Lorsque la vapeur, comprimée dans un circuit fermé comportant au moins deux échangeurs de chaleur, est recirculée, le système porte le nom de pompe à chaleur (PAC). Lorsque la vapeur est extraite et pompée vers l'extérieur du système à travers un échangeur de chaleur, le système est appelé recompression mécanique de la vapeur (RMV).

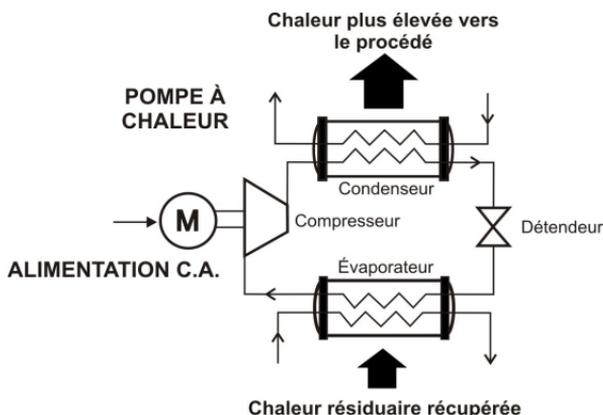
Ce qui rend particulièrement efficaces les pompes à chaleur et les systèmes RMV est le fait que ces systèmes sont capables de transférer l'énergie thermique d'une source à basse température vers un dissipateur à température plus élevée en n'utilisant qu'une faible proportion de l'énergie totale qui est transférée. Les autres méthodes comprennent les fours à combustion classiques et le transfert de chaleur par conduction à travers des échangeurs de chaleur.

b. Types de systèmes

Il existe deux types courants de systèmes industriels de pompes à chaleur : fermé et ouvert.

Les systèmes fermés

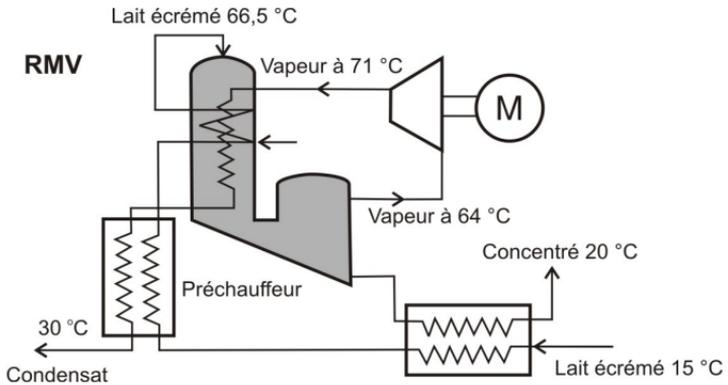
Les systèmes fermés font appel à un fluide intermédiaire caloporteur appelé réfrigérant. La vapeur est mue par un compresseur mécanique à partir d'un échangeur de chaleur (l'évaporateur) vers un second échangeur de chaleur (le condenseur), puis retournée à l'évaporateur à travers un détendeur. Le condenseur et l'évaporateur transfèrent la chaleur respectivement au dissipateur et à la source considérés. Les fluides caloporteurs actuellement utilisés limitent à 120 °C la température maximale de sortie. Les systèmes fermés sont généralement appelés *pompes à chaleur*.¹



¹ Un Guide du rendement énergétique des pompes à chaleur pour les applications de chauffage/refroidissement des locaux et de l'eau est en cours de préparation par la CEATI.

Les systèmes ouverts

Les systèmes ouverts ne contiennent aucun fluide intermédiaire de transfert de chaleur ou réfrigérant. Le compresseur agit directement sur la forme vapeur du fluide à traiter, en général de la vapeur d'eau ou un solvant en phase vapeur. Le schéma ci-dessous présente un système RMV employé pour la concentration du lait.



Ce type de système inclut en principe un seul échangeur de chaleur, un condenseur, ou même aucun échangeur de chaleur au cas où la vapeur comprimée est directement employée dans le procédé. Dans cet exemple particulier, le compresseur extrait directement la vapeur d'eau du réservoir contenant la solution ou le mélange à concentrer (lait), refroidissant ainsi le liquide. La vapeur comprimée est refroidie par préchauffage du lait, puis éliminée du système sous forme d'eau. De cette façon, la chaleur de la vapeur comprimée ou du condenseur est transférée au liquide traité pour le réchauffer. En retournant la chaleur d'évaporation au liquide traité à l'aide du condenseur, on augmente l'efficacité du processus d'évaporation en recyclant l'énergie thermique contenue dans la vapeur et dans le

condensat. L'élévation de température étant d'ordinaire faible, le rendement des systèmes RMV est élevé, leurs coefficients de performance (COP) étant de l'ordre de 10 à 30. Les systèmes RMV actuels fonctionnent avec des sources de chaleur de 70 à 80 °C et délivrent une chaleur comprise entre 110 et 150 °C et même, dans certains cas, une chaleur pouvant atteindre 200 °C.

c. Applications

Les systèmes RMV conviennent bien aux cycles de fabrication industrielle pour déplacer d'importantes quantités d'énergie thermique à des températures relativement basses d'une étape à l'autre du procédé, ainsi que pour accroître les différences de températures (au-dessous de 90 °C environ). Les applications courantes touchent l'élimination de l'eau ou de la vapeur d'eau dans les procédés de séchage, de déshumidification, de distillation et de concentration, ou encore dans les applications de récupération de chaleur et d'augmentation de température des gaz et des liquides

24

Applications types des pompes à chaleur

- Séchage du bois, du cuir, des tissus et des céréales.
- Distillation dans les usines chimiques et pétrochimiques.
- Déshumidification.
- Concentration de solutions.

Applications types de la recompression mécanique de la vapeur

- Déshydratation de solutions ou de mélanges tels que :

- bains galvaniques dilués pour récupérer des substances et ingrédients actifs.
 - émulsions d'huile pour récupérer l'huile.
 - bains de dégraissage riches en savon et en détergents.
 - bains d'acide concentré ou solutions fortement corrosives.
 - bains de développement photographique
 - solutions salines concentrées.
 - lixiviat de décharges et écoulements provenant des installations d'entreposage et d'élimination des déchets.
 - eaux de cale.
 - eaux de rinçage renfermant des encres épuisées.
 - eaux usées des industries chimiques, cosmétiques et pharmaceutiques.
- Concentration de jus de fruits, de lait, de petit-lait, de liqueur noire (dans l'industrie des pâtes et papiers) et autres liquides.
 - Distillation d'alcool, de produits pétrochimiques et de produits chimiques organiques.
 - Recompression des vapeurs de distillat de tête dans une tour de distillation de produits pétrochimiques à des fins de récupération d'énergie.
 - Cristallisation du sucre par évaporation.
 - Réinjection de vapeur à basse pression dans un système à haute pression (procédés mécaniques et thermomécaniques de préparation des pâtes à papier).

d. Avantages

- Rendement énergétique très élevé (par ex. réduction de 75 % des besoins d'énergie dans le séchage du lait).
- Possibilité d'utilisation de la chaleur perdue dans les procédés à basse température ou les milieux pollués.
- Adaptation parfaite aux procédés contrôlés de séchage à basse température par déshumidification.
- Excellent moyen pour inciter à une innovation de la gestion de l'énergie absorbée par les procédés industriels très énergivores.
- Amélioration de la qualité des produits et diminution des pertes de produits grâce à un meilleur contrôle des caractéristiques de séchage.

e. Limites

- Coûts d'investissement élevés.
- Les économies sont fonction de la différence entre les coûts de l'électricité et ceux des autres combustibles.
- Usage plus complexe que les techniques classiques.
- Entretien plus compliqué.
- La limite supérieure de température qui convient aux procédés industriels s'avère relativement basse .

f. Rendement type

- Efficacité de la conversion d'énergie (puissance calorifique fournie divisée par l'électricité consommée, exprimée en unités compatibles).
 - pour les pompes à chaleur : de 3 à 5 la plupart du temps.

- pour la recompression mécanique de la vapeur : de 10 à 30 dans la plupart des cas.

g. Considérations de mise en œuvre

- Différence entre les coûts de l'électricité et ceux du combustible à remplacer.
- Coût d'investissement de l'équipement et délai de récupération de l'investissement (plus courts pour les installations originales que pour les modernisations).
- Température absolue et différence de température entre la source et le puits de chaleur pris en compte.
- Nature de l'activité : séchage, déshumidification, distillation, récupération d'énergie, augmentation de la température, évaporation, etc.
- Puissance nécessaire (flux énergétique requis), facteur d'utilisation, capacité énergétique disponible, stabilité dans le temps.
- Nature des fluides de la source et du puits de chaleur (air, vapeur, vapeur d'eau, eau, liquides, impuretés, etc.).

h. Composants et terminologie

- Compresseurs (types de) :
 - hermétiques, semi-hermétiques, ouverts
 - à pistons
 - à vis
 - centrifuge
- Échangeurs de chaleur : évaporateur et condenseur.
- Détendeur.

- Fluide de transfert de chaleur ou réfrigérant (choix de compromis reposant sur les températures et niveaux de pressions de service du procédé, puissance et tolérance de température du compresseur).
- Alimentation électrique.
- Type et caractéristiques des commandes.
- Dispositifs auxiliaires propres au procédé (source de chaleur d'appoint, stockage thermique, purge, etc.).

i. Exemples d'installations

<http://www.p2pays.org/ref/11/10451.htm>

Ce site décrit diverses applications et utilisations de pompes à chaleur industrielles aux États-Unis, qui améliorent considérablement le rendement des usines en permettant de récupérer des ressources énergétiques perdues dont notamment :

- Un système de séchoirs et d'évaporateurs permettant de moulin, cuire et transformer l'amidon de maïs en un sirop à haute teneur en fructose.
- Dans une fabrique de caoutchouc synthétique, des pompes à chaleur servent à alimenter un procédé d'alimentation en eau sous moyenne pression et à chauffer l'eau d'alimentation de chaudières.
- Dans une usine intégrée de pâtes et papiers, une pompe à chaleur utilise la vapeur d'eau usagée basse pression pour chauffer l'eau d'alimentation de chaudières.
- Dans une raffinerie spécialisée, des pompes à chaleur vont être utilisées pour la recompression des vapeurs de distillat de tête d'une tour de distillation en vue de récupérer l'énergie contenue dans ces vapeurs.

Rapport ACE 9114 U 859D intitulé “*Applications possibles des électrotechnologies : récupération de la chaleur en milieu industriel, 1993*”. Ce rapport décrit six possibilités d’applications prometteuses de pompes à chaleur dans les industries canadiennes, dont :

- Récupération de chaleur d’un réacteur à acétaldéhyde.
- Récupération de chaleur à partir de la chaleur résiduelle d’un système de réfrigération.
- Récupération de chaleur de l’eau de refroidissement d’un procédé de raffinage et de désodorisation.
- Récupération de la chaleur dans la décharge de vapeur durant la fabrication thermomécanique de la pâte à papier.
- Récupération de la chaleur de l’eau blanche.
- Récupération de la chaleur des épurateurs de gaz de carneau de chaudières de récupération de la pâte kraft.

Rapport ACE 614 U 566 : *Revue de l’installation des pompes à chaleur industrielles au Canada*, 1988. Ce rapport présente l’expérience d’exploitation de douze systèmes à pompe à chaleur ainsi que les économies réalisées, les problèmes rencontrés et les mesures correctives qui ont dûes être prises; il tire plusieurs conclusions sur l’état de la technologie des pompes à chaleur industrielles utilisées à l’époque au Canada, et fournit de précieuses informations sur les améliorations éventuelles à apporter aux futures applications.

j. Sources pratiques d'information

<http://www.heatpumpcentre.org/>

Le "Centre des pompes à chaleur" de l'AIE procure les informations les plus récentes sur l'application et le dimensionnement des pompes à chaleur pour le chauffage des locaux et de l'eau, ainsi que pour la récupération de chaleur des systèmes de réfrigération dans les supermarchés et autres établissements commerciaux.

http://www.heatpumpcentre.org/About_heat_pumps/HP_technology.asp

Ce site présente des informations détaillées sur la **RMV**, les **pompes à chaleur**, ainsi que sur la **pompe à chaleur à absorption** (type I) moins connue, les **transformateurs de chaleur** (type II) et les **pompes à chaleur à cycle inverse de Brayton** employées pour la récupération des solvants contenus dans les gaz de nombreux procédés.

<http://tristate.apogee.net/et/exth.asp>

Ce site décrit de façon simple diverses configurations de pompes à chaleur destinées à différentes applications, ainsi que des calculs d'estimation.

<http://www.owr.ehnr.state.nc.us/ref/32/31234.pdf>

Industrial Heat Pumps for Steam and Fuel Savings. Cette publication du ministère américain de l'énergie (US Department of Energy) présente les principes du procédé ainsi que des applications types dans diverses industries.

k. Fournisseurs d'équipements et de services

<http://www.topdownloads.org/directory/show.php?/Business/Industrial Goods and Services/Machinery and Tools/Thermal Process/Heat Exchangers/>

Ce site recense un grand nombre de fabricants et fournisseurs d'échangeurs de chaleur.

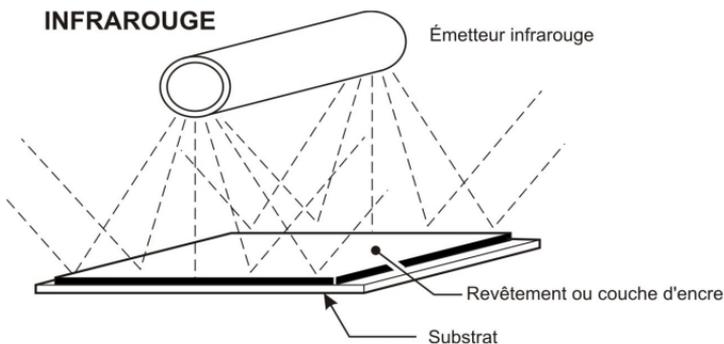
Avis : cette liste de fournisseurs ne constitue pas un répertoire complet ou exhaustif. La mention de tout produit, procédé, service ou vendeur dans cette publication ne l'est qu'à des fins purement documentaires et ne doit pas être considérée comme une recommandation de la part des auteurs ou des éditeurs.

5 CHAUFFAGE PAR RAYONNEMENT INFRAROUGE

a. Principe

Le chauffage par rayonnement infrarouge (IR) repose sur le principe du rayonnement émis par des résistances électriques, d'ordinaire en nickel-chrome ou en tungstène, portées à des températures relativement élevées. Le spectre infrarouge est divisé en trois bandes : proche infrarouge, infrarouge moyen, et infrarouge lointain.

Le schéma ci-dessous montre comment un émetteur infrarouge (IR) chaud transfère l'énergie rayonnante, dans l'air, à une surface sans aucun contact avec celle-ci. Cette caractéristique particulière rend le chauffage par rayonnement infrarouge spécialement adapté à certaines applications.



5 Chauffage par rayonnement infrarouge

b. Types de systèmes

Émetteurs infrarouges					
Gamme	Proche infrarouge		Infrarouge moyen	Infrarouge lointain	
Émetteur	Filaments en tungstène sous vide		Fil en nickel-chrome sous tube de quartz ou panneau de silice	Éléments gainés d'acier	Éléments noyés sous Pyrex ou céramique
	Lampe en verre ou à quartz	Tube de quartz avec réflecteur			
Puissance	150 W 250 W 375 W	12-14 cm : 500 W 27-28 cm : 1000 W 64-70 cm : 5000 W	30-250 cm : 500-8000 W	600 - 6000 W	150-1000 W
Température de fonctionnement	2000 °C	2200 °C	Tubes de quartz : 1050 °C Panneaux de silice : 650 °C	750 °C	Panneaux Pyrex : 350 °C; Éléments en céramique : 300 à 700 °C
Température maximale du produit	300 °C	600 °C	Tubes de quartz : 500 °C Panneaux de silice : 450 °C	400 °C	Panneaux Pyrex : 250 °C; Éléments en céramique : 500 °C

Reproduit avec l'autorisation d'Hydro-Québec

c. Applications

On emploie le rayonnement infrarouge dans une grande diversité d'applications s'adaptant à de nombreux matériaux qui nécessitent un traitement de surface. On combine souvent ce rayonnement à l'air chaud pour éliminer les vapeurs et prévenir

le durcissement prématuré des surfaces. Quelques exemples d'applications comprennent notamment :

1. Métaux

- Séchage de pièces lavées ou nettoyées.
- Séchage de peintures, vernis ou émaux vitreux.
- Chauffage des calandres, chauffage des surfaces de moules.
- Préchauffage du métal avant décapage au jet ou soudage.
- Traitement thermique (recuit, trempe).

2. Matières plastiques

- Préchauffage avant thermoformage.
- Séchage de granules et de feuilles après nettoyage.
- Préchauffage de tubes avant cintrage.
- Polymérisation d'agents plastifiants.
- Durcissement de revêtements en poudre.

3. Produits alimentaires

- Cuisson / déshydratation de pains, gâteaux secs et biscuits.
- Réchauffage de produits alimentaires.
- Rôtissage de la viande.
- Confection de la croûte des pâtés.
- Pasteurisation et stérilisation du lait et des jus de fruits.

5 Chauffage par rayonnement infrarouge

4. Verre

- Préchauffage de bouteilles et de verre feuilleté.
- Séchage de revêtements dont l'émail et les miroirs.

5. Textiles

- Séchage de textiles, adhésifs et encres.
- Polymérisation de résines.
- Thermofixage de la mousse de latex sur les endos de tapis.

6. Caoutchouc

- Vulcanisation.
- Chauffage des adhésifs caoutchoutés.

36

7. Céramiques

- Séchage des pièces crues et des émaux vitreux de poteries en argile.

8. Papier

- Séchage d'adhésifs, produits de couchage et encres pour papier.
- Polymérisation d'additifs.

9. Divers

- Séchage de panneaux de bois et du tabac.
- Thermoscellage des piles électriques.
- Ramollissement de la cire.

- Thermorétraction des emballages en plastique.

d. Avantages

Le rayonnement infrarouge (IR) constitue un moyen de chauffage intéressant et très efficace. L'énergie est transférée à la surface d'un objet sans contact avec lui et sans absorption directe notable par le milieu ambiant.

La faible inertie thermique des émetteurs à proche infrarouge et infrarouge moyen élimine la nécessité de longues périodes de mise en marche, et aide à réduire la quantité de déchets ou rebuts produits durant la fabrication.

On peut concentrer, focaliser, orienter ou réfléchir le rayonnement. Comme la densité de puissance incidente peut atteindre 250 kW/m^2 , les équipements nécessaires sont compacts et la durée de traitement plus rapide.

e. Limites

Vu que le rayonnement infrarouge est absorbé par la surface d'un matériau, les propriétés thermiques de ce dernier régiront le temps que prend la chaleur pour le traverser. Pour cette raison, l'énergie de rayonnement infrarouge est moins adaptée à un chauffage de masse. Le chauffage de revêtements réfléchissants présente des difficultés. L'entretien des émetteurs à IR est plus fastidieux dans les milieux souillés.

f. Rendement type

- Équipements de taille réduite en raison des durées de traitement plus rapides.

5 Chauffage par rayonnement infrarouge

- Coût d'investissement faible à modéré selon l'application.
- Entretien minime, limité essentiellement au nettoyage et au remplacement de l'émetteur.
- Rendement global élevé par rapport aux autres méthodes de chauffage.

g. Considérations de mise en œuvre

- Opération unitaire à effectuer (séchage, chauffage, durcissement, etc.).
- Longueur d'onde du rayonnement à émettre en fonction du facteur d'absorption du produit à traiter.
- Forme du produit.
- Type ou formulation du matériau (par ex. à base de solvants *vs* revêtement en poudre), et épaisseur.
- Méthode de traitement (traitement continu ou discontinu).
- Caractéristiques du four (par ex. risques de contact ou de chocs entre le produit et les émetteurs IR).
- Type d'émetteur (température de l'élément actif, densité de puissance, etc.).
- Distance entre les émetteurs et le produit à chauffer, conditions de ventilation.

h. Composants et terminologie

- Émetteurs à rayonnement dans le proche infrarouge :
 - tubes ou lampes à vide ou à gaz inerte.
- Infrarouge moyen :
 - filaments en métal sous tubes en quartz ou en silice transparente.

5 Chauffage par rayonnement infrarouge

- panneaux radiants.
- tubes radiants.
- Émetteurs à infrarouge lointain :
 - panneaux en verre ou en céramique à chauffage par résistances (mince couche d'oxyde de métal, résistances nickel-chrome noyées, etc.).
 - éléments tubulaires ou bandes en surface sur substrat en céramique fibreuse.
- Système de ventilation (l'air de ventilation peut servir également à refroidir les émetteurs et à augmenter le rendement global du four).
- Régulation (température de la source en fonctionnement, vitesse de déplacement des produits, etc.).
- Alimentation électrique.

i. Exemple d'installation

Séchage d'un produit en cellulose moulée		
Paramètres	Four à infrarouges	Four à convection
Source d'énergie	Électricité	Propane
Procédé de séchage	Infrarouge/convection	Convection
Puissance installée	1 MW	1,1 MW équivalent
Température de l'air	150 °C en moyenne	
Rendement global	> 80 %	~ 45 %
Durée de séchage	~ 9 minutes	~15 minutes
Consommation spécifique d'énergie	0,85 kW/kg d'eau évaporée	1,35 kW _{equiv} /kg d'eau évaporée

D'après la référence 1

j. Sources pratiques d'information

Industrial Heating Equipment Association (IHEA)

Téléphone : (513) 231-5613 / Web: <http://www.ihea.org>

Ce groupe fournit à ses compagnies membres un appui leur permettant d'accroître leurs capacités en matière de prestation de services aux utilisateurs dans le domaine du traitement thermique industriel, et d'améliorer ainsi la performance commerciale des compagnies membres. L'IHEA comprend une division Équipements infrarouge (IRED).

k. Fournisseurs d'équipements et de services

Applied Heat Equipment Co. Limited

1312 Britannia Rd. E., Mississauga, ON L4W 1C8 Canada

Tél. : (905) 670-2200 / télécopieur : (905) 670-1927

Site Web : <http://www.appliedheatequipment.com>

Casso-Solar Corp.

230 Rt. 202, P.O. Box 163, Pomona, NY 01970 USA

Appel sans frais : 1-800-988-4455 / Tél. : (845) 354-2500

Télécopieur : (845) 362-1856 /

Site Web : <http://www.cassosolar.com>

Représentants canadiens de Casso-Solar Corp. :

a) **Synergetic Technologies** (ON, MB, SK, AB, CB)

1120 Speers Rd., Oakville, ON L6L 2X4 Canada

Tél. : (905) 849-7115 / télécopieur : (905) 849-0001

Site Web : <http://www.synergetic.on.ca>

Aucune application concernant le verre

b) **Gaston Belanger** (QC, NB, NE)

7623, rue Thames; Anjou (QC) H1K 4C2 Canada

Tél. : (514) 493-3824

*Comprend les applications industrielles du verre pour
toutes les provinces*

Fostoria Industries Inc., Process Heating Division

1200 N. Main, Fostoria, OH 44830 USA

Appel sans frais : 1-800-495-4525 / tél. : (419) 435-9201

Télécopieur : (419) 435-0842

Site Web : <http://www.fostoriaindustries.com>

Gasmac Inc.,

509 Clair Road West, Guelph, ON N1H 6H9 Canada

Tél. : (519) 836-5362 / télécopieur : (519) 836-4242

Site Web : <http://www.gasmac.com>

Glenro Inc.

39 McBride Ave., Paterson, NJ 07501-1799 USA

Appel sans frais : 1-888-453-6761 / Tél. : (973) 279-5900

Télécopieur : (973) 279-9103 /

Site Web : <http://www.glenro.com>

ITW BGK Finishing Systems

4131 Pheasant Ridge Drive North, Blaine, MN 55449 USA

Appel sans frais : 1-800-663-5498 / Tél. : (763) 784-0466

Télécopieur : (763) 784-1362 /

Site Web : <http://www.itwbgk.com>

Research, Inc.

7128 Shady Oak Road, Eden Prairie, MN 55344 USA

Tél. : (952) 941-3300 / télécopieur : (952) 941-3628

Site Web : <http://www.researchinc.com>

5 Chauffage par rayonnement infrarouge

Tempco Electric Heater Corporation

607 N. Central Avenue, Wood Dale, IL 60191 USA

Appel sans frais : 1-888-268-6396 / Tél. : (630) 350-2252

Télécopieur : (630) 350-0232 /

Site Web : <http://www.tempco.com>

Représentants canadiens de Tempco Electric Heater Corp. :

Process Heaters Inc.

750 Oakdale Rd., #58, Toronto, ON M3N 2Z4 Canada

Appel sans frais : 1-877-747-8250 / Tél. : (416) 747-8250

Télécopieur : (416) 747-1860 /

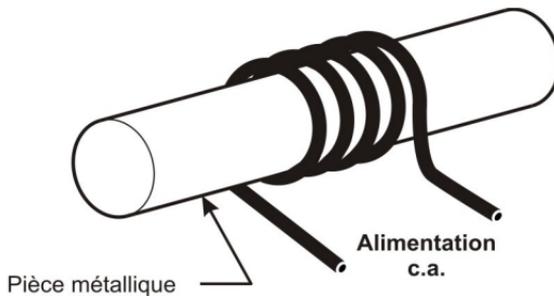
Site Web : <http://www.processheaters.ca>

Avis : cette liste de fournisseurs ne constitue pas un répertoire complet ou exhaustif. La mention de tout produit, procédé, service ou vendeur dans cette publication ne l'est qu'à des fins purement documentaires et ne doit pas être considérée comme une recommandation de la part des auteurs ou des éditeurs.

6 CHAUFFAGE PAR INDUCTION

a. Principe

Le chauffage par induction consiste à appliquer à un objet ou matériau conducteur d'électricité, un champ électromagnétique créé par une bobine d'induction.



Le champ magnétique variable (oscillant) appliqué à un corps métallique engendre un courant électrique (appelé courant induit) qui circule dans le corps en question et l'échauffe par "effet Joule". Du point de vue du rendement énergétique, le chauffage par induction d'une pièce métallique est en général beaucoup plus efficace et plus rapide que le chauffage obtenu par un four à convection ou à rayonnement du fait que la chaleur est produite directement à l'intérieur du matériau; et même s'il existe certaines pertes liées à l'alimentation électrique, ces pertes sont très inférieures à celles des fours à combustion, des séchoirs électriques ou des radiateurs radiants. Du point de vue contrôle, la puissance absorbée par la pièce peut être contrôlée avec précision par la forme des bobines, l'intensité du champ et la durée d'application. Étant donné que l'équipement de chauffage par induction ne nécessite aucune

6 Chauffage par induction

enceinte chauffée ou cheminée, le remplacement d'un appareil à combustion par un équipement de chauffage par induction peut grandement améliorer l'environnement de travail dans la zone du procédé.

- On utilise surtout le chauffage par induction électromagnétique pour chauffer des matériaux métalliques (c'est le chauffage direct) ou pour chauffer un creuset métallique qui transmet la chaleur par conduction et convection à la charge non métallique à traiter, (c'est le chauffage indirect).
- Le procédé repose sur le même principe que celui du transformateur. La source du champ magnétique variable correspond au circuit primaire (l'inducteur) tandis que le corps métallique chauffé, à travers lequel circule le courant de court-circuit, représente le circuit secondaire.
- Grâce à la production directe et immédiate de chaleur dans la pièce métallique ou le creuset métallique, le chauffage par induction offre une efficacité très élevée de l'énergie consommée, vu que très peu d'énergie est dissipée dans les matériaux environnants ou dans l'air, alors que presque toute l'énergie est fournie par le champ magnétique au métal solide ou au creuset et à sa charge (de la même manière que dans la cuisson par induction). Ce qui fait que moins de chaleur est rejetée dans la zone locale ou à la sortie du procédé.

b. Types de systèmes

- Systèmes fonctionnant à la fréquence du réseau, à haute fréquence et à double fréquence.
- Installations de fusion et d'attente :

- fours à induction à canal.
- fours à induction à haute fréquence.
- Systèmes de chauffage
 - bobines solénoïdes.
 - bobines d'induction plates.
 - types à convoyeur.

c. Applications

Chauffage direct des métaux (applications métallurgiques)

- Quasiment tous les modes de chauffage des métaux.
- Fusion et fonte de l'acier, de la fonte, de l'aluminium, du cuivre, du zinc, du plomb, du magnésium, des métaux précieux et alliages.
- Chauffage avant façonnage ou forgeage (brames, billettes, tôles, tubes, barres, pions, etc.).
- Traitements thermiques (trempe des engrenages et recuit des tubes, soudures, fils, tôles, etc.).
- Chauffage avant traitements de surface des pièces métalliques (nettoyage, séchage, décapage, galvanisation, étamage, émaillage, revêtements organiques, etc.).
- Soudage et brasage.
- Durcissement des époxydes.
- Chauffage sélectif de pièces et collage de corps métalliques et non métalliques.

6 Chauffage par induction

Chauffage indirect de matériaux dans des récipients métalliques

- Chauffage des filières et des platines de presse dans l'industrie des matières plastiques.
- Chauffage des réacteurs chimiques dans la fabrication des résines, peintures et encres.
- Chauffage des cuves dans l'industrie alimentaire.
- Chauffage des lits fluidisés.
- Fusion et cristallisation du verre, des oxydes réfractaires et des déchets nucléaires.

d. Avantages

La particularité marquante du chauffage par induction est l'absence de tout contact physique entre la source d'énergie et l'objet à chauffer. Parmi les autres avantages citons :

- Chauffage très rapide (immédiat) pour un temps de séjour moindre et une cadence de production accrue.
- Reproductible.
- Immédiat.
- Optimisé par résonance.
- Rendements élevés.
- Aucune énergie perdue pendant la marche à vide.
- Chauffage orienté avec possibilité de chauffage localisé et contrôle de la profondeur de pénétration; pas de risque de chauffage de composants non destinés au traitement.
- Réduction des pertes d'oxydation et absence de décarburation.
- Encombrement réduit.

- Amélioration notable des conditions de travail (par diminution de la chaleur et du bruit) et des conditions d'environnement (la chaleur est sur la pièce et non dans l'air qui l'entoure; les pertes de chaleur de l'équipement sont très faibles).
- Élimination des produits de combustion, des réactions indésirables et de la contamination.
- Brassage du bain dans les procédés de fusion (favorise l'homogénéité des alliages et une fusion rapide).
- Peut être employé dans des conditions à atmosphère contrôlée.
- Utilisation sécuritaire.

e. Limites

- Mal adapté aux pièces de forme irrégulière durant le forgeage.
- Exige de remplacer l'inducteur et parfois de procéder à une compensation pour les pièces de forme non répétitive.

f. Rendement type

- Densité de puissance très élevée : de 50 à 50 000 kW/m²
- Bon rendement global : de 70 à 75 % en moyenne et pouvant atteindre 90 %.
- Le rendement est fonction des paramètres de fonctionnement : géométrie des inducteurs, distance entre inducteurs et matériau, nature des matériaux à traiter, et propriétés des conducteurs des inducteurs, etc.

6 Chauffage par induction

- Puissance spécifique de sortie pouvant atteindre plusieurs MW.

g. Considérations de mise en œuvre

- Les matériaux à traiter peuvent être de bons ou de mauvais conducteurs d'électricité. Dans le premier cas (objets métalliques), le traitement est direct alors que dans le second cas, le matériau est chauffé indirectement par un récipient métallique lui-même chauffé par induction.
- Dimensions et forme de la pièce (les pièces plus petites ou plus minces sont en principe chauffées plus efficacement par chauffage direct par résistances).
- Le choix de la fréquence du champ magnétique variable est important car sa profondeur de pénétration et, par conséquent, celle de l'effet de chauffe, est inversement proportionnelle à la racine carrée de la fréquence.
- Il convient également de tenir compte de la perméabilité magnétique, de la résistivité électrique et de la conductivité thermique du matériau à chauffer, ainsi que de la façon dont ces paramètres varient en fonction de la température.
- La configuration des inducteurs est fonction de celle des matériaux; ils doivent être situés aussi près que possible l'un de l'autre pour obtenir un bon rendement.

h. Composants et terminologie

- La source de fréquence doit être choisie en fonction de la dimension et de la nature de l'objet, ainsi que du degré de pénétration souhaité. Ce degré dépend lui-même des exigences de l'application donnée. Les sources de courant oscillatoire peuvent être :
 - un transformateur 60 Hz.
 - des convertisseurs de fréquence et des oscillateurs dans la gamme de quelques dizaines de Hz à quelques MHz.
- Bobine inductrice (ou applicateur) transformant le courant oscillatoire en un champ magnétique alternatif de géométrie appropriée (il existe une grande diversité d'inducteurs). Les types de bobines employés dans l'industrie comprennent :
 - bobines d'induction solénoïdes pour les produits de grande dimension.
 - bobines d'induction tunnel pour des séries de petits objets.
 - bobines d'induction plates pour objets plats.
 - condensateurs ajustables.
 - fours de types divers (à creuset, à canal, à poche, à convoyeur, etc.).

i. Exemple d'installation

Forgeage à chaud de billettes 30 000 tonnes/an; 4 000 heures par an		
Paramètres	Induction	Four à gaz
Coût relatif d'installation	3	1
Efficacité du chauffage	60 %	15 %
Pertes dans les matériaux	0,75 %	3 %
Main-d'œuvre relative	1	2
Coût d'exploitation annuel relatif	1	1,3

D'après la référence 1

j. Sources pratiques d'information

<http://www.ihea.org/>

50

Industrial Heating Equipment Association – Répertoire des membres (fournisseurs de service et d'équipements de chauffage industriel : tous types et procédés et tous types de combustibles).

<http://www.ameritherm.com/appnotes.html>

Excellentes notes pratiques pour des applications spécialisées du chauffage par induction, particulièrement celles combinant métaux et matières plastiques.

k. Fournisseurs d'équipements et de services

http://www.industrialheating.com/CDA/Articles/Tabloid_Showcases

The International Journal of Thermal Technology – Ce site Web présente plusieurs fournisseurs d'équipements et de services en matière de chauffage par induction.

<http://www.cihinduction.com/>

La compagnie Cheltenham Induction Heating Limited fournit des équipements destinés à des applications de chauffage par induction d'une puissance de 1 à 120 kW.

<http://www.ameritherm.com/>

La compagnie Ameritherm fabrique des alimentations RF d'une puissance de 10 W à 250 kW fonctionnant à des fréquences comprises entre 5 et 400 kHz.

<http://www.rdoinduction.com/inductionheating.htm>

Fournisseur d'équipements de chauffage par induction pour chauffage, brasage, soudage, etc., destinés à des applications demandant des puissances d'une fraction de watt jusqu'à 100 kW, et des fondeuses à induction pour métaux précieux et alliages (jusqu'à 7,5 kW).

6 Chauffage par induction

<http://www.fluxtrol.com/>

Services de conception de bobines d'induction et de contrôle du flux, et produits pour concentration et redistribution du flux magnétique sur la pièce en cours de traitement.

<http://www.heattreatquotemaster.com/>

Services contractuels de traitement thermique – le Metal Treating Institute (MTI) représente le plus important réseau d'experts du traitement thermique commercial répondant aux besoins de spécialisation et de capacité des entreprises de traitement thermique intégrées. Le MTI est constitué d'entreprises commerciales de traitement thermique spécialisées dans de nombreux procédés et traitements de l'acier et des métaux et notamment le recuit, le brasage, le forgeage, le frittage, le trempage et autres traitements thermiques. Le Heat Treat QuoteMaster est un système convivial qui facilite le processus complet de sélection des fournisseurs en distribuant automatiquement les demandes de prix (RFQ) aux membres actifs du MTI à travers toute l'Amérique du Nord

<http://www.inductionatmospheres.com/>

“Induction Atmospheres” est un intégrateur de systèmes indépendant qui possède de vastes installations et laboratoires, une expertise en ingénierie, ainsi que des possibilités d'usinage et de fabrication sur place. Il offre des systèmes à induction clés en main pour chaînes de production de petites séries, y compris le brasage par induction en atmosphères contrôlées.

http://www.advancedenergy.org/industrial_process_heating

Advanced Energy est une organisation autonome sans but lucratif qui est en mesure d'évaluer, d'éprouver et de recommander des solutions impartiales dans le domaine des applications de chauffage industriel.

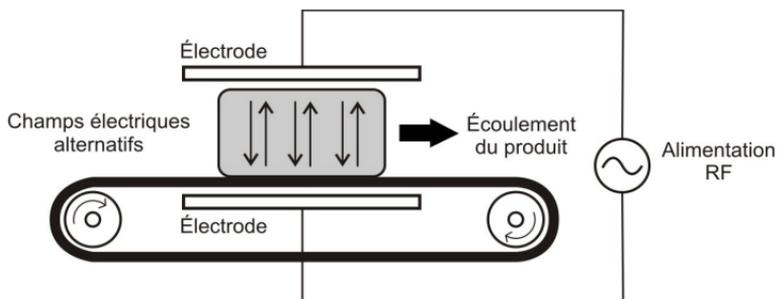
Avis : cette liste de fournisseurs ne constitue pas un répertoire complet ou exhaustif. La mention de tout produit, procédé, service ou vendeur dans cette publication ne l'est qu'à des fins purement documentaires et ne doit pas être considérée comme une recommandation de la part des auteurs ou des éditeurs.

6 Chauffage par induction

7 CHAUFFAGE PAR RADIOFRÉQUENCE

a. Principe

Lorsque l'on place un matériau non conducteur d'électricité dans un champ électrique à haute fréquence (alternatif), les charges des électrons et des protons des molécules du matériau tendent à s'aligner dans la direction du champ électrique appliqué. Il en résulte une vive agitation des molécules qui se transforme en chaleur à l'intérieur du matériau par suite de l'interaction moléculaire (frottement). La chaleur produite ne dépend nullement de la conductivité thermique du matériau lui-même; elle est plutôt fonction des propriétés diélectriques du matériau à traiter. La gamme des fréquences employées pour le chauffage diélectrique va de 10 MHz à 300 MHz. Le matériau à chauffer est disposé entre deux électrodes de telle sorte que le champ électrique oscillant existant entre ces deux plaques provoque l'échauffement des matières placées dans ce champ (voir l'illustration ci-dessous).



7 Chauffage par radiofréquence

Cette caractéristique est couramment employée pour accélérer le chauffage et le séchage des adhésifs dans la production des produits feuilletés, la chaleur étant engendrée à l'intérieur du matériau et n'ayant pas à traverser ce dernier par conduction depuis la surface.

b. Types de systèmes

- Fonctionnement sous fréquence fixe ou variable.
- Systèmes à chauffage discontinu ou continu (par ex., convoyeur).
- Systèmes à convoyeur (caractérisés par la configuration des électrodes.
 - électrodes plates pour objets épais.
 - de types à dispersion du champ pour bandes de tissu minces.
 - à types d'électrodes en quinconce pour feuilles épaisses.
- Systèmes de chauffage tubulaire (pour les liquides).

c. Applications

- Chauffage et évaporation de l'eau contenue dans les matériaux à sécher, sous réserve qu'ils soient isolants et de forme assez régulière (papier, carton, planches, textiles, bois, etc.).
- Chauffage de tout matériau isolant, sous réserve qu'il ait un facteur de pertes diélectriques élevé (colles, matières plastiques, résines, etc.).
- Parmi les applications qui sont mises en œuvre par les utilisateurs industriels, citons :

7 Chauffage par radiofréquence

- ajustement du niveau de séchage et d'humidité des bandes de tissu, feuilles, planches et matériaux en vrac.
- séchage des revêtements à base d'eau, encres et adhésifs dans la fabrication et la transformation du papier.
- séchage sous atmosphère ou sous vide des produits du bois et des bois d'œuvre et de charpente de dimensions courantes.
- séchage et application de teintures sur les fils textiles, tissus et vêtements.
- séchage des fils de fibre de verre et des fils de base coupés.
- séchage des pièces crues en céramique avant cuisson.
- séchage des noyaux de moules en sable à base de résine.
- séchage des gâteaux de filtration.
- collage des stratifiés, sacs en papier et boîtes de carton.
- soudage et scellage des matières plastiques.
- préchauffage des feuilles de plastique avant façonnage et moulage.
- chauffage et durcissement des panneaux composites.
- contrôle du séchage et de l'humidité après cuisson des biscuits, craquelins, céréales et autres produits alimentaires.
- chauffage, cuisson et pasteurisation des matières fluides.
- traitement thermique, désinfestation et pasteurisation des matières ensachées.
- stérilisation des déchets médicaux.

d. Avantages

- Ce procédé permet le chauffage direct et instantané de l'intérieur des matériaux diélectriques (ce qui est impossible dans les méthodes classiques de chauffage).
- Possibilité de mise en œuvre de densités de puissance élevées tout au long du procédé, ce qui réduit ainsi notablement la durée du traitement et l'encombrement de l'équipement; productivité accrue.
- *Pour le séchage :*
 - gradient avantageux d'élimination d'eau.
 - rendement élevé même dans le cas du séchage final.
 - chauffe sélective de l'eau : "ajustement du niveau d'humidité" à l'intérieur du matériau traité sans surchauffe du produit (ce qui se traduit par une consommation d'énergie moindre et une meilleure qualité).
 - consommation d'énergie haute fréquence (RF) dans le cas des matériaux humides seulement; avantageux pour le chauffage de pièces distinctes ou espacées (chauffage intermittent).
- Transfert de chaleur sensiblement indépendant de la température et du débit de l'air de ventilation :
 - ventilation réduite (débit et énergie) au minimum strictement nécessaire pour l'élimination de l'humidité.
 - fonctionnement à basse température (réduction des pertes à travers les parois et par la cheminée de ventilation).
- Mise en marche et arrêt instantanés.

e. Limites

- Coûts d'investissement élevés :
 - les applications sont plus économiques dans le cas des produits à valeur ajoutée élevée.
 - les applications sont plus économiques dans le cas d'utilisation combinée avec des procédés moins coûteux (par ex. infrarouges, air chaud).
- Une protection du personnel contre les rayonnements électromagnétiques est nécessaire.

Comparaisons avec le chauffage par hyperfréquences (micro-ondes)

On utilise l'expression **chauffage diélectrique** pour décrire l'ensemble des techniques de chauffage par radiofréquence et par hyperfréquences (micro-ondes ou MW). Ces deux techniques de chauffage diffèrent notamment par le comportement des divers matériaux traités et par la nature des composantes employées :

- Le coût d'investissement de l'équipement de chauffage par radiofréquence RF est environ moitié moindre que celui de l'équipement à micro-ondes.
- Dans le chauffage par radiofréquence RF, aucune puissance n'est dissipée lorsqu'il n'y a pas de charge (contrairement au chauffage par micro-ondes).
- Les puissances de sortie des sources de chauffage RF (tubes ou amplificateurs à semi-conducteurs) sont plus élevées que celles utilisées pour le chauffage MW, ce qui entraîne par suite une réduction de l'échelle des

7 Chauffage par radiofréquence

prix (RF : jusqu'à 900 kW_{RF}; MW : jusqu'à 75 à 100 kW_{MW}).

- Le chauffage RF est mieux adapté aux matériaux plats et de grandes dimensions (puissance uniforme et type d'applicateurs), alors que le traitement des produits de forme irrégulière est plus aisé dans les cavités multi-modes MW.
- Les choix du chauffage RF sont plus étendus pour des adaptations aux différentes situations.
- Le chauffage MW est mieux adapté aux matériaux ayant un faible facteur de pertes diélectriques.
- Le chauffage MW se prête mieux aux applications exigeant des densités de puissance élevées sans qu'il y ait de claquage (par ex. amorçage d'arc).

f. Rendement type

60

- Efficacité de conversion de l'électricité en RF : de 55 à 70 %; jusqu'à 80 % avec la technologie des amplificateurs haute fréquence à semi-conducteurs.
- Rendement global du procédé : de 50 à 70 %.
- Rendement global plus élevé dans les systèmes à fréquence flottante, qui exigent toutefois un niveau supérieur de blindage RF.
- Pour le séchage, le rendement reste encore élevé, même lors des phases finales de séchage.
- Densité de puissance réalisable : pouvant atteindre 200 kW_{RF}/m²
- Puissance unitaire : pouvant atteindre 900 kW_{RF}/tube.
- Durée de vie utile des tubes : de 5 000 à 10 000 heures.

g. Considérations de mise en œuvre

- Les matériaux à traiter doivent être diélectriques, c.-à-d. non conducteurs d'électricité, sinon, le champ électrique est entièrement réfléchi et ne peut pénétrer dans le matériau.
- Le traitement (chauffage, séchage, collage, etc.) peut être effectué en discontinu ou en continu.
- La fréquence choisie peut varier en fonction de la réaction du matériau; cette fréquence peut être variable ou fixe.
- Les pièces à traiter devront être de préférence de forme régulière ou plate.
- Les types d'électrodes et de convoyeur, la densité de puissance et la puissance totale à installer doivent être déterminés.
- La possibilité de combiner la technique des hautes fréquences avec une autre technique telle que celle des infrarouges ou de l'air chaud devra être sérieusement envisagée.

h. Composants et terminologie

Générateur de chauffage à haute fréquence

- Oscillateur RF à triode alimenté en courant continu haute tension.
- Peut fonctionner selon deux modes :
 - à fréquence fixe.
 - à fréquence variable (qui s'adapte automatiquement à la charge de matériau se trouvant dans l'applicateur).

7 Chauffage par radiofréquence

- Trois bandes de fréquences sont allouées par la réglementation gouvernementale : 13,56 MHz, 27,12 MHz et 40,68 MHz.
Seules les fréquences autorisées peuvent être utilisées dans les systèmes ouverts.
- Pour les fours qui sont fermés et blindés de façon appropriée, les fréquences employées peuvent aller de 1 à 300 MHz.

Applicateurs de champ électrique (trois principaux types)

- Avec plaques parallèles situées de chaque côté du produit à traiter; employé lorsque le produit est épais ou de forme complexe.
- Avec un système “strayfield” d'électrodes (tiges) de polarité alternée situées sur un des côtés du produit traité, lequel est très mince, plat et présente une grande surface.
- Avec électrodes disposées en quinconce (ou feston) sur les deux côtés du produit traité, lequel est relativement mince, plat et présente une grande surface.

Four

- Traitement discontinu ou continu (tunnel).
- Convoyeur isolant (fibre de verre et téflon) ou châssis en acier glissant sur une plaque d'acier raccordée à la terre.
- Zone d'entrée pour atténuation du champ électromagnétique.

i. Exemples d'installations

Séchage final du papier

600 kW_{RF} (1000 kW). 1925 m²/min de papier (60 à 120 g/m²); augmentation de 30 % de la cadence de production; rendement de chauffage global RF de 70 %; diminution de 10 % de la consommation d'énergie pour l'ensemble de la machine : uniformité du profil d'humidité de $\pm 0,5$ % [Réf. 1, 3].

Collage de bois

4 kW_{RF} pour 0,1 m² de joints en 1 à 2 minutes; 100 kW_{RF} pour 4 m³/h de contreplaqué; 900 kW_{RF} (1450 kW_{élect}) pour la fabrication de panneaux en carton-fibre de 2,2 cm d'épaisseur à la cadence de 15,7 kg/m² en 4 minutes [Réf. 1, 3].

j. Sources pratiques d'information

Association for Microwave Power in Europe for Research and Education (AMPERE)

AMPERE EUROPE LIMITED, IPTME, Loughborough University, Loughborough LE11 3TU UK

Site Web : <http://www.ampereurope.org>

International Microwave Power Institute (IMPI)

7076 Drinkard Way, Mechanicsville, VA 23111 USA

Tél. : (804) 559-6667 / télécopieur : (804) 559-4087

Site Web : <http://www.impi.org>

7 Chauffage par radiofréquence

k. Fournisseurs d'équipements et de services

Heatwave USA, Inc.

2700 Orchard Ave., McMinnville, OR 97128 USA

Tél. : (971) 241-5060 / Site Web : <http://www.heatwave.com>

Nemeth Engineering Associates, Inc.

5901 W. Highway 22, Crestwood, KY 40014 USA

Tél. : (502) 241-1502 / télécopieur : (502) 241-5907

Site Web : <http://www.nemeth-engineering.com>

Petrie Technologies Ltd.

Ackhurst Road, Chorley, Lancashire PR7 1NH UK

Tél. : +44 (1257) 241 206 / Fax: +44 (1257) 267 562

Site Web: <http://www.petrield.com>

64

PSC Division of C. A. Litzler Co., Inc.

21761 Tungsten Road, Cleveland, OH 44117 USA

Appel sans frais : 1-800-538-1337 / tél. : (216) 531-3375

télécopieur : (216) 531-6751 /

Site Web : <http://www.pscrfheat.com>

Radio Frequency Company, Inc.

150 Dover Road, P.O. Box 158, Millis, MA 02054-0158 USA

Tél. : (508) 376-9555 / télécopieur : (508) 376-9944

Site Web : <http://www.radiofrequency.com>

Strayfield Limited

Ely Road, Theale, Berkshire, RG7 4BQ UK

Tél. : +44 (0)870 428 1086 / télécopieur : +44 (0)870 428 1087

Site Web : <http://www.strayfield.co.uk>

Amplificateurs de puissance à haute fréquence à semi-conducteurs

Nautel Limited

10089 Peggy's Cove Rd, Hackett's Cove, NS B3Z 3J4 Canada

Tél. : (902) 947-8200 / télécopieur : (902) 947-3693

Site Web : <http://www.nautel.com>

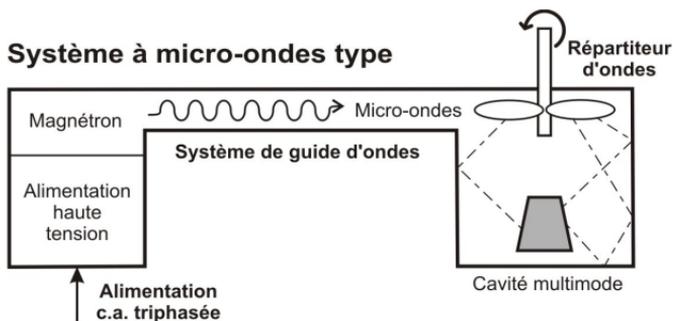
Avis : cette liste de fournisseurs ne constitue pas un répertoire complet ou exhaustif. La mention de tout produit, procédé, service ou vendeur dans cette publication ne l'est qu'à des fins purement documentaires et ne doit pas être considérée comme une recommandation de la part des auteurs ou des éditeurs.

7 Chauffage par radiofréquence

8 CHAUFFAGE PAR MICRO-ONDES (HYPERFRÉQUENCES)

a. Principe

Le matériau à chauffer est soumis à un champ électromagnétique à ultra-haute fréquence (UHF). Ce champ entraîne une déformation ou une oscillation des molécules à l'intérieur du matériau. L'énergie des déplacements alternés des molécules est convertie en chaleur à l'intérieur du matériau du fait de l'interaction intermoléculaire (par ex. frottement). La chaleur produite ne dépend pas de la conductivité thermique du matériau lui-même, mais plutôt des propriétés diélectriques du matériau traité. Dans le chauffage par micro-ondes, on utilise un générateur d'ondes à ultra-haute fréquence (magnétron) pour produire le champ UHF (de 915 ou 2450 MHz) et un guide d'ondes (tube métallique), une tuyère ou un cornet pour orienter l'énergie dans un matériau ou à l'intérieur d'une enceinte dans laquelle se trouve le matériau à chauffer. La figure ci-dessous illustre un système type.



b. Types de systèmes

Systèmes discontinus

- Multi-mode (c.-à-d. cavité de chauffage de grande dimension ou four).
- À mode unique (c.-à-d. zone de chauffage de petite dimension, densité de puissance élevée).
- Types tubulaires (pour les liquides) :
 - ondes stationnaires.
 - serpentín ou tube spiralé.
- Guide d'ondes rayonnant à fentes.
- Cornet rayonnant.

Systèmes continus

- Multi-mode (c.-à-d. cavité de chauffage de grande dimension ou four).
- À mode unique (c.-à-d. zone de chauffage de petite dimension, densité de puissance élevée).
- Types tubulaires (pour les liquides) :
 - ondes stationnaires.
 - serpentín ou tube spiralé.
- Systèmes à tube rotatif (pour les matériaux granulaires ou en poudre).
- Guide d'ondes à fentes (pour les bandes de tissu).
- Guide d'ondes rayonnant à fentes.

c. Applications

- Chauffage et évaporation de l'eau dans les matériaux diélectriques nécessitant un séchage, même de formes

8 Chauffage par micro-ondes (hyperfréquences)

complexes, sous réserve qu'ils n'aient pas des dimensions trop importantes.

- Préchauffage et vulcanisation de produits en caoutchouc.
- Chauffage et décongélation partielle de la viande congelée et autres produits alimentaires.
- Cuisson du bacon et d'aliments divers.
- Séchage des pâtes alimentaires.
- Déshydratation sous vide de produits alimentaires
- Séchage à froid.
- Blanchiment des légumes.
- Séchage et durcissement de revêtements sur les tapis, textiles, papiers, matières plastiques, appareils électroniques.
- Opérations de teintures sur les textiles.
- Stérilisation de marchandises déjà emballées.
- Stérilisation de déchets médicaux.
- Séchage de noyaux de moulage (sable et résine) et des moules en thermomousse.
- Séchage des produits en céramique avant cuisson.
- Séchage de la coquille de moulage à la cire perdue entre les trempages.
- Séchage des produits du bois, du textile et du papier.
- Frittage des céramiques.
- Polymérisation.
- Traitement des déchets nucléaires ou toxiques.
- Production de plasma dans les procédés chimiques.

d. Avantages

- Aptitude particulière à chauffer l'intérieur des matériaux diélectriques (chauffage volumétrique)

8 Chauffage par micro-ondes (hyperfréquences)

directement et instantanément, ce qui est impossible avec les procédés de chauffage classiques.

- Possibilité d'employer des densités de puissance très élevées; il en résulte des équipements de taille réduite et une productivité accrue (du fait des durées de chauffage plus courtes).
- Dans certaines applications, le chauffage sélectif permet d'appliquer l'énergie et le chauffage là où ils sont nécessaires et d'obtenir un rendement et une productivité élevés.
- Production d'un gradient de température favorisant l'élimination de l'eau ou le séchage.
- Réduction des pertes de matériaux et production améliorée en termes de quantité.
- Démarrage et arrêt quasiment instantanés, réduisant les pertes d'énergie des périodes d'attente.
- Le transfert de chaleur relativement indépendant de la circulation d'air réduit les besoins en écoulement d'air et de température élevés, diminuant ainsi les pertes de chaleur.

e. Limites

- Coût d'investissement élevé.
- Faible puissance unitaire; peut nécessiter de multiples sources d'énergie et limiter la taille de l'installation.
- Effets de chauffage indésirables avec certains matériaux (augmentation de température incontrôlable, brûlure).
- Nécessité de blindage contre le rayonnement électromagnétique.

8 Chauffage par micro-ondes (hyperfréquences)

- Le traitement uniforme de surfaces importantes peut s'avérer difficile.

f. Rendement type

- Le rendement global du procédé (de 50 à 70 %) est bien plus élevé que celui des techniques classiques de chauffage, et la consommation d'énergie est fortement réduite en raison des durées de traitement plus courtes et de la possibilité de chauffage sélectif.
- La densité de puissance peut atteindre 500 kW/m^2
- La puissance unitaire de générateur peut atteindre 30 kW par tube à 2450 MHz, et 100 kW par tube à 915 MHz.
- La durée de vie du tube de puissance atteint en moyenne de 5 000 à 8 000 heures

g. Considérations de mise en œuvre

- Les matériaux à traiter doivent être diélectriques, c.-à-d. non conducteurs d'électricité, sinon, le champ électrique est entièrement réfléchi et ne peut pénétrer dans le matériau.
- Type d'applicateur et configuration (par lots ou continu).
- Fréquence de fonctionnement.
- Densité de puissance et puissance totale nécessaire.
- Facteur de pertes diélectriques du matériau à traiter, et changements en fonction de la température.
- Possibilité de combiner la technique avec d'autres technologies de chauffage.

8 Chauffage par micro-ondes (hyperfréquences)

h. Composants et terminologie

Générateur

- Tubes magnétron ou klystron alimentés en courant continu haute tension.

Système de guide d'ondes

- Isolateurs / circulateurs à 3 accès.
- Guides d'ondes, antennes, antenne fictives, et réglers.

Applicateurs (principaux types)

- Multi-mode, cavité compartimentée (par ex. four micro-ondes ménager).
- Multi-mode, tunnel.
- Guide à fentes.
- Guide d'ondes rayonnant à fentes.
- Applicateur à onde progressive.
- Cavité résonante à mode unique.

Fréquence

- Comprise entre 300 MHz et 300 GHz. Les appareils de chauffage de classe industrielle fonctionnent en général à une fréquence de 915 MHz ou 2450 MHz.

i. Exemple d'installation

Vulcanisation de profilés extrudés en caoutchouc		
Paramètres	Système à micro-ondes	Système à bain de sel
Configuration du système	Chauffage continu par micro-ondes (2450 MHz) avec une section à air chaud	Bain de sel fondu en continu
Longueur de la partie chauffante	Section à micro-ondes : 2,8 à 8,8 m Section à air chaud : 6,6 m	Longueur du réservoir : de 7 à 15 m
Température de fonctionnement	Température de l'air chaud pouvant atteindre 260 °C	Température du bain de sel : 200 à 250 °C
Démarrage du procédé	Démarrage et chauffage presque instantanés	Préchauffage d'environ 2 heures requis
Transfert de chaleur	Chauffage volumétrique, adapté aux sections épaisses	Chauffage de la surface par contact, avec chauffage du noyau par conduction
Taille limite d'extrusion	Sections pouvant atteindre environ 200 mm ²	Épaisseur jusqu'à 25 mm (limitée par le coefficient de transmission de chaleur)
Cadence de production	45 m à la minute	25 m à la minute (pour 50 g par m de produit)
Nettoyage du produit après transformation	Non nécessaire	Le nettoyage est essentiel
Consommation de sel	Aucune	4 à 5 kg à l'heure

D'après les références 1 et 3

j. Sources pratiques d'information

Association for Microwave Power in Europe for Research and Education (AMPERE)

AMPERE EUROPE LIMITED, IPTME, Loughborough University, Loughborough LE11 3TU UK
Site Web : <http://www.ampereurope.org>

International Microwave Power Institute (IMPI)

7076 Drinkard Way, Mechanicsville, VA 23111 USA
Voice: (804) 559-6667 / Fax: (804) 559-4087
Site Web : <http://www.impi.org>

k. Fournisseurs d'équipements et de services

Cober Electronics, Inc.

151 Woodward Avenue, Norwalk, CT 06854 USA
Tél. : (203) 855-8755 / télécopieur : (203) 855-7511
Site Web : <http://www.cober.com>

CoberMuegge LLC

151 Woodward Avenue, Norwalk, CT 06854 USA
Tél. : (203) 852-0343 / télécopieur : (203) 852-0214
Site Web : <http://www.cobermuegge.com>

Environmental Waste International

283 Station Street, Ajax ON L1S 1S3 Canada
Tél. : (905) 686-8689 / télécopieur : (905) 428-8730
Site Web : <http://www.ewmc.com>

The Ferrite Company Inc.

165 Ledge Street, Nashua, NH 03060 USA

Appel sans frais : 1-800-854-1466 / Tél. : 603-881-5234

Site Web : <http://www.ferriteinc.com>

Industrial Microwave Systems LLC

3000 Perimeter Park Drive - Building I, Morrisville,
NC 27560 USA

Appel sans frais : 1-888-321-4467 / Tél. : 919-990-9900

Télécopieur : 919-990-9596

Site Web : <http://www.industrialmicrowave.com>

Microdry Incorporated

5901 W. Highway 22, Crestwood, KY 40014 USA

Tél. : (502) 241-8933 / télécopieur : (502) 241-8648

Site Web : <http://www.microdry.com>

Microwave Research and Applications, Inc.

8673 Cherry Lane, Laurel MD 20707 USA

Tél. : (866) 953-1771 / télécopieur : (301) 369-0523

Site Web : <http://www.microwaveresearch.com>

Thermex-Thermatron Inc.

11524 Commonwealth Dr., Louisville, KY 40299 USA

Tél. : (502) 266-5454 / télécopieur : (502) 266-5453

Site Web : <http://www.thermex-thermatron.com>

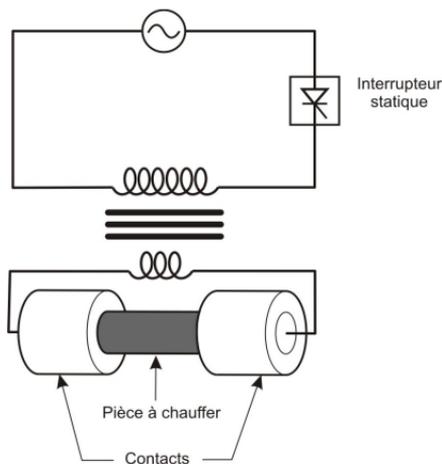
Avis : cette liste de fournisseurs ne constitue pas un répertoire complet ou exhaustif. La mention de tout produit, procédé, service ou vendeur dans cette publication ne l'est qu'à des fins purement documentaires et ne doit pas être considérée comme une recommandation de la part des auteurs ou des éditeurs.

8 Chauffage par micro-ondes (hyperfréquences)

9 CHAUFFAGE DIRECT PAR RÉSISTANCE

a. Principe

Le chauffage direct par résistance met en œuvre le passage d'un courant continu ou alternatif directement à travers le produit à chauffer. Vu que la pièce à chauffer doit être conductrice d'électricité, on donne souvent au chauffage direct par résistance le nom de "chauffage par conduction"



Dans ce type de chauffage, on doit employer des électrodes de type à pince ou circulaires qui assurent le contact physique avec le produit à chauffer. Voir le schéma ci-dessus. Dans le cas des produits alimentaires, la sauce ou le jus constitue la composante qui conduit le courant électrique, ce qui fait que le procédé est parfois appelé "chauffage ohmique". La résistance (R) qu'oppose le produit au passage du courant (I) qui le traverse engendre l'énergie thermique I^2R . Les courants à basse fréquence (60 Hz) chauffent la pièce toute entière, alors que les courants à haute fréquence (400 kHz) chauffent plutôt la surface de la pièce.

b. Types de systèmes

- Réchauffeur de métal (réchauffeur de billettes, traitement thermique).
- Soudage par résistance (soudage par points, soudage continu, etc.).
- Chauffage et fusion de produits non métalliques (par ex. verre, carbure de silicium, bains de sel).
- Dispositifs de cuisson et de stérilisation des aliments (désignés couramment sous le nom de “chauffage ohmique”).
- Générateurs de vapeur (par ex. chaudières à électrodes haute tension, générateurs d’humidité employés dans les systèmes CVC de bâtiments).

c. Applications

- Traitement thermique des métaux.
- Chauffage des métaux ferreux avant formage ou façonnage.
- Réchauffage de métaux.
- Fusion des métaux.
- Assemblage de métaux : soudage par points, continu et par étincelage.
- Fusion du verre.
- Chauffage de l’eau et production de vapeur.
- Cuisson et stérilisation des aliments.
- Production d’électrodes en graphite.
- Cure accélérée du béton.

d. Avantages

- Vitesse rapide de chauffage.
- Le chauffage se produit aux emplacements voulus.
- Rendement élevé : seule la pièce à chauffer est traitée.
- Aucun produit de combustion n'est engendré.
- Réduction de l'espace nécessaire aux équipements.
- Coûts d'investissement modérés.

e. Limites

- Les surfaces de contact doivent être propres et non oxydées de façon à assurer une bonne connexion électrique.

Chauffage

- Pour un chauffage homogène, les pièces doivent avoir une section uniforme.
- La pièce doit être longue et mince (c.-à-d. avoir un rapport longueur/diamètre égal à au moins 6:1).
- Est mieux adapté aux petites sections (c.-à-d. de diamètre inférieur à 3 cm).
- Les gros systèmes (par ex. pour la fusion du verre) peuvent avoir des cadences de production limitées par les caractéristiques de l'alimentation électrique.

Soudage

- La configuration des pièces doit assurer une résistance élevée au passage du courant.

f. Rendement type

- La densité de puissance peut aller jusqu'à 100 kW et atteindre 10^5 kW/m²
- Conversion d'énergie électrique : > 95 %.
- Rendement global de procédé : en principe de 75 % à 95 %.

g. Considérations de mise en œuvre

- Forme, dimension et homogénéité du matériau (pour un chauffage uniforme); de façon générale < 3 cm de diamètre et rapport longueur/diamètre égal à au moins 6:1.
- Résistivité électrique du matériau (équilibre tension/courant).
- Résistances des connexions (surchauffe localisée).
- Pertes thermiques à travers les surfaces (radiation, convection) et dans les connexions (conduction).
- Tension et puissance de l'alimentation (c.c., c.a., puissance nécessaire).
- Effet pelliculaire (l'énergie dissipée varie selon la fréquence de fonctionnement et la profondeur de pénétration du courant).

h. Composants et terminologie

- Alimentation électrique.
- Système de commande et de régulation du procédé.
- Dispositifs de raccordement et circuit d'entrée du courant.
- Chambre de traitement (option).
- Système de manutention des matériaux.

i. Exemple d'installation

Chauffage pour forgeage de pièces brutes		
Paramètres	Chauffage direct par résistance	Four à combustible fossile
Configuration du système	Chauffage individuel des pièces brutes	Chauffage par lots de barres longues
Température de forgeage des pièces brutes recherchée	1230 °C	1230 °C
Contrôle de température des pièces brutes	Automatisé	Jugement de l'opérateur
Temps de chauffage	< 15 sec	de 15 à 20 minutes
Rendement énergétique	~ 85 %	de 17 % à 20 % (sans récupération) de 35 % à 40 % (avec récupération)
Énergie consommée	~ 280 kWh/tonne	~ 140 m ³ GN /tonne ~ 70 m ³ GN /tonne (avec récupération)
Formation d'oxyde	Faible ou aucune < 0,5 %	Notable ~ 2 %
Travail relatif d'opérateur nécessaire	0,5 x	1 x
Surface relative d'usine nécessaire	0,8x	1 x
Environnement en usine	Plus frais & plus propre	Chaud, avec fumées et impuretés provenant du four

D'après les références 19 et 20

9 Chauffage direct par résistance

j. Sources pratiques d'information

Chauffage ohmique des aliments

Ohio State University

http://www.osc.edu/research/video_library/ohmic.shtml
<http://ohioline.osu.edu/fse-fact/0004.html>

Agroalimentaire Canada

http://sci.agr.ca/crda/pubs/art10_e.htm

Soudage et assemblage par points

Resistance Welding Manufacturers Alliance

550 NW LeJeune Road, Miami, FL 33126 USA

Tél. : (305) 443-9353 / télécopieur : 305-442-7451

Site Web: <http://www.aws.org/rwma/index.html>

k. Fournisseurs d'équipements et de services

Équipement de chauffage

IHS (an Inductotherm Group Company)

5009 Rondo Drive, Fort Worth, TX 76106 USA

Appel sans frais : 1-800-486-5577 / tél. : (817) 625-5577

télécopieur : (817) 625-1872 /

Site Web : <http://www.ihs-usa.com>

Composants et équipements de soudage

Huys Industries Ltd.

175 Toryork Dr., #35, Weston (ON) M9L 1X9 Canada
Appel sans frais : 1-800-461-9936 / tél. : (416) 747-1611
télécopieur : (416) 747-7171
Site Web : <http://www.huysindustries.com>

Resistance Welding Products Ltd.

9270, rue Marlborough, C.P. 670, Blenheim (ON)
N0P 1A0 Canada
Appel sans frais : 1-800-265-5262 / tél. : (519) 676-8173
télécopieur : (519) 676-3329 /
Site Web : <http://www.rwpweld.com>

WTC Canada

240, chemin Cordova, Oshawa (ON) L1H 7N1 Canada
Tél. : (905) 433-1230 / télécopieur : (905) 433-1257
Site Web: <http://www.wtc.ca>

Chaudières

A E P Thermal Inc.

8190, boul. Montview, Montréal (QC) H4P 2L7 Canada
Tél. : (514) 342-5656 /
Site Web : <http://www.acmeprod.com>

Electric Steam Generator Corp.

600 S. Oak St. P.O. Box 21, Buchanan, MI 49107 USA
Appel sans frais : 1-800-714-7741 / télécopieur : (269)
695-7777
Site Web : <http://www.esgcorp.com>

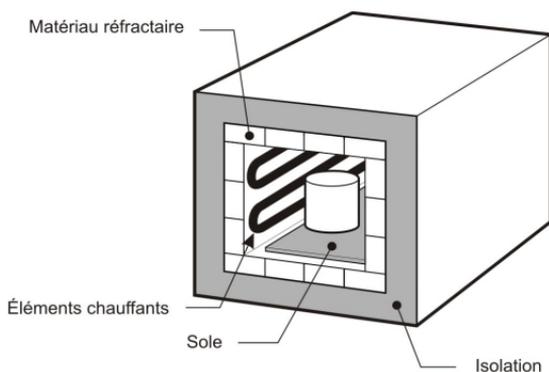
9 Chauffage direct par résistance

Avis : cette liste de fournisseurs ne constitue pas un répertoire complet ou exhaustif. La mention de tout produit, procédé, service ou vendeur dans cette publication ne l'est qu'à des fins purement documentaires et ne doit pas être considérée comme une recommandation de la part des auteurs ou des éditeurs

10 CHAUFFAGE INDIRECT PAR RÉSISTANCE

a. Principe

Le chauffage indirect par résistance met en œuvre le passage du courant à la fréquence du réseau à travers des éléments chauffants de résistance élevée. La résistance opposée au passage du courant engendre de la chaleur et cette chaleur est transférée au matériau à traiter par conduction, convection, et/ou rayonnement. Les températures des matériaux traités peuvent varier de la température ambiante jusqu'à 1700 °C (3100 °F) ou plus (sous atmosphère inerte), selon l'application et le type des éléments chauffants. Ce type de chauffage est en principe effectué dans une enceinte bien isolée, comme par exemple un four électrique. On minimise ainsi les pertes thermiques pour obtenir un rendement de chauffage élevé qui est généralement de l'ordre de 80 %.



b. Types de systèmes

On peut employer le chauffage indirect par résistance de plusieurs façons différentes :

- Modes de chauffage à la demande dans lesquels interviennent une grande diversité d'éléments chauffants à résistances encastrées.
- Contact direct avec le matériau à chauffer (par ex. chauffe-eau à éléments immergés).
- En chauffant une substance intermédiaire (par ex. air chaud de séchage).
- Comme source de chaleur dans une enceinte à isolation thermique (par ex. four).

Pour les applications de fours, on peut utiliser plusieurs types d'éléments chauffants et d'enceintes, en fonction des températures désirées, du produit à chauffer et du procédé. On retrouve quatre catégories de fours à résistance :

- Fours à atmosphère normale ou contrôlée.
- Fours à procédé par lots ou à procédé continu.
- Fours à chargement par lots (manuel, motorisé, etc.).
- Fours à chargement continu (par ex. à bande transporteuse).

c. Applications

On utilise le chauffage indirect par résistance dans une grande diversité d'applications dont notamment :

- Chauffage et fusion de métaux ou d'autres substances (colle, cire, etc.).

- Traitements thermiques.
- Vitrification de céramiques, verres, émaux.
- Torrification et grillage (poudres, grains, etc.).
- Frittage de céramiques.
- Cuisson, cuisson au four et rôtissage des produits alimentaires .
- Processus de séchage et de durcissement (peinture, vernis, etc.).
- Chauffage de l'eau et des liquides.
- Production de vapeur.
- Chauffage de l'air et des gaz.

d. Avantages

- Techniques simples et ayant fait leurs preuves.
- Souplesse d'application.
- Commande et automatisation faciles.
- Faibles coûts d'entretien.
- Remplacent facilement les brûleurs à mazout ou au gaz.
- Aucune production de fumée, de poussière ou de gaz de combustion.
- L'équipement compact et efficace au point d'utilisation améliore la qualité du produit et l'environnement du lieu de travail.
- Compatible avec les atmosphères spéciales ou le vide.

e. Limites

- Température de la charge limitée par le point de fusion du matériau réfractaire (silice : 1700 °C; graphite : 3000 °C; etc.) et par la température

10 Chauffage indirect par résistance

maximale de fonctionnement qu'admettent les éléments chauffants électriques employés (fer, nickel et chrome : 1000 °C; graphite : 1800 °C, etc.).

- Coefficient de transfert de chaleur entre les éléments chauffants et la charge.
- Durée de vie utile des éléments chauffants.
- Les coûts de fonctionnement peuvent s'avérer élevés (en fonction du coût de l'électricité).

f. Rendement type

- Conversion d'énergie électrique : > 95 %.
- Densité de puissance : elle peut atteindre jusqu'à 70 kW/m² de la surface des parois du four.

g. Considérations de mise en œuvre

- Nature et dimensions de la charge.
- Méthode de transfert de chaleur reposant sur la température souhaitée (au-dessus de 500 °C, le rayonnement prédomine).
- Type et forme des éléments chauffants.
- Pertes thermiques à travers les parois et par les ouvertures.
- Méthode d'utilisation du four (continu/discontinu).
- Application (chauffage, préchauffage, cuisson, etc.).

h. Composants et terminologie

- Alimentation (généralement 60 Hz).
- Système de commande et/ou de régulation (tout ou rien, proportionnelle, intégrale, dérivée (PID), etc.).

10 Chauffage indirect par résistance

- Four (enceinte, à sole mobile, à creuset, à tambour, à cloche, tunnel, etc.).
- Équipements de refroidissement auxiliaires, ventilateurs.
- Système de manutention des matériaux (convoyeur, par vibration, vis d'Archimède, etc.).
- Matériaux isolants et réfractaires (type, épaisseurs, etc.).
- Éléments chauffants.

Matériaux isolants réfractaires			
Type de matériau isolant	Coefficient K- (W/m·°C)	Densité (kg/m³)	Coût relatif
Céramique fibreuse	0,19	0,1	0,5
Béton isolant	0,27	1,25	0,7
Brique isolante	0,28	0,8	0,4
Brique comprimée	1,4	2,3	1,0

Types d'éléments chauffants			
Famille d'éléments chauffants	Matériau	Température maximale de l'élément (°C)	Application - Remarques
Alliages fer-nickel-chrome	Fe-20Ni-25Cr	900	Couramment utilisés en raison de leur disponibilité et de leur faible coût Gamme de températures étendue Employés en atmosphères oxydantes
	Fe-45Ni-23Cr	1050	
	Fe-65Ni-15Cr	1100	
	80Ni-2-Cr	1150 to 1200	
Alliages fer-chrome-aluminium	Fe-22Cr-14.5Al	1280	Températures plus élevées que le Ni-Cr pour un prix sensiblement identique Fragilisation lors du premier chauffage Employés en atmosphères oxydantes
	Kantal AF	1400	
Alliages non métalliques	SiC (carbure de silicium)	1600	Les barres sont cassantes – sensibles aux chocs thermiques et mécaniques Employés en atmosphères oxydantes ou réductrices
	Cr ₂ O ₃ La ₂ O ₃ (chromite de lanthane)	1800 to 1900	
	Graphite	2500	
Métaux nobles	Molybdène	2300	Fil ou plaques Coût très élevé Seulement en atmosphères neutres ou réductrices, ou sous vide
	Tungstène	2500	
	Tantale	2500	

i. Exemple d'installation

Fusion de l'aluminium dans une fonderie		
Paramètres	Four de fusion électrique à résistances	Four de fusion au gaz naturel
Efficacité de chauffage	~ 70 %	de 15 à 20 %
Pertes dans le métal (formation d'écume)	Faibles ou nulles < 1 %	Très importantes ~ 12 %
Coût d'entretien relatif	0,72 x	1 x
Production relative	1,1 x	1 x

D'après la référence 21

j. Sources pratiques d'information

<http://www.ihea.org/>

Répertoire des membres (fournisseurs de service et d'équipements de chauffage industriel : tous types et procédés et tous types de combustibles).

k. Fournisseurs d'équipements et de services

ASB Heating Elements Ltd.

20, rue Bethridge, Toronto (ON) M9W 1N1 Canada

Appel sans frais : 1-800-265-9699 / tél. : (416) 743-9977

télécopieur : (416) 743-9424 /

Site Web: <http://www.asbheat.com>

10 Chauffage indirect par résistance

Bucan Electric Heating Devices, Inc.

3300, boul. Pitfield, St-Laurent (QC) H4S 1K6 Canada

Tél. : (514) 335-9665 / télécopieur : (514) 335-9804

Site Web : <http://www.bucan.com>

Tempco Electric Heater Corporation

607 N. Central Ave., Wood Dale, IL 60191 USA

Appel sans frais : 1-888-268-6396 / tél. : (630) 350-2252

télécopieur : (630) 350-0232 /

Site Web: <http://www.tempco.com>

CCI Thermal Technologies Inc.

5918 Roper Rd., Edmonton, AB T6B 3E1 Canada

Tél. : (708) 466-3178 / télécopieur : (780) 468-5904

Site Web: <http://www.ccithermal.com>

Wattco Electric Canada Ltd.

55, avenue Milton, Lachine (QC) H8R 1K6 Canada

Appel sans frais : 1-800-492-8826 / tél. : (514) 488-9124

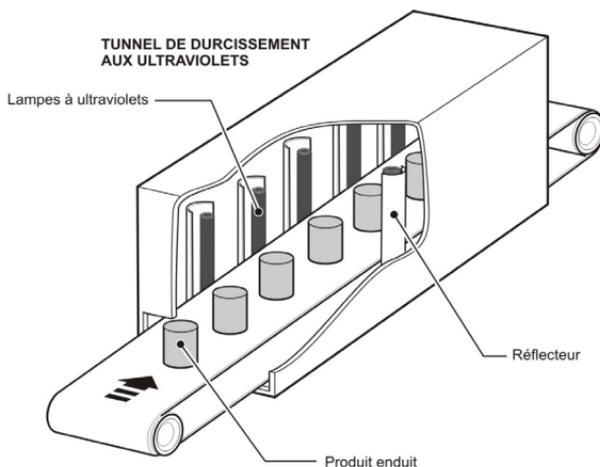
Site Web: <http://www.wattco.com>

Avis : cette liste de fournisseurs ne constitue pas un répertoire complet ou exhaustif. La mention de tout produit, procédé, service ou vendeur dans cette publication ne l'est qu'à des fins purement documentaires et ne doit pas être considérée comme une recommandation de la part des auteurs ou des éditeurs.

11 TRAITEMENT AUX RAYONS ULTRAVIOLETS

a. Principe

Le durcissement par rayonnement ultraviolet constitue une variante du durcissement thermique classique des revêtements, encres et adhésifs. Les formulations classiques à base de solvants ou d'eau doivent d'abord être séchées (pour évaporer le solvant ou l'eau), puis durcies à la chaleur ou par une longue exposition à l'air en vue de transformer la base organique tendre en un polymère dur. Les formulations durcissables aux ultraviolets contiennent peu ou pas de solvant. La base organique contient un composant photosensible ("photo-initiateur") qui déclenche une réaction de durcissement quasi-instantanée sous l'action des rayons ultraviolets.



11 Traitement aux rayons ultraviolets

Ainsi, le durcissement aux ultraviolets donne naissance en une ou deux secondes à une surface sèche de finition, alors que le durcissement classique demande des minutes, voire des heures. On peut de ce fait obtenir des revêtements et des encres de très haute qualité avec des cadences de production élevées et des équipements d'encombrement minimal.

On peut également utiliser les rayons ultraviolets pour la désinfection des fluides clairs ou transparents (eau, air, etc.) aux fins de réemploi ou de recyclage.

b. Types de systèmes

- Systèmes de durcissement des enduits et revêtements.
- Systèmes de désinfection des liquides et de l'air.

c. Applications

- Durcissement des revêtements, encres et adhésifs sur le métal, le bois, le plastique, les tissus, les bandes magnétiques et les produits électroniques.
- Enimage des fibres textiles.
- Fabrication des disques compacts.
- Désinfection de l'eau, des eaux usées, de l'air et autres fluides.

d. Avantages

- Durcissement rapide.
- Diminue ou élimine les solvants.
- Fours de durcissement thermique non nécessaires.

- Permet de revêtir les substrats sensibles à la chaleur (plastiques et bois).
- Diminution de la quantité des matériaux de revêtement.
- Réduction des surfaces nécessaires aux équipements et à l'entreposage.
- Amélioration de la qualité des revêtements et enduits.
- Contribue au respect de la réglementation relative aux composés organiques volatils (COV).

e. Limites

- Coût plus élevé des matériaux de revêtement pour rayons ultraviolets.
- Certains matériaux pour rayons ultraviolets nécessitent des précautions spéciales (toxicité).
- Protection accrue des travailleurs nécessaire (ultraviolets de haute énergie).
- Limite de visibilité.

f. Rendement type

- Les sources à mercure à basse pression ont une faible puissance unitaire (≈ 100 W/tube) et une longue durée de vie utile (10 000 h).
- Les sources à mercure à haute pression ont une puissance unitaire très élevée, pouvant atteindre 10 kW, mais une durée de vie utile limitée (2000 h).
- L'intensité du rayonnement produit diminue avec l'âge des lampes et l'encrassement du système.
- Le rendement électricité/rayonnement est de l'ordre de 15 à 25 %, mais l'énergie totale consommée est de

11 Traitement aux rayons ultraviolets

10 à 100 fois moindre que celle employée dans les méthodes de durcissement thermique concurrentes.

g. Considérations de mise en œuvre

Polymérisation

- Nécessité de choisir un nouveau type de revêtement.
- Épaisseur de la couche.
- Puissance du système et durée d'exposition.
- Type de lampes.
- Four tunnel.
- Protection du personnel.

Désinfection

- Densité des organismes à éliminer.
- Dose de rayons ultraviolets (intensité et durée).
- Type de lampes.
- Échéancier rigoureux à respecter pour le nettoyage et le remplacement afin de conserver l'efficacité antimicrobienne.
- Densité du liquide à stériliser.
- Type de débit.

h. Composants et terminologie

Plusieurs types de source

- Décharge électrique dans la vapeur de mercure (entre 2 électrodes ou induite par micro-ondes).
- À basse pression (\bullet 1 torr), jusqu'à 100 W/lampe.

- À haute pression (\bullet 760 torr), de 10 à 30 kW/lampe .

Sources spéciales

- Xénon pulse.
- Laser ultraviolet.

Traitement (purification) des liquides

Le réacteur se compose d'une chambre munie de tubes à ultraviolets autour desquels circule le liquide (parallèlement ou perpendiculairement aux tubes). Les tubes sont séparés du liquide par des gaines tubulaires en quartz ou en polymère non réactif. Le réacteur est équipé d'un système de nettoyage par ultrasons ou mécanique qui est associé à des produits chimiques de nettoyage.

Polymérisation

Des sources à rayonnement ultraviolet munies de réflecteurs sont installées sur la surface interne supérieure du tunnel de traitement; les pièces, qui ont été préalablement enduites d'un revêtement sensible aux ultraviolets, se déplacent sous les sources UV sur un convoyeur.

i. Exemple d'installation

INSTALLATION D'IMPRESSION EN SÉRIE		
Paramètres	Impression & séchage aux UV	Impression & séchage thermique
Durée du cycle	Séchage quasi-instantané; permet un traitement plus rapide & moins de "Fabrication en cours"	Les temps de séchage limitent les vitesses de traitement
Énergie requise pour le séchage - Électricité - Gaz naturel	82 kW aucune	56 kW 1,1 million BTU/h
Temps de préparation et de nettoyage de la presse (type)	1 h / jour	2,5 h / jour
Temps type de disponibilité du procédé Pour exploitation à 3 postes	80 % (l'exploitation à un seul poste est plus avantageuse)	70 %
Coût relatif encre/couche : - par volume d'encre - par volume de produit imprimé	2x à 3x 0,7x à 1,3x	1 x 1 x
Coût relatif d'investissement : - petits systèmes - grands systèmes	1 x 0,5x	1 x 1 x
Encombrement dans l'usine	0,1 x	1 x
Environnement de l'entreprise	Froid et sans solvants; possibilité d'exposition aux ultraviolets	Chaud, avec possibilité d'exposition aux solvants
Coût d'entretien	Coûts de nettoyage plus faibles & pas de temps de refroidissement nécessaire	Longs cycles de nettoyage, avec longues durées de refroidissement et de réchauffage
Pertes de produit (rebut)	Faibles	Importantes
Déchets & émissions dans l'environnement	Faibles	Importants

D'après la référence 23

Un imprimeur emploie le séchage aux UV dans une usine d'impression en série pour produire des étiquettes, coupons et autres vignettes. Des encres et un vernis de surimpression séchés aux UV assurent une qualité et une stabilité élevées des couleurs et confèrent aux produits un fini durable et attrayant. Les changements de qualité d'impression dus à l'évaporation du solvant dans les plateaux d'encre sont éliminés. La vitesse de l'impression est 67 % plus élevée pour les lignes à séchage par UV. Les durées de démarrage et d'arrêt/nettoyage sont considérablement réduites avec les encres séchées aux UV. Les rejets et les pertes de produit lors du démarrage sont également réduits de façon marquée. [Référence 24].

j. Sources pratiques d'information

The International Ultraviolet Association Inc. (IUVA)

C.P. 1110, Ayr (ON) N0B 1E0 Canada

Tél. : 519-632-8190 / télécopieur : 519-632-9827

Site Web: <http://www.iuva.org>

- *L'IUVA est une association relativement nouvelle constituée en personne morale en tant qu'association à but non lucratif en avril 1999, et qui se spécialise dans tous les domaines professionnels, s'intéressant notamment à la technologie des ultraviolets.*
- *Le site IUVA comporte des informations à propos des fabricants et distributeurs d'équipements, des annonces et événements de l'industrie, et d'autres informations d'ordre général sur une vaste gamme d'applications UV.*

k. Fournisseurs d'équipements et de services

Le site de l'International Ultraviolet Association (IUVA) comprend un “*guide de l'acheteur*” qui contient des hyperliens avec les fabricants et les distributeurs d'équipements et de composants UV. Consultez le “*guide de l'acheteur*” à la page d'accueil de l'IUVA sur www.iuva.org à l'article “*UV information*” du menu.

Avis : cette liste de fournisseurs ne constitue pas un répertoire complet ou exhaustif. La mention de tout produit, procédé, service ou vendeur dans cette publication ne l'est qu'à des fins purement documentaires et ne doit pas être considérée comme une recommandation de la part des auteurs ou des éditeurs.

12 AUTRES ÉLECTROTECHNOLOGIES

Les autres électrotechnologies, moins courantes, comprennent les méthodes mettant en œuvre l'arc électrique, le laser, le plasma et les membranes. Ces technologies ciblent des applications particulières, tendent à être coûteuses et sont surtout employées dans les industries importantes ou très spécialisées.

a. Arc électrique

Le chauffage par arc électrique est un type particulier de chauffage plasma. Un arc électrique est créé lorsqu'un courant traverse un gaz ionisé entre deux électrodes. De tels arcs sont assez puissants et permettent d'atteindre des températures allant jusqu'à 4 000 °C. On utilise les arcs électriques dans les fours comme sources de chaleur rayonnante ou comme arcs submergés. Ils interviennent également dans les fours ouverts de chauffage et de fusion pour la production d'acier et de fonte. On rencontre par ailleurs des systèmes à arcs électriques dans les fours de réduction fermés, les arcs étant immergés dans les matériaux à réduire pour des applications telles que la production de certains produits chimiques (p. ex., le carbure de calcium et le phosphore) et pour la production de ferroalliages comme le ferrosilicium, le ferromanganèse et la fonte.

b. Laser

Un laser est un dispositif qui émet un faisceau lumineux très intense et hautement directionnel. L'émission de lumière est provoquée soit par une décharge électrique dans un gaz avec

des spécifications de configuration spéciales, soit par éclats très intenses de lumière ultraviolette illuminant un cristal de composition et formes particulières. Le faisceau laser est du type continu ou pulsé; on peut le concentrer sur une très petite surface et atteindre ainsi des densités de puissance très élevées au point d'impact. Comme les faisceaux laser sont continus ou pulsés, leur intensité et leur puissance sont contrôlables, et ils peuvent donc être utilisés dans des applications aussi diverses que le micro-usinage, le perçage, le fraisage, la découpe des métaux, céramiques et matières plastiques, etc., ainsi que pour l'ablation de tissus en chirurgie, la gravure à l'eau-forte et la gravure, et pour un grand nombre d'autres applications.

c. Plasma

Comme on le sait, la matière apparaît normalement sous trois états différents : solide, liquide et gazeux. Il existe toutefois un quatrième état que l'on nomme "plasma" : c'est un milieu gazeux qui a été ionisé (c.-à-d. composé d'ions à charge électrique positive et d'électrons libres, mais qui reste électriquement neutre) et qui est devenu conducteur d'électricité. Pour obtenir un plasma, on fait appel à divers types de décharges électriques : arc électrique sous pression atmosphérique ou à des pressions plus élevées, décharge luminescente à basse température, décharge inductive à haute fréquence, ou par micro-ondes d'intensité suffisamment élevée. Les générateurs de plasma atteignent un degré d'ionisation allant jusqu'à 50 % et, de ce fait, conviennent à de nombreuses applications qui exigent des températures extrêmes (de l'ordre de 10 000 °C), comme par exemple les torches à plasma pour le placage, le revêtement, le soudage et le découpage.

d. Membranes

Les technologies des membranes se divisent en deux groupes fondamentaux de procédés : à gradient de pression et à action électrique. Le principal avantage des ces techniques est leur consommation d'électricité : elle est bien plus faible que celle des techniques classiques de séparation ou de purification.

Dans les procédés membranaires à gradient de pression, on se sert d'une pression hydraulique pour forcer les molécules à traverser les membranes. Les impuretés sont retenues et concentrées dans l'eau d'alimentation qui se transforme en eau de rejet ou débit concentrat. Les procédés membranaires comprennent (par ordre d'efficacité) : la microfiltration, l'ultrafiltration, la nanofiltration et l'osmose inverse. Les normes de catégorisation des membranes varient considérablement d'un fournisseur à l'autre. Par exemple, ce que l'un vend comme produit d'ultrafiltration sera appelé système de nanofiltration par un autre fournisseur. Pour comparer deux procédés membranaires, il est donc préférable de tenir compte directement de la taille des pores et des valeurs de seuil de rétention des molécules (MWCO).

- On définit la microfiltration (MF) comme un procédé de séparation membranaire dans lequel les membranes ont une taille de pores de 0,03 à 10 microns environ, un MWCO supérieur à 100 000 daltons², et une pression d'eau d'alimentation relativement faible de l'ordre de 100 à 400 kPa (15 à 60 psi). Les matières

² Le dalton est l'unité de mesure du poids ou de la masse moléculaire. Un atome d'hydrogène a une masse de 1 Da. Les poids moléculaires des protéines et autres macromolécules sont généralement mesurés en kDa ou kD (kilodaltons) - 1000 Da.

normalement éliminées par MF incluent le sable, le limon, les argiles, les kystes *Giardia lamblia* et *Cryptosporidium*, les algues et certaines espèces de bactéries. La microfiltration ne constitue pas une barrière absolue contre les virus; toutefois, lorsqu'on la combine avec la désinfection, elle semble maîtriser ce genre de microorganismes contenus dans l'eau. La MF peut réduire de façon notable l'apport chimique, comme par exemple la chloration. Lorsqu'elle est associée à des prétraitements de l'eau d'alimentation (par ex. coagulants et charbon actif en poudre), elle est efficace pour l'élimination des matières organiques naturelles ou synthétiques en vue de la réduction de l'encrassement. On utilise également la MF comme prétraitement des procédés d'osmose inverse ou de nanofiltration pour la réduction l'encrassement. Les applications de la microfiltration incluent notamment l'élimination bactérienne et des particules des eaux de traitement, la stérilisation à froid de la bière et du vin, la clarification des boissons (par ex. vin et jus foncés), la préfiltration du petit-lait de fromages avant concentration par ultrafiltration, etc.

- L'ultrafiltration (UF) met en jeu la séparation, par gradient de pression, des matières contenues dans l'eau en utilisant une membrane présentant des pores d'environ 0,002 à 0,1 microns, un MWCO de l'ordre de 10 000 à 100 000 daltons, et une pression d'eau d'alimentation relativement faible, de l'ordre de 200 à 700 kPa (30 à 100 psi). L'ultrafiltration déloge toutes les espèces microbiologiques éliminées par la microfiltration (élimination partielle des bactéries), ainsi que certains virus (sans former toutefois une barrière

absolue contre les virus) et les matières humiques. Les principaux avantages des procédés membranaires UF à faible pression par rapport aux classiques procédés de clarification et de désinfection (postchloration) sont les suivants : aucun produit chimique nécessaire (coagulants, floculants, désinfectants) ni aucun ajustement du pH); filtration d'exclusion par opposition à la filtration en profondeur sur média; eau traitée de qualité constamment satisfaisante en termes d'élimination des particules et des microbes; compacité du procédé et faible encombrement de l'installation; et automatisation simple. Les applications de l'ultrafiltration comprennent : traitement de l'eau potable, concentration des liqueurs employées dans l'industrie des pâtes et papiers, récupération de l'huile, de la peinture et des produits chimiques des débits concentrés, concentration des jus, produits laitiers, produits dérivés d'œuf, sucre, enzymes, hormones, sang, séparation de l'eau et de l'huile, etc.

- Les membranes de nanofiltration (NF) ont une taille de pores nominale d'environ 0,001 microns et un MWCO de 1 000 à 100 000 daltons. Faire passer l'eau à travers les très petits pores de ces membranes exige une pression de service plus élevée et davantage d'énergie de pompage que la microfiltration ou l'ultrafiltration. Les pressions de service sont en général de l'ordre de 600 kPa (90 psi) et atteignent même jusqu'à 1 000 kPa (150 psi). Ces procédés ont la possibilité d'éliminer pratiquement tous les kystes, bactéries, virus, et matières humiques. Les applications de la NF incluent l'adoucissement de l'eau, le dessalement des

colorants, la récupération des acides et produits corrosifs et la suppression de la couleur.

- L'osmose inverse (que l'on nomme également hyperfiltration) nécessite elle aussi une énergie de pompage notable pour appliquer à une solution aqueuse une pression élevée comprise entre 1 400 et 10 000 kPa (200 à 1500 psi) entraînant le passage de l'eau à travers une membrane semi-perméable en sens inverse, du côté solution vers le côté eau pure. Dans ce procédé, il y a simultanément production d'eau pure et de solution concentrée. Compacts, d'un fonctionnement facile et exigeant une main-d'œuvre minimale, les systèmes à osmose inverse sont bien adaptés aux petites installations. Ils sont par ailleurs appropriés aux systèmes qui présentent un degré élevé de fluctuation saisonnière au niveau de la demande en eau. L'osmose inverse parvient à éliminer avec efficacité presque tous les contaminants inorganiques dans l'eau, de même que le radium, les substances organiques naturelles, pesticides, kystes, bactéries et virus. Les applications de l'osmose inverse incluent l'élimination jusqu'à 90 % de la DBO (demande biochimique en oxygène) des eaux usées industrielles ou égouts municipaux, la concentration de jus, de lait et de café, la purification de l'eau, le dessalement de l'eau, etc.

Les procédés membranaires à action électrique font appel à un courant électrique pour véhiculer les ions à travers la membrane, ne laisser subsister que de l'eau purifiée. Les ions sont alors recueillis dans le débit concentrat pour élimination. L'eau ainsi produite est l'eau d'alimentation purifiée. Les

technologies de ces procédés comprennent l'électrodialyse et l'électrodialyse inversée.

- Dans l'électrodialyse (ED), un champ électrique sert de force motrice pour contraindre les ions électriquement chargés d'une solution à traverser une membrane capable de trier les ions. Une série alternée de membranes anioniques (qui ne laissent passer que les ions chargés négativement) et de membranes cationiques (qui ne laissent passer que les ions chargés positivement) déterminent les divers compartiments d'un bain électrolytique autorisant la concentration d'un liquide ou l'élimination partielle de la matière dissoute. Les applications de l'électrodialyse incluent notamment la déminéralisation de l'eau, l'élimination des sels dans la production du sucre, la désacidification des jus de fruit, la déminéralisation du petit-lait, la récupération des métaux dans les bains de dépôt galvanoplastique, l'élimination des métaux de l'éthylène glycol, etc.
- L'électrodialyse inversée (EDR) est une amélioration apportée aux procédés originaux d'électrodialyse. Dans l'électrodialyse inversée, l'énergie motrice à courant continu est périodiquement inversée afin de prévenir la formation de tartre et l'encrassement de la surface de la membrane. Cette innovation améliore à la fois l'efficacité des membranes et leur durée de vie utile. Pendant la courte durée d'inversion du champ, la sortie des cellules EDR est rejetée à l'égout.

13 BIBLIOGRAPHIE

1. Rajagopalan, V., “Principes et applications des électrotechnologies”, éditions Chenelière, publié par le CCE, 1993.
2. “Le séchage électrique dans l’industrie”, préparé par le groupe de travail sur la récupération de la chaleur, Union internationale d’électrothermie (UIE), 1988.
3. Langhame, Yves, Séguin, Noël, “Panorama des électrotechnologies industrielles”, publié conjointement par le CCE et Hydro Québec-IREQ, 1987.
4. “Electrotechnologies and Industry”, brochure publiée conjointement par Hydro-Québec et l’ACÉ, 1985.
5. Schmidt, P.S., “Electricity and Industrial Productivity – A Technical and Economic Perspective”, rapport EPRI EM-3640, Pergamon Press 1984.
6. Orfeuill, M., “Électrothermie industrielle – Fours et équipements thermiques électriques industriels”, ouvrage de référence, Dunod, 1981.
7. Série sur les pompes à chaleur – “État actuel de la technique”, rapport ACÉ 327 U 435A, 1989.
8. Série sur les pompes à chaleur – “Industrie des pâtes et papiers”, rapport ACÉ 327 U 435B, 1989.

13 Bibliographie

9. Série sur les pompes à chaleur – “Industries du raffinage du pétrole, pétrochimiques et chimiques Industries”, rapport ACÉ 327 U 435C, 1989.
10. Série sur les pompes à chaleur – “Industries de l'alimentation et des boissons”, rapport ACÉ 327 U 435D, 1989.
11. “Industrial Heat Pumps”, TechCommentary Brochure Vol. 1 No. 4, publié par l'EPRI Process Industry Coordination Office, 1988.
12. Dilda, P., Sanio, M.R., “Infrared Heating Applications in Industry”, rapport d'Ontario Hydro TSDD-89-001, 1989.
13. Wilson, T.L., “Radio-Frequency Dielectric Heating in Industry”, rapport de l'EPRI EM-4949, 1987.
14. Oda, S.J., Chen, R. Barber, B.T., “Équipement micro-ondes, radiofréquence et infrarouge – Utilisations actuelles et éventuelles dans l'industrie”, rapport ACÉ 411 U 481, 1986.
15. “Vulcanisation des polymères par micro-ondes et hautes fréquences”, Rapport ACÉ 634 U 577, 1987.
16. “Industrial Microwave Heating Applications”, TechCommentary Brochure Vol. 4 No. 3, publié par le Center for Materials Fabrication, révisé en 1993.

17. Lalwaney, N.S., "Resistance Heating of Metals: State-of-the-Art Assessment", rapport EPRI EM-4130, 1985.
18. O'Brien, D.A., Tanagho, N.F., "A Continuous Electric Kiln for Rapid Sintering", rapport EPRI EM-5436, 1987.
19. "Direct and Encased Resistance Heating", TechCommentary Brochure Vol. 3 No. 8, publié par le Center for Materials Fabrication, 1986.
20. "Direct Resistance Heating Blanks for Forging", TechApplication Brochure Vol. 1 No. 19, publié par le Center for Metals Fabrication, 1987.
21. "Waste Reduction Through Applied Technology: - Indirect Resistance", brochure publiée par la Tennessee Valley Authority, AT04.
22. Smith, D.K., "Application de la technologie des UV au traitement de stérilisation de l'eau", rapport ACÉ 647 U 588, 1988.
23. Stowe, R.W., "Some Economic Factors of UV Curing," paper presented at the RadTech '94 North American conference by Fusion UV Systems, Inc., 1994.
24. "Waste Reduction Through Applied Technology: - Ultraviolet (UV)", brochure publiée par la Tennessee Valley Authority, AT13.

13 Bibliographie

25. "Membrane Filtration", Tech Brief Brochure publiée par by National Drinking Water Clearinghouse, 1999.

14 GLOSSAIRE DES TERMES EMPLOYÉS

Arc électrique

Le chauffage par arc électrique est un type particulier de chauffage par plasma. Il y a création d'un arc électrique lorsqu'un courant traverse un gaz ionisé entre deux électrodes. Ces types d'arcs sont assez puissants et permettent d'atteindre des températures allant jusqu'à 4 000 °C. Les arcs électriques sont utilisés dans les fours comme sources de chaleur rayonnante ou comme arcs submergés.

Chauffage diélectrique

Désigne une famille de procédés de chauffage employés pour le chauffage de produits "diélectriques" (c.-à-d. non métalliques). Le matériau est chauffé dans sa masse par le déplacement interne de charges électriques sous l'action du champ électrique engendré soit par une source de radiofréquence (RF) soit par une source de micro-ondes (MW).

Chauffage ohmique

Lorsqu'un produit alimentaire, d'ordinaire contenu dans un tube non métallique, est directement chauffé par le passage d'un courant électrique qui le traverse, le procédé est en général désigné sous le nom de "chauffage ohmique". Cette forme de chauffage est également nommée "chauffage par conduction" ou "chauffage direct par résistance".

Chauffage par conduction ou direct par résistance

Dans le chauffage par conduction, le matériau est chauffé directement par un courant électrique qui le traverse. Le

chauffage par conduction est idéal pour les matériaux métalliques ou non métalliques qui conduisent l'électricité. Parmi les applications, on peut citer le traitement thermique des métaux, le traitement des métaux avant façonnage, et la fusion du verre. Également connu sous le nom de "chauffage par résistance" ou "chauffage ohmique".

Électro-membranes – voir "Membranes"

Électrotechnologies

Les électrotechnologies sont des technologies électriques utilisées dans des procédés industriels tels que le chauffage, le séchage, le traitement thermique et la fusion des métaux afin d'obtenir des améliorations notables en matière d'utilisation énergétique.

Haute fréquence (HF)

Appelé également chauffage par radiofréquence (RF). Utilise le même mécanisme de chauffage que le chauffage par micro-ondes (MW), si ce n'est que le matériau à chauffer est disposé entre deux électrodes, le champ électrique oscillant entre elles provoquant alors l'échauffement. La gamme de fréquences employées va de 10 à 300 MHz. Le chauffage par micro-ondes (MW) et le chauffage par haute fréquence (HF) sont parfois désignés collectivement par le terme chauffage diélectrique.

Indirect par résistance

Le chauffage indirect par résistance consiste à faire passer un courant électrique dans un conducteur, l'échauffement étant proportionnel à la résistance du conducteur (effet Joule). La chaleur qui se dégage est confinée dans une enceinte isolée telle qu'un récipient ou un four. On peut utiliser cette chaleur par

contact direct avec le matériau à chauffer ou au moyen d'un matériau intermédiaire.

Induction

Le chauffage par induction consiste à appliquer à un objet conducteur d'électricité le champ électromagnétique d'une bobine d'induction. L'application à la bobine d'un courant alternatif induit un courant dans l'objet et provoque l'échauffement de celui-ci en raison de sa résistance interne (effet Joule).

Infrarouge (IR)

Le chauffage par rayonnement infrarouge fait appel au rayonnement émis par des résistances électriques, généralement en nickel-chrome ou en tungstène, portées à des températures relativement élevées. Le spectre infrarouge est en principe divisé en trois bandes : proche infrarouge, infrarouge moyen, et infrarouge lointain.

Laser

Un laser est un appareil qui émet un faisceau lumineux très intense. Le faisceau peut être concentré sur une surface très petite et atteindre ainsi des densités de puissance très élevées. Cette technologie est employée pour le micro-usinage, le perçage, le fraisage et la découpe dans les industries micromécaniques et électroniques.

Membranes

Ces technologies de séparation se divisent en deux sous-catégories : à gradient de pression et à action électrique. Les procédés membranaires à gradient de pression comprennent la microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF), la nanofiltration (NF) et l'osmose inverse (RO). Les procédés à action

électrique incluent l'électrodialyse (ED) et l'électrodialyse inversée (EDR). Les procédés membranaires permettent de séparer et concentrer diverses fractions d'un liquide chargé de produits en suspension ou de produits dilués. Ces techniques offrent l'avantage notable d'une consommation d'électricité très inférieure par rapport aux techniques classiques de séparation ou de purification.

Micro-ondes (MW)

Dans le chauffage par micro-ondes, un corps non conducteur est soumis à un champ électrique à ultra-haute fréquence (UHF). Le matériau est chauffé dans sa masse par des déplacements de charges électriques à l'intérieur du matériau sous l'action du champ électrique appliqué (même dans le cas où le matériau est mauvais conducteur de la chaleur). La fréquence employée est de 915 ou 2450 MHz. Un système de chauffage par micro-ondes comprend un générateur d'ondes à ultra-haute fréquence, un guide d'ondes, une tuyère ou un cornet et des dispositifs de commande et de manutention.

Moteurs et entraînements à vitesse variable

Ces appareils convertissent l'énergie électrique en un mouvement mécanique comme la rotation. Une innovation récente qui leur a été apportée est leur possibilité de vitesse variable, laquelle n'est limitée ni par la tension d'alimentation assignée, ni par la conception technique, de sorte que les moteurs peuvent ainsi fonctionner à différentes vitesses sur commande de l'opérateur.

Piles à combustibles et batteries de nouvelle génération

Les piles à combustibles et les batteries de nouvelle génération sont des dispositifs de stockage d'énergie. La pile à combustible met en œuvre un procédé de réaction chimique (plutôt

qu'une réaction de combustion) entre l'oxygène et l'hydrogène fourni, pour constituer ainsi une source d'électricité; les batteries de nouvelle génération utilisent diverses combinaisons de produits chimiques qui permettent d'emmagasiner, de façon autonome, de l'énergie électrique qui servira plus tard à fournir du courant.

Plasma

Comme on sait, la matière apparaît normalement sous trois états différents : solide, liquide et gazeux. Il existe toutefois un quatrième état que l'on nomme "plasma" : c'est un milieu gazeux qui a été ionisé et est devenu conducteur d'électricité. Les générateurs de plasma peuvent chauffer les gaz à des températures pouvant atteindre 10 000 °C.

Pompes à chaleur (PAC)

Les gaz voient leur température s'élever lorsqu'ils sont comprimés et s'abaisser lors de leur détente. Il est donc possible de produire de la chaleur à l'aide d'un circuit fermé contenant du gaz et qui comprend deux échangeurs de chaleur, un compresseur et un détendeur. C'est là le principe de la pompe à chaleur. L'énergie peut ainsi être transférée d'une source à basse température, telle que l'air ambiant, un gaz ou un liquide, vers une application à température plus élevée.

Radiofréquence (RF)

Également appelé chauffage à haute fréquence (HF). Utilise le même mécanisme de chauffage que le chauffage micro-ondes (MW) si ce n'est que le matériau à chauffer est disposé entre deux électrodes, le champ électrique oscillant entre celles-ci provoquant alors l'échauffement. La gamme de fréquences employées va de 10 à 300 MHz. Le chauffage par micro-ondes

(MW) et le chauffage par haute fréquence (HF) sont parfois désignés collectivement par le terme chauffage diélectrique.

Recompression mécanique de la vapeur (RMV)

Des vapeurs obtenues par évaporation sont mécaniquement comprimées et dirigées vers un condenseur dans lequel elles atteignent des niveaux de température et de pression plus élevés. Le condenseur sert de source de chaleur pour contribuer à l'évaporation des vapeurs. Dans ce procédé, les vapeurs elles-mêmes servent de fluide caloporteur, il n'existe qu'un seul échangeur de chaleur et le facteur d'efficacité est très élevé.

Ultraviolet (UV)

Contrairement aux autres procédés électriques, le rayonnement ultraviolet n'agit pas par effet thermique sur un matériau, mais plutôt par effet photochimique. À l'heure actuelle, ses applications industrielles comprennent le durcissement et le séchage des encres, vernis et caoutchouc, la synthèse chimique, et la stérilisation des produits alimentaires, des produits pharmaceutiques, de l'eau et de l'air.

15 INDEX

- adhésifs, 36, 56, 57,
93, 94
- aliments, 17, 69, 78, 82
- aluminium, 45, 90, 91
- applicateur, 49, 61, 71
- Applicateur, 72
- arc électrique, 101,
102, 113
- bains d'acide, 25
- bains galvaniques
dilués, 25
- bandes de papier, 14
- biscuits, 35
- bois, 14, 24, 36, 56,
57, 63, 69, 94, 95
- caoutchouc, 28, 69, 73,
118
- Cavité résonante, 72
- centrifuge, 27
- céréales, 24, 57
- chaleur perdue, 26
- chaleur résiduaire, 21
- chauffage, 9, 10, 13,
14, 15, 17, 22, 30,
33, 35, 37, 38, 39,
43, 44, 45, 46, 50,
51, 53, 55, 56, 57,
58, 59, 60, 61, 63,
67, 68, 69, 70, 71,
72, 73, 77, 79, 80,
81, 82, 85, 86, 88,
90, 91, 101, 113,
114, 115, 116, 117
- chauffage direct par
résistance, 77, 113
- Chauffage direct par
résistance, 11, 81
- chauffage direct par
résistances, 48
- chauffage du matériau,
15
- chauffage indirect, 17,
44
- Chauffage indirect, 11,
46
- chauffage indirect par
résistance, 17, 85,
86, 114
- Chauffage indirect par
résistance, 11
- chauffage ohmique, 77,
78, 113, 114
- Chauffage par
hyperfréquences, 10
- chauffage par induction,
9, 14, 43
- Chauffage par
induction, 10

CHAUFFAGE PAR

INDUCTION, 43

chauffage par micro-ondes, 14, 59, 114, 116, 117

Chauffage par radiofréquence, 10

chauffage par rayonnement, 14, 15

cintrage, 35

coefficients de performance, 24

collage, 45, 57, 61

combustion, 14, 15, 21, 43, 47, 79, 87, 117

Compresseurs, 27

concentration, 23, 24, 52, 104, 105, 106, 107

Concentration, 24, 25

condensat, 24

condensation, 21

condenseur, 22, 23, 27, 118

conduction, 21, 44, 56, 73, 77, 80, 85, 113

conductivité thermique, 15, 48, 55, 67

convection, 39, 44, 80, 85

convertisseurs de fréquence, 49

convoyeur, 45, 49, 56, 61, 89, 97

cosmétiques, 25

Coût d'investissement, 27, 38, 70

Coûts d'investissement, 26, 59, 79

cuir, 24

Cuisson, 35, 69, 78, 87

Cure, 78

cycle inverse de Brayton, 30

décapage, 35, 45

décongélation, 69

densité de puissance, 37, 38, 61, 68, 71, 80

déshumidification, 24, 26, 27

Déshumidification, 24

déshydratation, 35

Déshydratation, 24, 69

désodorisation, 29

diélectrique, 14, 55, 59, 114, 118

dissipateur, 21, 22

distillat, 25, 28

distillation, 13, 24, 25, 27, 28

- durcissement, 35, 38,
 57, 69, 87, 93, 94,
 96, 118
 échangeur de chaleur,
 21, 22, 23, 118
 échangeurs de chaleur,
 21, 31, 117
 Échangeurs de chaleur,
 27
 électrodialyse, 107, 116
 électrodialyse inversée,
 107, 116
 électromagnétique, 43,
 44, 62, 67, 70, 115
 éléments chauffants, 85,
 86, 88, 90
 élimination des déchets,
 25
 émaux, 35, 36, 87
 émetteur infrarouge, 33
 enduits, 94, 95
 Ensimage, 94
 épurateurs de gaz, 29
 évaporateur, 22, 27
 évaporateurs, 28
 évaporation, 21, 23,
 25, 27, 56, 68, 99,
 118
 fabrication industrielle,
 24
 fabrication
 thermomécanique, 29
 fentes, 68, 72
 fluide intermédiaire
 caloporteur, 22
 fluides caloporteurs, 22
 fonte, 45, 101
 forgeage, 45, 47, 52,
 81
 four à convection, 9, 43
Four à convection, 39
Four à infrarouges, 39
 Fours, 86, 94, 109
 Frittage, 69, 87
 fusion, 13, 44, 47, 78,
 79, 86, 87, 91, 101,
 114
 Fusion, 45, 46, 78, 91,
 111
 gâteaux secs, 35
 guide d'ondes, 67, 72,
 116
 haute fréquence, 10,
 44, 45, 55, 58, 60,
 61, 65, 67, 77, 102,
 114, 116, 117
 Heat pump (HP), 117
 Heating, ohmic, 82
 hermétiques, 27
 humidité, 57, 58, 63,
 78

- hyperfréquences, 14, 15, 59
- induction, 14, 43, 44, 45, 46, 48, 49, 50, 51, 52, 115
- Induction**, 50, 51, 52
- Induction heating, 115
- industries chimiques, 25
- infrarouge, 33, 34, 37, 39, 40, 110, 115
- infrarouge lointain, 33, 39, 115
- infrarouge moyen, 33, 37, 115
- infrarouges, 34, 59, 61
- jus de fruits, 25, 35
- klystron, 72
- laser, 101, 115
- liqueur noire, 25
- lumière ultraviolette, 102
- magnétron, 67, 72
- matériaux métalliques, 44, 114
- Mechanical vapour recompression (MVR), 118
- membrane, 104, 106, 107
- membranes, 101, 103, 105, 107, 114
- métal, 9
- métaux, 45, 50, 51, 52, 78, 86, 102, 107, 114
- microfiltration, 103, 104, 105, 115
- micro-ondes, 10, 17, 59, 67, 72, 73, 96, 102, 110, 113, 114, 116, 117
- Microwave, 74, 75
- nanofiltration, 103, 104, 105, 115
- nickel-chrome, 33, 34, 39, 90, 115
- Oscillateur RF, 61
- osmose inverse, 103, 104, 106, 115
- panneaux radiants, 39
- papier, 29, 36, 56, 57, 63, 69
- Pasteurisation, 35
- pâte kraft, 29
- pâtes à papier, 25
- pâtes et papiers, 25, 28, 105, 109
- peintures, 35, 46
- pertes de produits, 26
- petit-lait, 25, 104, 107
- pharmaceutiques, 25, 118

- plasma, 69, 101, 102, 113, 117
- plastiques, 35, 46, 50, 56, 57, 69, 95, 102
- Polymérisation, 35, 36, 69, 96, 97
- pompe à chaleur, 14, 21, 28, 29, 30, 117
- pompes à chaleur, 17, 21, 22, 24, 26, 28, 29, 30, 109, 110
- pompes à chaleur industrielles, 17, 21, 28, 29
- Pompes à chaleur industrielles, 10
- poteries, 36
- procédés**
 - membranaires**, 103, 105, 106, 115
- proche infrarouge, 33, 37, 38, 115
- produits alimentaires, 14, 35, 57, 69, 77, 87, 118
- Produits alimentaires, 35
- produits chimiques organiques, 25
- produits pétrochimiques, 25
- puissance calorifique, 26
- puits de chaleur, 27
- radiofréquence, 14, 59, 113, 114
- Radio-frequency (RF), 64, 110, 117
- raffinage, 29, 110
- rayonnement
 - infrarouge, 9, 10, 33, 34, 37, 115
- rayons ultraviolets, 11, 93, 94, 95, 96
- recompression
 - mécanique de la vapeur, 10, 17, 21, 24, 27
- recuit, 13, 35, 45, 52
- récupération d'énergie, 25, 27
- récupération de chaleur, 24, 30
- Récupération de chaleur, 29
- réfractaires, 46, 89
- réfrigérant, 22, 23, 28
- Resistance heating, 111
- résistances électriques, 33, 115
- revêtement, 13, 38, 95, 96, 97, 102

- revêtements, 35, 36, 37,
45, 57, 69, 93, 94,
95
- revêtements en poudre,
35
- séchage, 13, 14, 24,
26, 27, 38, 39, 45,
56, 57, 58, 60, 61,
68, 70, 86, 87, 98,
99, 109, 114, 118
- Séchage, 24, 35, 36,
39, 63, 69, 98
- séchoirs, 28, 43
- semi-hermétiques, 27
- solvant, 23, 93, 99
- soudage, 35, 51, 57,
78, 83, 102
- stérilisation, 35, 57, 78,
104, 111, 118
- stockage thermique, 28
- sucré, 25, 105, 107
- Système de classification
des industries de
l'Amérique du Nord,
17, 18
- systèmes de
réfrigération, 30
- systèmes fermés, 22
- systèmes ouverts, 23, 62
- systèmes RMV, 21, 24
- Thermofixage, 36
- thermoformage, 35
- Thermorétraction, 37
- Thermoscellage, 36
- tissus, 24, 57, 94, 102
- traitement continu, 38
- traitement de surface,
17, 34
- traitement thermique,
40, 52, 57, 78, 114
- Tubes de quartz, 34
- tubes en quartz, 38
- tubes radiants, 39
- ultrafiltration, 103, 104,
105, 115
- ultraviolet, 93, 97, 118
- Ultraviolet (UV)**, 118
- ultraviolets*, 93, 94, 95,
97, 98, 99
- vapeur d'eau, 23, 24,
27, 28
- vernis, 35, 87, 99, 118
- verre feuilleté, 36
- Vulcanisation, 36, 73,
110
- Wood, 92

Vos observations et commentaires seraient appréciés.

Veillez nous les transmettre à l'adresse :

info@ceati.com

L'efficacité énergétique améliore la compétitivité

- Prospérité économique
- Performance environnementale
- Responsabilité sociale
- Sécurité