

| | | |
|--|---|-------------------------|
|  BTS ELECTROTECHNIQUE | LYCEE FERNAND RENAUDEAU CHOLET | UF3-M3 |
| | ELECTROTHERMIE Conversion et électronique de puissance | |
| GE | | Génie électrique |

1. REFERENTIEL

1.3 Les différents types de récepteurs en électrothermie :

1.3.1 Les différents procédés de conversion de l'énergie électrique en électrothermie.



2. DONNEES DISPONIBLE POUR REALISER LES TACHES

Vos connaissances de STI2D ou Bac Pro

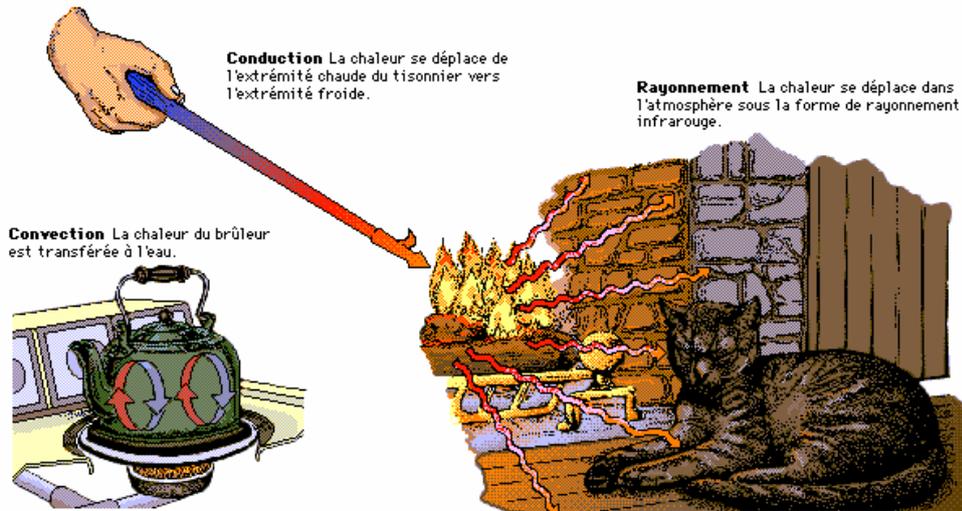
3. Conversion de l'énergie électrique en énergie thermique



La chaleur se propage spontanément du corps ayant la température la plus élevée vers celui ayant la température la plus basse, élevant donc généralement la température de ce dernier, tout en abaissant la température du premier. La chaleur ne se propage d'un corps froid vers un corps chaud qu'à condition de fournir un travail.

3.1. Transmission de la chaleur

Il existe trois modes de transfert de chaleur : la conduction, le rayonnement et la convection.



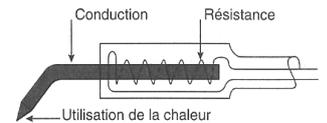
3.1.1. La conduction

C'est l'écoulement de la chaleur à travers un corps de la partie chaude vers la partie froide.

La conduction implique un contact physique entre les corps ou les parties des corps échangeant de la chaleur

Exemple: *La panne d'un fer à souder transmet la chaleur par conduction.*

La conduction s'effectue surtout dans les matériaux solides qui sont bons conducteurs de la chaleur (cuivre, aluminium). La propriété inverse est l'isolation thermique (Amiante, laine de verre).



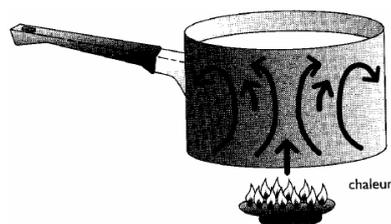
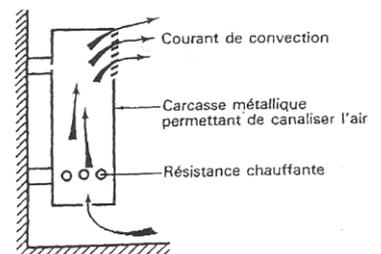
3.1.2. La convection

La convection se produit lorsqu'un liquide ou un gaz est en contact avec une source plus chaude; il se produit alors un mouvement d'ensemble des molécules du fluide transportant la chaleur vers les zones plus froides.

Lorsqu'un liquide ou un gaz chauffé se dilate, son volume augmente, sa masse diminue, il a tendance à s'élever, il est remplacé par le liquide ou le gaz plus froid, il s'établit un courant de convection.

Exemple: *Le radiateur de chauffage électrique appelé convecteur.*

La convection s'opère surtout dans les liquides et les gaz, elle peut être naturelle ou forcée; on utilise alors des ventilateurs ou des pompes.

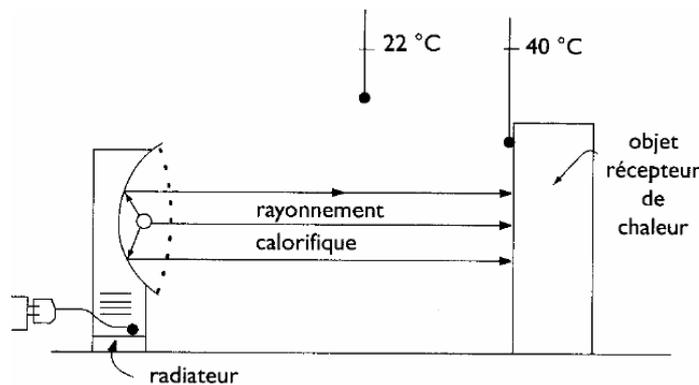


3.1.3. Le rayonnement

Le rayonnement ne nécessite ni contact ni présence d'aucune matière entre les deux corps. Lorsqu'une résistance électrique est portée à une température élevée de 700 à 1000°C

Elle émet de l'énergie par rayonnement. Cette énergie se transmet aussi bien dans le vide que dans l'air et se transforme en chaleur dans la masse des corps à chauffer.

Exemple: Le radiateur parabolique La transmission de la chaleur par rayonnement s'effectue surtout en chauffage infrarouge dans l'air ou dans le vide.



3.2. Les procédés de chauffage

L'électrothermie consiste à produire de la chaleur en utilisant l'énergie électrique (transformation de l'énergie électrique en énergie calorifique).

Divers procédés sont utilisés en domestique, tertiaire ou industriel pour chauffer les locaux, préparer les repas, assurer le confort ou dans des applications industrielles.

- Chauffage par résistance.
- Chauffage par rayonnement.
- Chauffage par induction.
- Chauffage par diélectrique.
- Chauffage par arc électrique.

3.2.1. Chauffage par résistance :

La transformation de l'énergie électrique en chaleur se fait par le passage du courant électrique dans une résistance. C'est une application de la loi de Joule : une résistance parcourue par un courant produit de la chaleur :

$$P = R \times I^2$$

L'énergie électrique dans une résistance est transformée en chaleur par la loi de Joule:

$$W = U \times I \times t \text{ ou } W = R \times I^2 \times t$$

W : énergie en Joules, U : tension en volts, I : L'intensité du courant en Ampères, t : temps secondes

La résistance a pour valeur:

$$R = \rho \frac{L}{s}$$

R : Résistance en Ohms, L : longueur du fil en mètres, ρ : Résistivité en ohms-mètres s : section du fil en m²

Les matériaux utilisés doivent avoir:

- Une résistivité plus élevée que les conducteurs;
- Un coefficient de température assez faible
- Une température de fusion élevée
- Une inoxydabilité à haute température.

Exemples de matériaux:

Superimphy --> Ni 80% Cr 20% Température limite d'emploi 1200 °C

Carbimphy --> Ni 45% Cr 25% Fe Température limite d'emploi 1150 °C

Puissance à installer: Elle doit permettre d'obtenir rapidement la température désirée lors de la mise en service, et de parer les déperditions de chaleur.

L'énergie calorifique dégagée par l'élément chauffant est:

$$1 \text{ calorie} = 4,19 \text{ joules et } 1 \text{ Wh} = 3600 \text{ joules} \quad 1 \text{ Wh} = \frac{3600}{4,19} = 859 \text{ calories}$$

3.2.2. Chauffage par rayonnement :

Le chauffage par infrarouge est un procédé de chauffage direct par rayonnement, les produits à chauffer sont soumis à l'énergie rayonnée par des corps de chauffe appelés émetteurs.

Emetteur infrarouge



Matière à chauffer

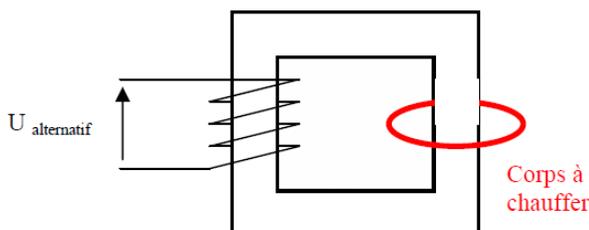


Les différents émetteurs se classent en fonction de leur longueur d'onde :

Infrarouge court (λ comprise entre 0,76 et 2 μm) : lampes, tubes à filament de tungstène portés à une température entre 1900 et 2000°C. Infrarouge moyen (λ comprise entre 2 et 4 μm) : lampes, tubes à filament de tungstène portés à une température entre 700 et 1100°C. Infrarouge long (λ comprise entre 4 et 10 μm) : plaques, éléments tubulaires portés à une température entre 200 et 500°C.

Les applications industrielles du chauffage par infrarouge sont nombreuses : cuisson des peintures, séchage d'émail, préchauffage des plastiques, séchage des panneaux de bois, vulcanisation, etc.... On les utilise aussi, dans l'élevage des poussins, le chauffage des grandes locaux ou en domestique pour la salle de bains (radiateur parabolique).

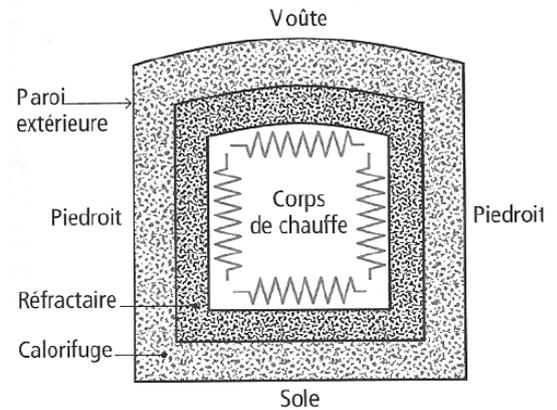
3.2.3. Chauffage par induction :



Un corps conducteur de l'électricité placé dans le champ magnétique d'un solénoïde ou inducteur aux bornes duquel on applique une tension alternative est le siège de courants électriques induits. Ceux-ci provoquent son échauffement par effet Joule.

Le chauffage par induction met en jeu trois phénomènes physiques successifs :

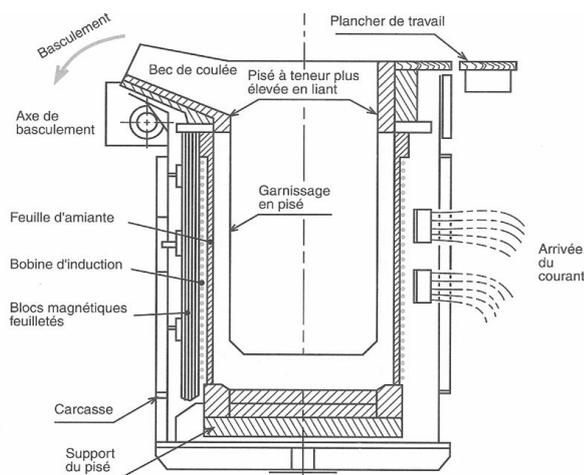
- Transfert de l'énergie depuis la bobine jusqu'au corps à chauffer.
- Transformation en chaleur, dans le secondaire, de l'énergie électrique qui y a été transférée : effet Joule.
- Transmission de cette chaleur par conduction dans la masse du corps à chauffer.



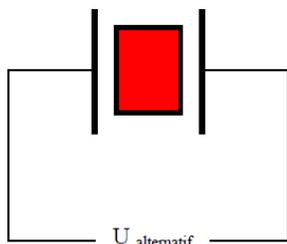
Les procédés de chauffage par induction se caractérisent par la fréquence utilisée :
 Fréquence industrielle (50 Hz) et moyenne fréquence (de 500 à 10 000 Hz)
 Hautes fréquences (de 100 kHz à 5 MHz).

Caractéristiques: absence de contact ou de liaison matérielle entre la source d'énergie et le corps à chauffer.

Les applications sont réservées à la fonte des métaux ou aux chaudières pour les installations industrielles et aux plaques à induction pour certaines plaques de cuisson en domestiques



3.2.4. Chauffage par diélectrique :

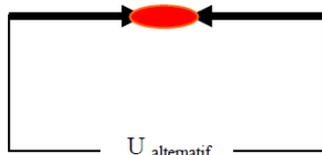


Une substance non conductrice de l'électricité, placée dans un champ électrique alternatif à hautes fréquence s'échauffe. Le dégagement de la chaleur a lieu dans la masse du corps à chauffer. Il peut être considéré comme uniforme dans toute cette masse si la substance est homogène.

Collage des meubles, séchage des bois, vulcanisation du caoutchouc, préchauffage des plastiques, pasteurisation sont des applications industrielles de ce procédé. En domestique le four à micro-ondes peut être rattaché à cette méthode.

3.2.5. Chauffage par arc électrique :

En écartant deux électrodes de charbon préalablement en contact et reliées et reliées aux bornes d'une source on produit l'amorçage d'un arc électrique. Cet arc lumineux et producteur de chaleur.



On l'utilise dans la fusion des métaux (fours à arc) et le soudage des métaux (soudage à l'arc).

3.2.6. Récapitulatif et utilisation de ces procédés :

| Modes de production de la chaleur | Exemples concrets Domestiques | Exemples concrets Industriels, agricoles,... |
|--|---|--|
| Chauffage par résistance : (*) | Radiateur ou convecteur. Fer à repasser. Chauffe-eau. | Four électrique industriel. Soudure par point (chauffage par résistance direct) |
| Chauffage par rayonnement infrarouge | Radiateur parabolique (salle de bains) | Séchage des peintures. Elevage des animaux. Chauffage de grands espaces |
| Chauffage par induction | Plaque de cuisson à induction. | Four à induction |
| Chauffage diélectrique | Four à micro-ondes. | Séchage. Collage Mise en forme des matières plastiques |
| Chauffage par arc : | | Fusion des métaux Soudage. |

(*) Dans le chauffage par résistance direct le corps à chauffer forme résistance alors que dans le chauffage par résistance indirect le corps à chauffer est placé près des résistances.

3.3. Modulation de l'énergie calorifique

3.3.1. Utilisation des GRADATEURS de puissance électroniques dans les fours à résistances

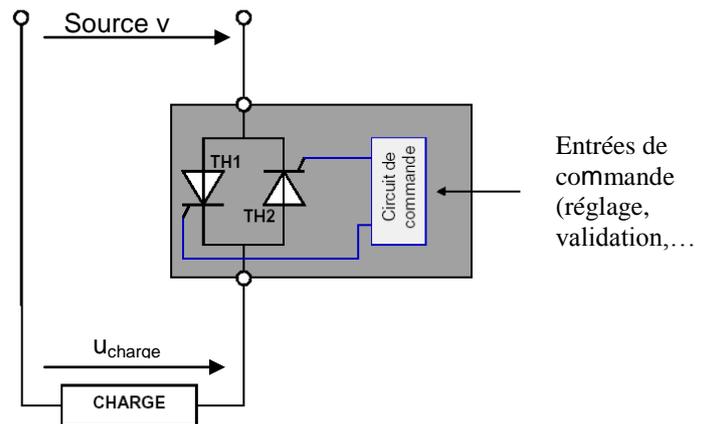
Les éléments chauffants d'un four électrique sont, si possibles, alimentés sous la tension du réseau. Mais il est souvent nécessaire d'employer une tension plus faible, notamment pour les fours de petite puissance. Pour se faire, un transformateur abaisseur de tension peut être utilisé. Cependant, l'usage de gradateurs électroniques de puissance à thyristors est le plus souvent utilisé, en particulier lorsque la tension délivrée aux résistances d'un four doit évoluer dans le temps (résistances en bisiliciure de molybdène et surtout en carbure de silicium). Ces gradateurs offrent un coût, une maintenance et un encombrement réduits par rapport aux solutions électromécaniques classiques.

La figure montre le montage d'un tel gradateur dans un circuit monophasé.

Un gradateur se comporte comme un interrupteur, il établit ou interrompt la liaison entre la source et la charge. La partie puissance est constituée de deux thyristors montés "tête-bêche" ou d'un triac (pour les très faibles puissances).

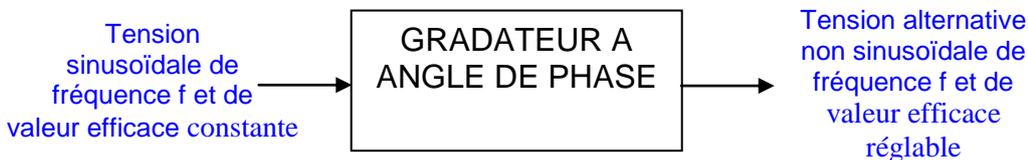
Cet étage de puissance est associé à une électronique de commande. Pour obtenir une variation de la tension, donc de l'intensité et de la puissance aux bornes du récepteur, on peut réaliser deux modes de fonctionnement:

- Gradateur à angle de phase.
- Gradateur à train d'ondes.

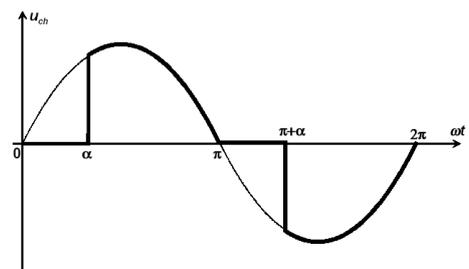


3.3.2. Gradateur à angle de phase

C'est un appareil qui, alimenté sous une tension sinusoïdale de valeur efficace constante, fournit à la charge une tension alternative non sinusoïdale de même fréquence que la tension d'alimentation, mais de valeur efficace réglable.



Le thyristor TH1 est amorcé durant l'alternance positive avec un angle de retard α .
Le thyristor TH2 est amorcé durant l'alternance négative avec le même angle de retard α par rapport à π ($T/2$).



Remarque :

La charge étant purement résistive, l'allure du courant débité par la source est identique à l'allure de la tension aux bornes de la charge.

Le courant débité par la source, ainsi que la tension aux bornes de la charge sont des grandeurs alternatives mais non sinusoïdales.

La mesure de leur valeur efficace devra s'effectuer à l'aide d'appareils de mesure "efficaces vrais" (RMS).

Calcul des valeurs efficaces à la charge :

$$U_{ch} = V \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}$$

Attention le calcul doit se faire en radians

$$I_{ch} = \frac{V}{R} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}$$

$$P = \frac{(U_{CH})^2}{R} = R I_{ch}^2 = \frac{V^2}{R} \times \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}\right) = P_{max} \times \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}\right)$$

avec V tension efficace fournie par la source

La puissance P varie de $\frac{V^2}{R}$ à 0 lorsque α varie de 0 à π .

Malgré une charge résistive, la puissance active (P) absorbée par la charge est différente de la puissance apparente (S) fournie par le réseau :

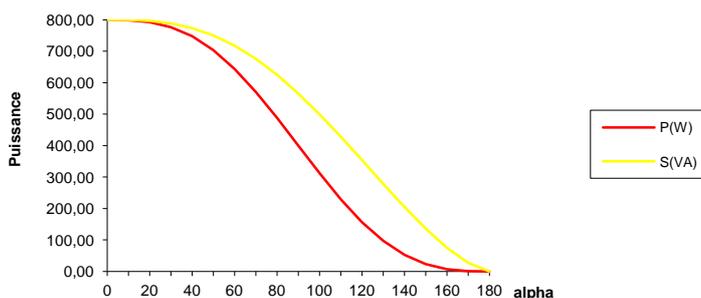
$$P = U_{ch} \times I_{ch} = \frac{(U_{CH})^2}{R} = \frac{V^2}{R} \times \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}\right)$$

et

$$S = V \times I_{ch} = \frac{V^2}{R} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}$$

Donc $P \neq S$

Exemple pour un four d'une puissance de 800 Watt



On peut en conclure que ce gradateur entraîne la consommation de puissance réactive Q.

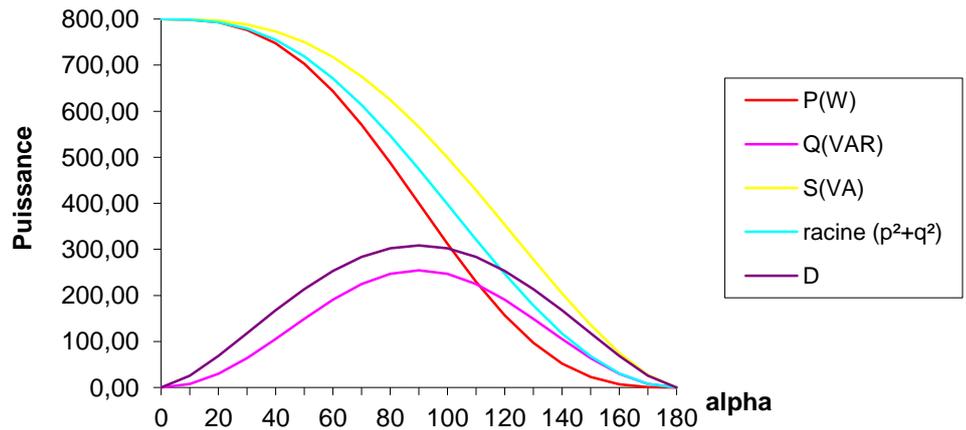
$$Q = \frac{V^2}{R} \times \left(\frac{1 - \cos(2\alpha)}{2\pi} \right)$$

De plus du fait que le courant n'est plus alternatif sinusoïdal, on constate que

$$S \neq \sqrt{P^2 + Q^2}$$

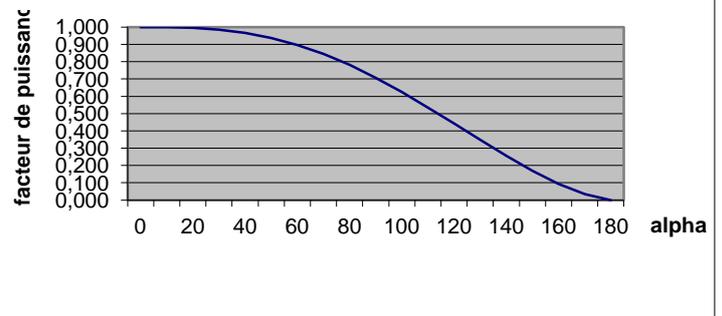
Il y a donc consommation d'une autre puissance appelée puissance déformante (notée D).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$



Le rapport P/S est toujours a charge (ici = 1)

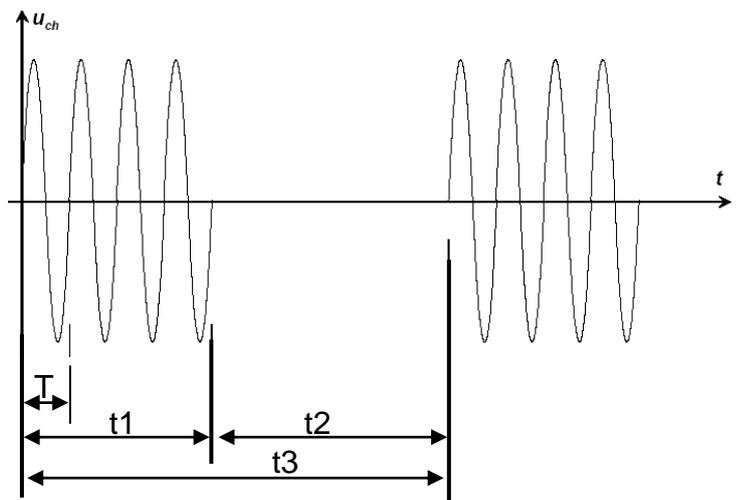
$$\text{Facteur de puissance} = \frac{P}{S} = \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}$$



3.3.3. -Gradateur à train d'ondes

Les deux thyristors TH1 et TH2 reçoivent des impulsions de gâchettes pendant un temps t1 multiple d'une période secteur (T). Ils se comportent comme un interrupteur fermé. Ils sont ensuite bloqués jusqu'à la fin du cycle du gradateur.

Le temps de cycle t3 du gradateur est généralement de quelques secondes à plusieurs minutes.



Remarque : La charge étant purement résistive, l'allure du courant débité par la source est identique à l'allure de la tension aux bornes de la charge.

T : période du réseau

t1 : période de conduction

t2 : période de non conduction

t3 : période du cycle de train d'ondes

On appelle α le rapport cyclique. $\alpha = \frac{t1}{t3}$

Calcul des valeurs efficaces à la charge :

$$U_{ch} = V \sqrt{\frac{t1}{t3}} = V \sqrt{\alpha}$$

$$I_{ch} = \frac{V}{R} \sqrt{\frac{t1}{t3}} = \frac{V}{R} \sqrt{\alpha}$$

$$P = \frac{(U_{CH})^2}{R} = R I_{ch}^2 = \frac{V^2}{R} \frac{t1}{t3} = P \max \frac{t1}{t3} = P \max \alpha$$

La puissance P varie de $\frac{V^2}{R}$ à 0 lorsque le rapport cyclique α varie de 1 à 0.

La tension aux bornes de la charge et l'intensité la traversant sont sinusoïdales, et pour une charge résistive, la consommation de puissance réactive reste nulle.

Cependant, la puissance active (P) absorbée par la charge est différente de la puissance apparente (S) fournie par le réseau :

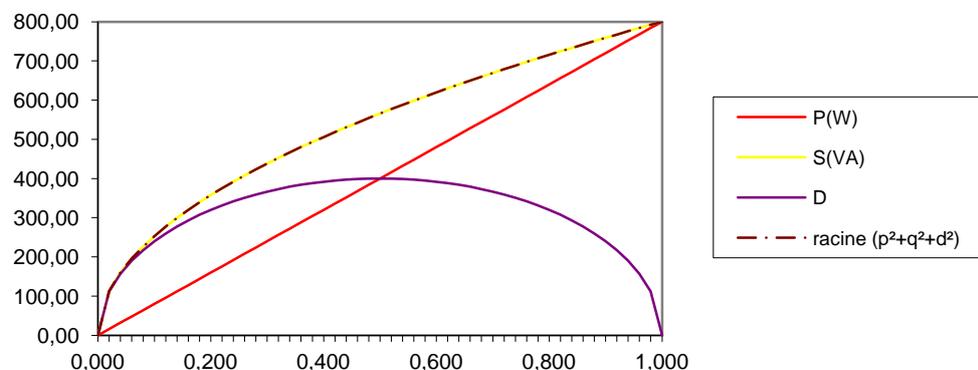
Exemple pour une puissance de 800 W :

$$P = U_{ch} \times I_{ch} = \frac{V^2}{R} \frac{t1}{t3}$$

et

$$S = V \times I_{ch} = \frac{V^2}{R} \sqrt{\frac{t1}{t3}}$$

Donc $P \neq S$

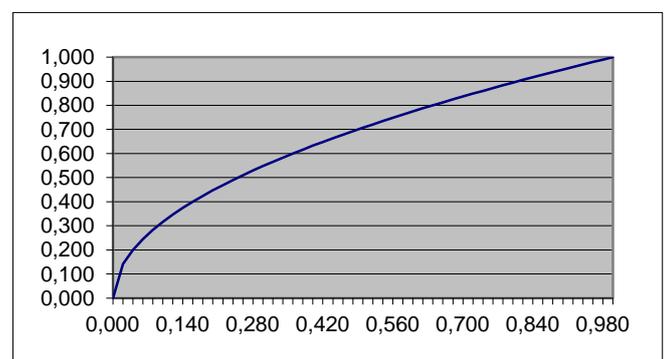


Il y a donc consommation d'une autre puissance appelée puissance déformante (notée D).

$$S = \sqrt{P^2 + D^2}$$

On peut en déduire le facteur de puissance :

$$\text{Facteur de puissance} = \frac{P}{S} = \sqrt{\frac{t1}{t3}}$$



3.3.4. -Exemple de gradateurs industriels

Eurotherm 461

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA SÉRIE 460

Les gradateurs de puissance de la série 460 sont des appareils destinés au contrôle de charges électriques industrielles monophasées.

La série 460 est conçue pour le contrôle des charges :

- inductives (primaires de transformateurs, notamment) ou
- résistives à forte ou à faible variation de résistance en fonction de température.

Un gradateur comporte une paire de thyristors montés en antiparallèle sur un dissipateur thermique.

Les gradateurs de la série 460 contrôlent des courants allant de 15 A à 150 A.

La tension nominale entre phases variant de 120 V à 500 V.

Le signal de commande, reconfigurable par l'utilisateur, a trois niveaux en tension : 0-5 V ; 0-10 V et 1-5 V. et quatre niveaux en courant : 0-5 mA ; 0-10 mA ; 0-20 mA et 4-20 mA.

La commande manuelle par potentiomètre externe est possible.

Les gradateurs de la série 460 disposent des fonctions suivantes :

- le contrôle de puissance électrique des charges inductives et résistives
- différents modes de conduction des thyristors
- la diminution des courants d'appel des charges à fort coefficient de température par démarrage progressif
- la suppression de surintensité au démarrage des charges inductives
- la limitation de courant
- la détection de rupture partielle de charge
- la sortie logique pour une commande d'autres unités de puissance (sortie «Esclave»)
- le circuit de blocage sélectif des impulsions
- l'inhibition disponible sur le bornier utilisateur
- la retransmission des images de courant et de tension de charge.

CODIFICATION

Gradateur

Modèle / Courant / Tension / Alimentation / Signal / Mode de conduction / Options / 00
 nominal nominale auxiliaire d'entrée des thyristors

| Modèle | Courant nominal | Code |
|------------------------------------|-----------------------------|------|
| Sans blocage des impulsions 461 | 15 A | 081 |
| | 25 A | 082 |
| | 40 A | 083 |
| | 55 A | 062 |
| | Avec blocage des impulsions | |
| 462 | 55 A | 062 |
| 462 | 75 A | 113 |
| 463 | 100 A | 114 |
| 464 | 125 A | 117 |
| 464 | 150 A | 100 |

| Tension nominale | Code |
|------------------|------|
| 120 V | 10 |
| 240 V | 13 |
| 277 V | 32 |
| 440 V | 28 |
| 480 V et 500 V | 29 |

Pour d'autres tensions, contacter votre Agence EUROTHERM.

| Alimentation auxiliaire | Code |
|--------------------------|------|
| Alimentation bitension : | |
| 100 V et 230 V | 41 |
| 115 V et 230 V | 19 |
| 200 V et 230 V | 42 |
| 277 V et 230 V | 46 |
| 380 V et 230 V | 43 |
| 440 V et 230 V | 47 |
| 480 V ou 500 V et 230 V | 44 |

| Signal d'entrée | Code |
|-----------------|------|
| 0-5 V | 008 |
| 1-5 V | 068 |
| 0-10 V | 060 |
| 0-5 mA | 069 |
| 0-10 mA | 071 |
| 0-20 mA | 072 |
| 4-20 mA | 073 |

| Mode de conduction des thyristors | Code |
|--|------|
| Angle de phase | 002 |
| Syncopé | 160 |
| Train d'ondes rapide (0,8 s) | 001 |
| Train d'ondes rapide avec démarrage progressif | 055 |
| Train d'ondes rapide avec démarrage et arrêt progressifs | SDF |
| Train d'ondes lent (8 s) | 050 |
| Train d'ondes lent avec démarrage progressif | 056 |
| Train d'ondes lent avec démarrage et arrêt progressifs | SDS |

| Options | Code |
|--------------------------------------|------|
| Fréquence 60 Hz | 69 |
| Contact d'alarme PLF fermé en alarme | 83 |
| Unité sans embase | 76 |

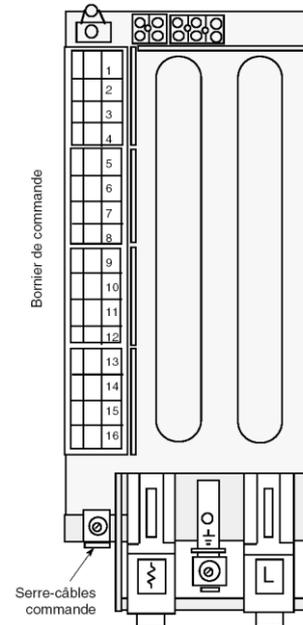
BORNIER DE COMMANDE

Sur le bornier commande de la carte commande s'effectuent les branchements suivants :

- le signal d'entrée (externe ou manuelle)
- l'inhibition de fonctionnement du gradateur
- la limitation de courant par seuil
- la retransmission de la tension et du courant de charge
- le signal logique pour piloter un contacteur statique (sortie «Esclave»)

Le bornier est fixé sur l'embase et est accessible après que le gradateur 460 est débroché.

| Numéro de borne | Désignation |
|-----------------|--|
| 1 | Non connectées |
| 2 | |
| 3 | Sortie de l'image du courant charge Retransmission 0-5 V Signal redressé double alternance |
| 4 | Entrée manuelle |
| 5 | Entrée externe |
| 6 | 0 V commun |
| 7 | Non connectées |
| 8 | |
| 9 | |
| 10 | |
| 11 | +10 V utilisateur |
| 12 | |
| 13 | Sortie «Esclave» (10 Vdc : 10 mA max) |
| 14 | Entrée limitation de courant |
| 15 | Sortie de l'image de la tension charge (alimentation auxiliaire) Retransmission 0-5 V Signal redressé double alternance |
| 16 | Entrée de l'inhibition de fonctionnement du gradateur |



Branchement de la commande externe

Le signal externe est appliqué aux bornes 5 et 6 du bornier commande («+» à la borne 5).

Le gradateur 460 peut être configuré avec le choix de 3 niveaux de signal d'entrée en tension et 4 niveaux de signal d'entrée en courant (voir spécifications techniques).

Pour le fonctionnement normal du gradateur de la série 460, déconnecter l'entrée «Inhibition»

(borne 16) de la tension «+10 V utilisateur» (borne 12).

L'entrée «Limitation de courant» (borne 14) doit être connectée à la tension «+10 V utilisateur».

L'entrée «Commande manuelle» (borne 4) doit être reliée à la borne 6 («0 V»).

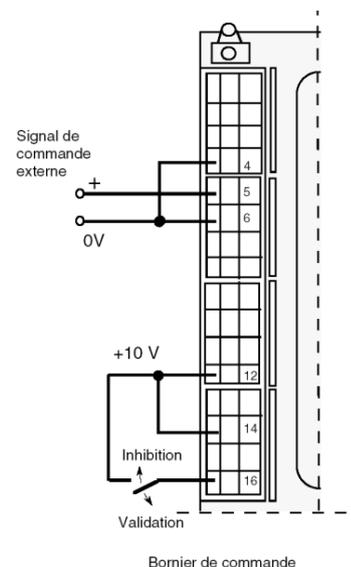


SCHÉMA DE BRANCHEMENT DE CHARGE MONOPHASÉE

Le courant de charge passe par les bornes de puissance «L» (Ligne) et «C» (Charge).

L'autre extrémité de la charge est connectée soit au neutre, soit à la deuxième phase du réseau, suivant le montage choisi. La borne «L» doit être reliée à la phase du réseau.

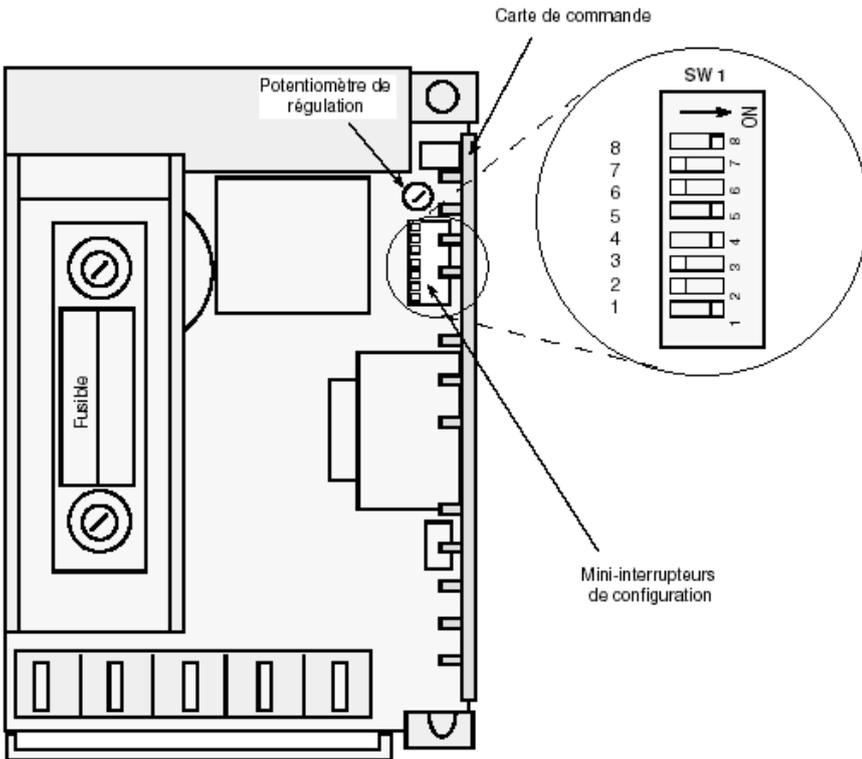
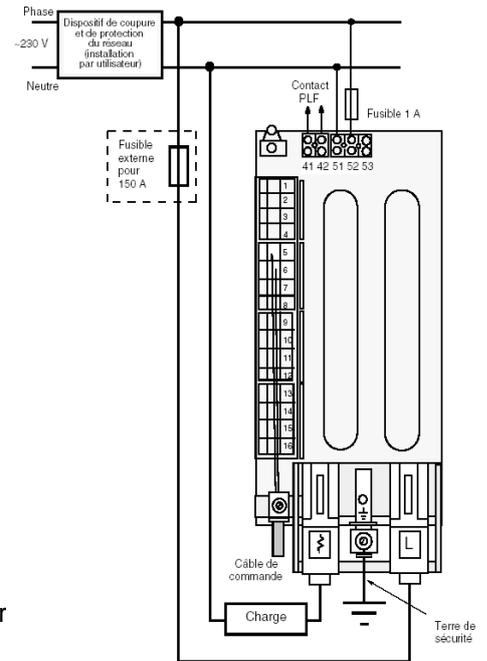
Il est indispensable de respecter ce montage afin d'éviter tout mauvais fonctionnement, en particulier, les bornes 51 à 53 par rapport aux phases de puissance.

CONFIGURATION CARTE COMMANDE

Les gradateurs de la série 460 sont équipés d'une barrette de mini-interrupteurs et de deux cavaliers permettant la sélection :

- du type d'entrée,
- du mode voulu de conduction des thyristors,
- de la fréquence utilisée (50 ou 60 Hz).

Les mini-interrupteurs et les cavaliers de configuration sont situés sur la carte commande.



Type d'entrée

Entrée manuelle

Le type du signal d'entrée est configuré par les mini-interrupteurs de 1 à 4.

| Signal d'entrée automatique externe | Position des mini-interrupteurs | | | |
|-------------------------------------|---------------------------------|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 0-5 V | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0-10 V | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1-5 V | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0-5 mA | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0-10 mA | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1-5 mA | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0-20 mA | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 4-20 mA | 0 | 1 | 1 | 1 |

Mode de conduction des thyristors

Les modes de conduction des thyristors disponibles pour les gradateurs de puissance de la série 460 sont configurables par les mini-interrupteurs de 5 à 7 et par deux cavaliers J1 et J2 implantés sur la carte commande.

| Mode de conduction des thyristors | Position | | | | |
|--|--------------------|---|---|-----------|----|
| | Mini-interrupteurs | | | Cavaliers | |
| | 5 | 6 | 7 | J1 | J2 |
| Variation d'angle d'ouverture | 0 | 0 | 0 | 0 | - |
| Syncopé | 1 | 0 | 0 | 0 | - |
| Train d'ondes rapide | 1 | 1 | 0 | 0 | - |
| Train d'ondes lent | 1 | 1 | 0 | 1 | - |
| Train d'ondes rapide avec démarrage progressif | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| Train d'ondes lent avec démarrage progressif | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Train d'ondes rapide avec démarrage et arrêt progressifs | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Train d'ondes lent avec démarrage et arrêt progressifs | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |