TD1 : Température et chaleur (2 séances)

L'étude des phénomènes calorifiques a conduit les physiciens à préciser deux notions différentes : celle de température et celle de quantité de chaleur. Le but de ce premier TD est de définir la notion de température et de sa mesure ainsi que la notion de quantité de chaleur. Le TD suivant développera la notion de quantité de chaleur ainsi que sa mesure.

I) Température

La température caractérise l'état d'un corps. Elle a son origine dans nos sensations : un corps nous paraît, au toucher, froid, chaud ou tiède.
Des changements dans l'état physique des corps accompagnent les modifications de ces sensations. Nous observons des changements d'état :

- l'eau se transforme en glace en hiver (quand il fait froid)
- l'eau mise à chauffer entre en ébullition
- les métaux chauffés fondent

Si ces phénomènes sont les plus spectaculaires, un certain nombre de phénomènes physiques sont liés aux variations de ces sensations.

I-1) Quelques phénomènes physiques liés à l'augmentation de température

- Variation continue des dimensions des corps qui s'échauffent : ce sont les dilatations. Elles existent dans les gaz, les liquides et les solides.
- Variation continue de la résistivité et donc de la résistance.
- Variation de la couleur d'un corps.
- Apparition d'une différence de potentiel sur une soudure métallique.
- Variation du bruit dans un composant électronique.
- Variation de la tension de seuil d'une jonction (typiquement 2 mV/°)

I-2) Transfert de chaleur

Lorsque nous mettons en contact un corps chaud et un corps froid, nous constatons que le corps chaud se refroidit et le corps froid s'échauffe. Des mesures physiques montrent que le corps chaud se contracte et le corps froid se dilate. Ces variations de volume se ralentissent et tendent vers 0 en fonction du temps. Lorsqu'elles ont cessé, c'est à dire lorsqu'elles sont devenues indécelables par nos méthodes d'investigation, nous disons que les deux corps ont atteint l'équilibre thermique ou qu'ils ont la même température.

Principe de l'équilibre thermique (Principe 0 de la thermodynamique)

Deux corps mis en contact prolongé se mettent en équilibre thermique. Deux corps en équilibre avec un troisième sont aussi en équilibre entre eux.

II) Évaluation et mesure de la température

II-1) Évaluation tactile

Le toucher permet des comparaisons très précises de température. Lorsque vous vous asseyez sur une chaise, vous pouvez dire si quelqu'un s'y est assis avant vous. Pourtant la température du bois de l'assise ne varie pas beaucoup. Le problème est que cette évaluation n'est que relative : tel corps est plus chaud que tel autre. Mais prenez de l'eau à 17° C : vous n'aurez pas la même sensation si vous vous plongez directement ou si vous séjournez dans de l'eau plus froide avant d'y entrer !

Si l'on veut plus qu'une évaluation, c'est à dire une mesure, il faut rechercher des repères. Les repères doivent être précis et facilement reproductibles. Les changements d'état des corps sont de bons repères parce qu'ils se font à une température constante. On peut s'en assurer à l'aide d'un thermoscope (ballon surmonté d'une tige mince cylindrique contenant un liquide dont on observe la dilatation). Les repères fondamentaux sont en général lié aux deux changements d'état de l'eau : la glace fondante et l'eau en ébullition. Une fois les repères choisis, on peut les associer à différents nombres ce qui donne différentes échelles de températures.

II-2) Échelle thermométrique de Fahrenheit (°F)

Cette échelle, toujours utilisée par les anglo-saxons, date de 1720. Elle utilise un repère supplémentaire, la congélation de l'eau saturée de sel. La correspondance est la suivante :

Congélation de l'eau saturée en sel	$\longrightarrow$	0°F
Congélation de l'eau pure	$\longrightarrow$	32°F
Ébullition de l'eau pure	$\longrightarrow$	212°F

II-3) Échelle centigrade de température (°c)

Cette échelle date de 1742. On utilise la correspondance suivante :

Congélation de l'eau pure	$\longrightarrow$	0°c
Ébullition de l'eau pure	$\longrightarrow$	100°c

Si l'on utilise la dilatation des corps, l'idée est de repérer le repère 0°c puis 100°c et de diviser en 100 parties égales pour définir le °c. Le problème est donc que deux thermomètres basés sur cette échelle ne donneront pas forcément la même température dans la mesure où les corps utilisés n'ont pas forcément la même loi de dilatation. Une question qui vient à l'esprit est de savoir s'il existe une échelle absolue, c'est à dire indépendante des thermomètres. La thermodynamique répond que oui, cela se déduit (pas très facilement en fait) du deuxième principe de la thermodynamique.

II-4) Échelle thermodynamique de Celsius (°C)

Cette échelle est basée sur l'observation suivante : tous les thermomètres à gaz fournissent la même échelle lorsque ces gaz sont utilisés à faible pression. Il existe deux sortes de thermomètres à gaz, ceux basés sur la variation de volume à pression constante dont l'échelle est définie par la relation linéaire $v = v_0(1+\alpha t)$ et ceux qui utilisent la variation de pression à volume constant et dont l'échelle est définie par : $p = p_0(1+\beta t)$. Pour tous les gaz, on trouve quelque soit leur nature :

$$\alpha = \beta = 1 / 273{,}15$$

Cette échelle commune à tous les gaz a un caractère universel. Elle est appelée échelle centigrade du gaz parfait ou échelle Celsius.

II-5) Échelle thermodynamique de Kelvin (K)

Cette échelle (notée T) adoptée en 1954 est définie à partir de l'échelle centigrade du gaz parfait par la relation :

$$T = t + 1/\alpha = t + 273{,}15$$

On peut montrer que cette échelle se confond avec l'échelle de température introduite par Lord kelvin mesurée en °K (degré kelvin). La définition rigoureuse de la température absolue se fait à l'aide du deuxième principe de la thermodynamique.

III)Aller plus loin : un peu de physique

III-1) Premier principe de la thermodynamique

Un certain nombre de phénomènes physiques nouveaux ont été découverts :
1800 Volta construit la première pile (transformation chimique -> électricité)
1830 Faraday électrolyse (électricité -> transformation chimique)
1819 Orsted champ électrique -> champ magnétique
1822 Seebeck effet thermoélectrique
1831 Faraday Induction
Ces découvertes confrontaient les scientifiques du XIX° siècle à tout un faisceau de phénomènes nouveau qui associaient chaleur, électricité, magnétisme et chimie. Tous ces effets doivent représenter la transformation d'une quantité commune indestructible : l'énergie.

Principe de la conservation de l'énergie (Premier principe de la thermodynamique)

Toutes les énergies (flux de chaleur, travail, ...) peuvent se transformer les unes en les autres sans perte aucune.

Remarque : cette formulation est un peu simplifiée mais largement suffisante pour nous.

III-2) Principe de Carnot (1824)

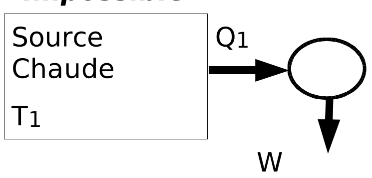
Si la physique s'arrêtait au premier principe, tous nos problèmes énergétiques n'existeraient pas : on pourrait transformer la chaleur contenue dans l'eau de mer en énergie. Or l'expérience nous montre que cela n'est pas possible. Un deuxième principe très limitatif exprime cela. Il peut être formulé de plusieurs façons et nous choisissons celle de Sadi Carnot, physicien français.

Principe de Carnot (Deuxième principe de la thermodynamique)

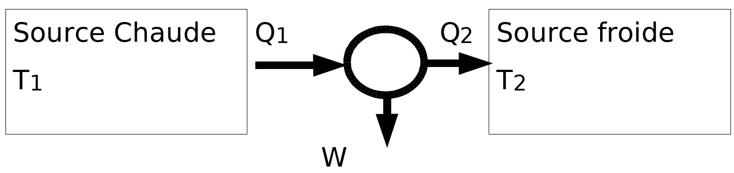
- Si l'on veut transformer de la chaleur en une autre énergie, il faut forcément une source chaude et une source froide.

- Le rendement maximal de la transformation précédente ne dépend que des températures des deux sources.

Impossible



Possible



Remarque : Les flèches des deux dessins peuvent être inversées pour donner des cas possibles : le frein (convertit l'énergie mécanique en chaleur) pour le premier et le réfrigérateur pour le second (puise de la chaleur dans la source froide à l'aide du travail qu'on lui apporte).

D'après Carnot, dans un moteur thermique fournissant un travail, la chaleur va des sources chaudes vers les régions froides. Un tel moteur ne fournit pas de travail s'il n'y a pas d'écart de température. Une autre façon de voir les choses est de dire qu'il ne peut pas y avoir du travail fourni s'il n'y a pas de source froide. Vouloir prendre la chaleur d'un corps chaud pour la transformer en travail n'est qu'une vue de l'esprit, la nature ne fonctionne pas comme cela ! Malheureusement !

Par définition (Thomson 1848) les échelles de températures absolues sont définies à l'aide des rapport d'échange de chaleur dans une machine thermique à deux sources chaude et froide. Si l'on note Q la quantité de chaleur échangée (énergie en Joule) on a la relation :

$$Q_1 / Q_2 = T_1 / T_2$$

Il suffit de fixer la température d'une des sources, par exemple T2 pour définir complètement la température absolue. Pour des raisons historique et pratique, on utilise le point triple de l'eau comme température de référence. Ce point correspond à un équilibre (gaz, liquide, solide) de l'eau et est fixé à 273,16 K.

Exercice 1

Trouver a et b tels que : $a.(t_F + 40) = b.(t_c + 40)$ pour la correspondance °C vers °F ?
Quelle est la température de congélation en °C de l'eau saturée de sel ?
Pour quelle température a-t-on la même représentation numérique dans les deux systèmes ?

IV) Dilatation des solides

1°) Dilatation linéique

Lorsqu'un solide est soumis à une élévation de température ΔT, son augmentation de longueur ΔL est en première approximation : $\Delta L = \alpha . L_0 . \Delta T$

où α est le coefficient de dilatation linéique, L_0 la longueur initiale à la température T_0.

2°) Dilatation surfacique

$$\Delta S = \gamma . S_0 . \Delta T$$

avec $\gamma = 2\alpha$ pour les matériaux isotropes.

3°) Dilatation volumique

$$\Delta V = \beta . V_0 . \Delta T$$

avec $\beta = 3\alpha$ pour les matériaux isotropes.

Exercice 2

Calculer l'allongement d'une barre de cuivre de 80 cm de long à 15°C quand on la chauffe à 35°C. On donne : $\alpha = 1,5.10^{-5}$ °C^{-1} pour le cuivre aux températures considérées. Exprimer le résultat en %.

Exercice 3

On veut introduire un cylindre de 1 cm de diamètre à 30°C dans un trou percé (diamètre 0,9997 cm) dans une plaque d'acier à 30°C. Sachant que le coefficient de dilatation linéique de l'acier est $\alpha = 1,1.10^{-5}$ °C^{-1}, à quelle température faut-il chauffer la plaque d'acier ?

Exercice 4

A 20°C, une bille d'acier ($\alpha=1,1.10^{-5}$ °C^{-1}) a un diamètre $\Phi=0,9$ cm. Une plaque en aluminium ($\alpha=2,2.10^{-5}$ °C^{-1}) est percée d'un trou de diamètre $\Phi=0,899$ cm. A quelle température identique doit-on chauffer bille et plaque pour que la bille passe dans la plaque sans jeu ?

Exercice 5

On veut réaliser un thermomètre de précision électronique en utilisant une variation de résistance en fonction de la température. On a le choix entre un fil de platine et une thermistance.

a) La résistance R d'un fil de platine est représentée en fonction de t (température Celsius légale), par la formule valable entre 0°C et 600°C,

$$R = R_0(1 + at + bt^2)$$

avec $a = 4.10^{-3}$ °C^{-1} et $b = -6.10^{-7}$ °C^{-2} et $R_0= 25$ W.

Montrer que l'on peut négliger le terme en bt^2 tout en gardant une bonne approximation si t<100°C

b) A 0°C le fil de platine a un diamètre $\Phi=0,1$ mm, calculer sa longueur sachant que sa résistivité vaut à cette température $\rho = 1,06.10^{-7}\Omega.m^{-1}$.

Calculer DR pour une variation de 1°C.

c) On utilise maintenant une thermistance constitué d'un mélange aggloméré de magnétite, d'aluminate de magnésium et de titanate de zinc. C'est un semi-conducteur et sa résistance à différentes températures est donnée dans le tableau ci-dessous :

Température (°C)	-50	-25	0	25	100	200
Résistance (Ω)	160000	20500	4000	1000	48	3,8

c-i)Montrer que la résistance R de cette thermistance peut être approximativement représentée par la formule

$$R=R_1\, e^{m(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_1})}$$

si R_1 est la résistance à la température T_1 = 298K
Calculer la valeur numérique de m.

c-ii) La résistance de cette thermistance est donnée par la formule $R = R_0 (1 - 0{,}0600t + 0{,}0020t^2)$ entre les températures -1°C et 1°C. Calculer les résistances à - 1°C et 1°C ?

c-iii) Conclusion sur la mesure de petites variations de températures pour ces deux méthodes.

V) La chaleur

Nous avons présenté la notion de chaleur dans le TD précédent à travers la formulation du premier principe de la thermodynamique. Ce qu'il faut retenir de ce principe, c'est que la chaleur est équivalente à de l'énergie et se mesure donc en Joule (J)

V-1) Ancienne unité

La calorie est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1g d'eau pour passer sa température de 14,5°C à 15,5°C. Évidemment on peut convertir cette unité en Joule : 1 calorie = 4,1868 Joule.

V-2) Chaleur massique

On observe pratiquement qu' on a proportionnalité entre l'élévation de température et la chaleur reçue par un corps ce qui s'exprime par :

$$\boxed{Q=m.c.\Delta T}$$

Le coefficient de proportionnalité c ainsi défini est appelé chaleur massique.
On rappelle que la notation ΔT désigne toujours $T_{finale} - T_{initiale}$ qui peut être positive ou négative. On rappelle la convention sur la chaleur : elle est considérée comme positive si elle est apportée au corps.

Pour un corps donné, cette chaleur massique peut dépendre de la température, elle est alors notée C_T. On exprime alors la relation de proportionnalité plutôt sous forme différentielle :

$$\boxed{dQ=m.c_T.dT}$$

En général on simplifie en ne tenant pas compte de la dépendance de la chaleur massique de la température. On donne donc des approximations des chaleurs massiques pour un certain nombre de corps.

Éléments	Chaleurs Massiques ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	Éléments	Chaleurs Massiques ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	Éléments	Chaleurs Massiques ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
fer	460	cuivre	384	aluminium	895
glace	2090	eau	4185	mercure	138
pétrole	1670	soufre	745	Ethanol	2430

V-3) Chaleurs massiques des gaz

Définir la chaleur massique d'un gaz est un peu plus compliqué que pour un solide ou liquide car lorsqu'on apporte de la chaleur à un gaz on peut constater une augmentation de pression ou une augmentation de volume ou les deux. On définit alors une chaleur massique à pression constante C_p et une chaleur massique à volume constante C_v.

V-4) Chaleur latente

Pendant les changements d'état des corps (fusion, vaporisation, ...), la température reste constante. Il est donc clair que la formule précédente

$$\boxed{Q=m.c.\Delta T}$$

ne tient plus puisque l'on a $\Delta T=0$ mais pas $Q=0$! Il faut fournir de la chaleur pour le changement d'état mais sans augmentation de la température. On définit alors une nouvelle notion, la chaleur latente de changement d'état.
Chaleur latente : $l = dQ / dm = Q / m$
On donne pour information quelques valeurs de chaleur latente.

Fusion de la glace : $l_f = 3{,}337.10^5$ J/kg.	vaporisation de l'eau $l_v = 2{,}2510^6$ J/kg
Fusion du benzène : $l_f = 1{,}25.10^5$ J/kg.	vaporisation du benzène $l_v = 3{,}910^5$ J/kg
Fusion de l'oxygène : $l_f = 1{,}4.10^4$ J/kg.	vaporisation de l'oxygène $l_v = 2{,}110^5$ J/kg

V-5) Exercices

Exercice 6

L'étain fond à 323°C. La chaleur latente de fusion de l'étain est de 61 kJ/kg et sa chaleur massique vaut 250 $Jkg^{-1}K^{-1}$. Calculer l'énergie nécessaire pour faire fondre les 20 kg d'étain contenus dans une machine à souder à la vague et initialement à la température de 20°C. Exprimer le résultat en Joules et en kilowattheures.

Exercice 7

On prend un bloc de glace de 1,5 kg à -10°C.
1°) Quelle quantité de chaleur faut-il lui apporter pour la transformer complètement en vapeur ?
2°) On utilise une puissance électrique de 1,5 kW pour réaliser la transformation précédente. Combien de temps a-t-on mis ?

Exercice 8

Quelle quantité d'eau à 100°C faut-il verser sur 10g de glace prise à 0°C pour obtenir uniquement de l'eau liquide à 0°C (on supposera qu'il n'y a aucun échange de chaleur avec l'extérieur).

Exercice 9

Un cube de 8 cm^3 de glace de densité 0,90 initialement à une température de -3°C est plongé dans un verre de 50 cm^3 d'eau. En supposant qu'il n'y a aucun échange de chaleur avec l'extérieur quelle est la température finale du mélange ? La température initiale de l'eau est de 15°C.

Exercice 10

On a mesuré la valeur en eau d'un calorimètre et on a trouvé 10g. On verse 200g de pétrole et la température est alors de 15°C. On introduit 30 g de sucre à 100 °C et la température finale est de 22°C. Quelle est la chaleur massique du sucre ?

Pour info : le record de température basse est de 0,5 10^{-7} K en 2004

TD2 : les transferts de chaleur (2 séances)

I) Généralités

1°) Introduction

Lorsque deux corps sont à des températures différentes, il y a transfert thermique d'énergie du plus chaud vers le plus froid.
On distingue trois modes de transfert thermique, chacun régi par des lois bien spécifiques : la conduction, la convection et le rayonnement.

2°) La conduction thermique ou diffusion thermique

Elle existe dans tous les corps, solides ou fluides. La partie la plus froide s'échauffe au contact de la partie la plus chaude du corps. Cette élévation correspond à un accroissement de :
- l'énergie microscopique de vibration du réseau cristallin pour les solides ;
- l'énergie cinétique microscopique d'agitation désordonnée des molécules d'un fluide, dûe aux chocs incessants entre ces molécules.

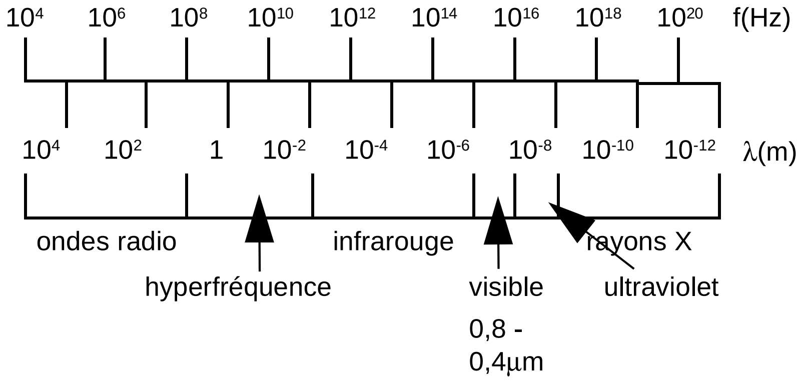
Lorsqu'une des extrémités d'une tige métallique est placée au contact d'une source chaude, le phénomène de conduction thermique se manifeste par une élévation progressive de température des parties froides de la tige.
Ce transfert thermique ne s'accompagne pas, à l'échelle macroscopique, de mouvement de matière.

3°) La convection

Ce mode de transfert thermique implique un déplacement macroscopique de matière et concerne donc les fluides, liquides ou gazeux.
Dans les fluides (gaz ou liquides), une variation de température modifie localement la masse volumique du fluide, ce qui entraîne un mouvement d'ensemble du fluide (les parties chaudes, plus légères, ont tendance à s'élever) ; c'est le phénomène de convection naturelle.
Un fluide peut aussi être mis en mouvement de manière artificielle pour accélérer les échanges thermiques ; on parle alors de convection forcée.

4°) Le rayonnement

Un corps chaud (le soleil par exemple) émet un rayonnement électromagnétique qui transporte de l'énergie susceptible d'échauffer le corps qui la reçoit.
Contrairement aux transferts thermiques par conduction ou par convection, qui nécessitent la présence d'un milieu matériel, un transfert thermique par rayonnement peut se produire dans le vide.
Le rayonnement électromagnétique se propage à la vitesse $c=3.10^8$m/s. Il est caractérisé par une fréquence ou une longueur d'onde qui définit son domaine.

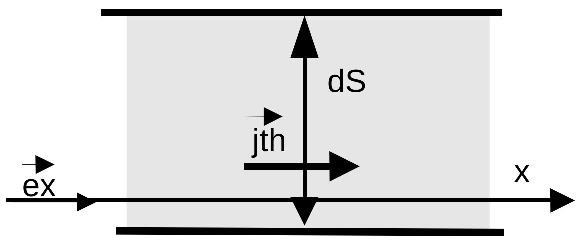


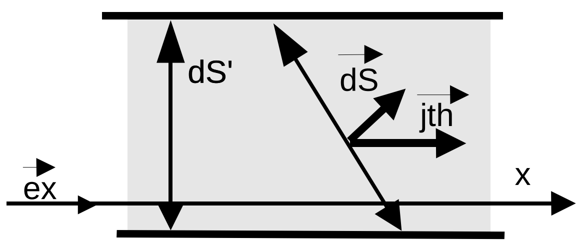
II) Etudes détaillées

1°) Etude de la conduction thermique (Fourier en 1822)

1-1) Flux thermique

Considérons un corps dont la température T ne dépend que de la coordonnée x et du temps t. La quantité d'énergie δQ, qui traverse par conduction thermique une surface élémentaire dS perpendiculaire à l'axe (Ox) pendant une durée dt, est d'autant plus importante que dS et dt sont grands : $\delta Q = j_{th}.dS.dt = d\Phi.dt$ avec $d\Phi = j_{th}.dS$.
$d\Phi$ est le flux de j_{th} à travers la surface dS est appelé flux thermique.
Le flux thermique Φ est une puissance et s'exprime en watt (W).





Dans le cas plus général où la surface n'est pas perpendiculaire au flux thermique, on est obligé d'utiliser la notation vectorielle :

$$d\Phi = \vec{j}_{th} \cdot \vec{dS}$$

1-2) Loi de Fourier

Dans un milieu dont la température T(x,t) varie dans la direction de l'axe (Ox), la conduction se manifeste par l'existence d'un vecteur densité de flux thermique orienté dans le sens des températures décroissantes.
Joseph Fourier a observé expérimentalement une relation de proportionnalité entre la densité de flux thermique et la dérivée spatiale de la température :

$$\boxed{\Phi = \frac{dQ}{dt} = -k \cdot S \cdot \frac{dT}{dx}}$$

k est la conductivité thermique du milieu et se mesure en W/m.K. Φ est donc le flux thermique et se mesure en W.

1-3) Ordre de grandeur des conductivités

- Métaux purs : 50 à 500 W/m.K : cuivre 387 W/m.K , aluminium: 203 W/m.K, argent:418W/m.K,
  fer : 73 W/m.K, acier : 36 W/m.K, plomb : 35 W/m.K
- Alliages : 10 à 100 W/m.K
- Solides non métalliques : 10^{-2} à 10 W/m.K : SiC (céramique) 50-100 W/m.K quartz : 19,6W/m.K, marbre : 2,8 W/m.K, eau (glace) : 2,2 W/m.K, pyrex 1 W/m.K, bois 0,12W/m.K,
  béton : 0,92 W/m.K
- Liquides : 10^{-1} à 1W/m.K : mercure : 8,2W/m.K, eau : 0,55W/m.K
- Matériaux isolants : 10^{-2} à 1 W/m.K : laine de verre 0,04 W/m.K, polystyrène 0,004 W/m.K
- Gaz à la pression atmosphérique:10^{-3} à 10^{-1}W/m.K : hydrogène : 0,17 W/m.K, air : 0,024W/m.K, hélium : 0,14 W/m.K
- Superisolants thermiques 10^{-4} W/m.K

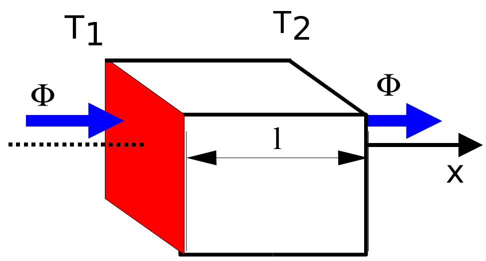
Remarque : il est à noter que les deux unités W/m.K et W/m.°C sont les mêmes unités.

1-4) Notion de résistance thermique

Il y a une certaine analogie entre les lois thermique et électrique. Cela conduit à définir une résistance thermique analogue à la résistance électrique. Comme la résistance électrique, la résistance thermique d'un corps dépend de sa conductivité thermique et de sa géométrie. On définit alors cette notion importante en reprenant la loi de Fourier sous forme non différentielle :

$R_{th} = (T_1-T_2)/\Phi$
en [°C/W ou K/W]

$\Phi = k.S.(\Delta T/l)$



La disparition du signe "-" tient aux conventions qui sont prises ici : le flux thermique Φ est considéré comme arrivant sur la surface de température T1, et ce flux est considéré comme positif dès qu'il est entrant. De toute façon, comme la résistance électrique la résistance thermique doit toujours être positive.

Exercice 1 (La chaleur dans un parallélépipède)

Soit un conducteur thermique de section S rectangulaire et constante comme à la figure ci-dessus.
Sa longueur est supposée être L.
A l'aide des définitions ci-dessus, établir :

- l'expression du flux thermique Φ,
- l'expression de la résistance thermique R_{th} de ce parallélépipède,
- l'expression de la température en fonction de la position x.

Remarque : la formule trouvée dans cet exercice sera considérée comme générale, même si en principe elle nécessite une section S constante.

Exercice 2 (texte en anglais)

A heat rate of 3 kW is conducted through a section of an insulating material of cross-sectional area 10 m^2 and thickness 2.5 cm. If the inner (hot) surface temperature is 415°C and the thermal conductivity of the material is 0.2 W/m.K, what is the outer surface temperature ?
to insulate : isoler.

Exercice 3

Un distributeur de boisson a la forme d'un cube de 65 cm de côté (extérieur). Ses parois de 3 cm d'épaisseur sont en plastique (k=0,05 W/m.K) Si la température extérieure est de 20°C, quelle est la quantité de glace qui fond par heure à l'intérieur du distributeur ? (Température initiale de la glace 0°C)

1-5) Analogie électrique

De même qu'une des lois fondamentale de l'électricité s'appelle la loi d'Ohm, la définition de la résistance thermique s'appellera par abus de langage la loi d'Ohm thermique. Si la différence de température (T_1-T_2) est analogue à la différence de potentiel (V_2-V_1), le flux Φ est analogue au courant électrique I, la conductivité thermique k à la conductivité électrique σ , la résistance thermique R_{th} à la résistance électrique R l'analogie ne se poursuit naturellement pas plus loin. En particulier dans les calculs des puissances, il n'y a aucune analogie puisque Φ est déjà une puissance.
L'analogie est importante pour les associations de résistances thermiques. On a aussi une notion de résistances thermiques en série et en parallèle. Si on se rappelle qu'en électricité c'est le courant qui détermine le fait que deux résistances sont en série (traversées par le même courant) ou en parallèle (elles se partagent le courant), on aura la même chose avec les flux thermiques.

1-6) Généralisation de la loi de Fourier

Si on considère un matériau dans son volume f(x,y,z), la loi de Fourier doit être généralisée à l'espace. Nous définissons alors le gradient de température :

$$\overrightarrow{grad}\,T = \frac{\partial T}{\partial x}\cdot\vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y}\cdot\vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z}\cdot\vec{k}$$

On montre que le vecteur $\overrightarrow{grad}\,T$ est perpendiculaire aux surfaces isothermes dans le matériau et qu'il est dirigé vers les hautes températures. L'ensemble de ces vecteurs, en tous points du volume constitue un champs de vecteurs.
La formule de Fourier devient :

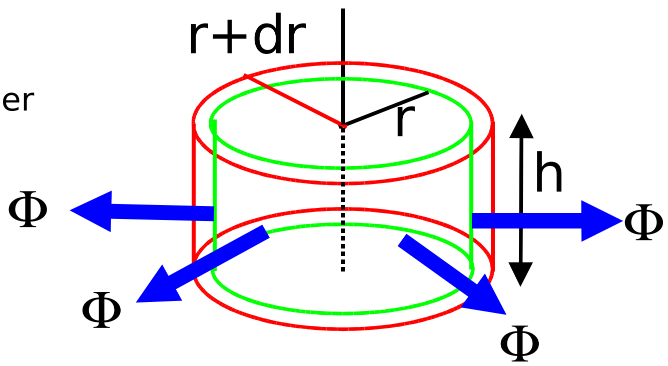
$$\vec{J} = -k\cdot\overrightarrow{grad}\,T$$

avec k : conductivité du matériau, et J est la densité du flux par unité de surface : J = dΦ/dS.

Cette formule générale ne sera appliquée que dans le cas particulier suivant : cas particulier d'une symétrie cylindrique (ou sphérique)

$$\Phi = -k.S(r)\frac{dT}{dr}$$

qui diffère du cas à une dimension par le fait que la surface S à travers laquelle passe le flux thermique dépend de r.



2°) La convection

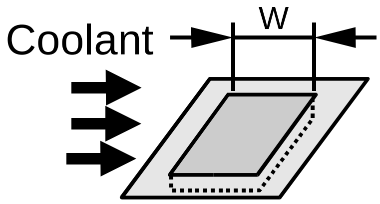
La convection est le mode d'échange de chaleur privilégié dans un fluide. Si l'on met en contact un solide et un fluide des phénomènes convectifs vont apparaître. Il faut alors modéliser les échanges thermiques.
Loi de newton : l'échange thermique par convection est proportionnel à la différence de température et à la surface : $\Phi = h_c.S(T_2 - T_1)$ (A comparer à $\Phi = (1/k).S.(T_2 - T_1)/L$ pour la résistance thermique)
T_1: température du solide, T_2 : température du fluide loin de la paroi.
Pour cette loi, seule compte la différence de température et non plus le gradient de température.
h_c est un coefficient de convection qui dépend des matériaux en contact, de l'état de surface , du type d'écoulement fluide.

- air en convection libre : h_c= 6 à 30 W/m^2.°C.
- air en convection forcée : 30 à 300 selon la vitesse d'écoulement.
- huile en convection forcée : 60 à 1 800.
- eau en convection forcée : 300 à 12 000.
- vapeur d'eau en condensation sur une surface froide : 6 000 à 120 000.

Loi générale : souvent la convection naturelle est mieux traduite par la formule suivante:

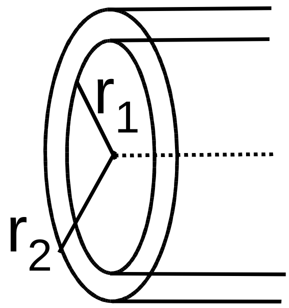
$\Phi = h_c.S\,(T_2-T_1)^{1.25}$ mais on utilisera dans la suite toujours la loi de Newton.

<u>Exercice 4</u> (texte en anglais)



A square isothermal chip is of width W=5 mm on a side and is mounted in a substrate such that its side and back surfaces are well insulated, while the front surface is exposed to the flow of a coolant at T=15°C. From reliability considerations, the chip temperature must not exceed T=85°C. If the coolant is air and the corresponding convection coefficient is h=200 W/m^2.K, what is the maximum allowable chip power ? If the coolant is a dielectric liquid for which h=3000 W/m^2.K, what is the maximum allowable chip power ?

<u>Exercice 5</u> (Température dans un câble électrique)



Un conducteur électrique a une section circulaire de rayon r_1, une longueur L, une conductivité électrique σ et une conductivité thermique K_1. Il est entouré d'une gaine isolante de rayon r_2 et de conductivité thermique K_2. On fait passer un courant I dans le conducteur. L'air ambiant est à la température T_0.

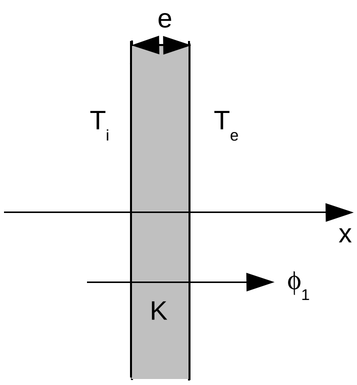
1°) Le flux thermique qui arrive dans l'isolant correspond à la puissance dissipée par effet Joule. Calculer cette puissance.

2°) Calculer la résistance thermique de l'isolant cylindrique. En déduire la température T_1 de la surface du conducteur.

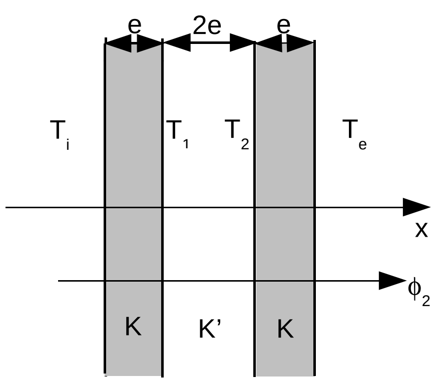
3°) En fait, au contact isolant / air, il s'établit des échanges thermiques superficiels définis par la loi de Newton : une section s de la surface latérale de la gaine dont la température vaut $T(r_2)$, échange avec l'air un flux thermique : $\Phi = h(T(r_2) - T_0)s$. Quelle est alors la température superficielle du conducteur?

<u>Données</u> : σ=5.10^7 Ω^{-1}.m^{-1}, K_1=400W.m^{-1} K^{-1}, K_2=0,4W.m^{-1} K^{-1}, r_1=0,5 cm, r_2=2cm, I=100 A T°=300K h=20W.m^{-2} K^{-1}.

<u>Exercice 6</u> Double vitrage



simple vitrage



double vitrage

L'intérieur d'une pièce est séparé de l'extérieur par une vitre de surface S orthogonale à l'axe (Ox). Le verre a une conductivité thermique K et ses deux faces sont aux températures $T_i>T_e$.
1°) La paroi est une vitre simple d'épaisseur e. Évaluer le flux thermique Φ_1 sortant de la pièce à travers cette paroi en fonction de K, S, e, T_i et T_e. Calculer la résistance thermique R_{th} de la paroi vitrée.
2°) La paroi est un ensemble de deux vitres de même épaisseur e, séparées par une épaisseur e' d'air de conductivité K'. Calculer le flux thermique Φ_2 sortant de la pièce en calculant la résistance thermique totale.
<u>Données</u> : T_e=270K, T_i=292K, e'=e=3mm, K=1,2W.m^{-1} K^{-1},K'=0,025W.m^{-1} K^{-1},
Calculer Φ_2 /Φ_1 et les températures T_1 et T_2 des faces en regard des deux vitres. Représenter la variation de température en fonction de x.
3°) En plus de la conduction étudiée ci-dessus, on doit tenir compte des échanges thermiques superficiels entre le verre et l'air. Une surface S de verre à la température T_s échange avec l'air à température T_f un flux Φ=h.S(Ts-T_f) avec h>0.
a) Quelle valeur implicite a-t-on donnée à h lorsqu'on confondait Ts etT_f ?
b) Montrer que ces échanges superficiels introduisent une résistance thermique Rth. Donner l'expression de Rth.
c) Pour obtenir les températures T_i et T_e sur les deux faces internes et externes, il faut les températures de l'air T_i' et T_e'. Le coefficient d'échange entre le verre et l'air extérieur est h_e et h_i celui relatif aux autres contacts. Calculer alors le nouveau rapport Φ_2'/Φ_1'. Conclusion.
h_e=14W.m^{-2} K^{-1}, h_i=10W.m^{-2} K^{-1}.
Expliquer qualitativement pourquoi la présence de buée sur une vitre diminue son isolation thermique.

Exercice 7

On considère une sphère creuse de rayon intérieur R_1 et extérieur R_2.
1°) Quel est le flux thermique Φ qui traverse la sphère si la température intérieure est T_1 et la température extérieure T_2 ? On rappelle que S(r) = $4\pi r^2$.
2°) Quelle est la résistance thermique de la sphère ?

3°) Transfert par rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement est en général transporté par des ondes électromagnétiques.
Le flux maximum (W/m^2) est donné par la loi de Stefan-Boltzmann :
$\Phi/ S = \sigma. T^4$
où σ est la constante de Stefan-Bolzmann σ=5,67 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}.
Une telle surface est appelée un radiateur idéal ou corps noir. Le flux thermique émis par une surface réelle est $\Phi/S = \varepsilon\sigma. T^4$ où ε est une

propriété de la surface appelée émissivité. De même l'absorption par une surface est caractérisée par α, tel que $\Phi/S = \alpha\sigma.\ T^4$
Si l'on met une surface de température T_2 et un milieu de température T_1 en présence on a un échange $\Phi/S=\varepsilon\sigma.\ (T_2^4 - T_1^4)$ où S est la surface, a est un coefficient caractérisant l'émissivité e de la source chaude et l'absorption de la source froide r.

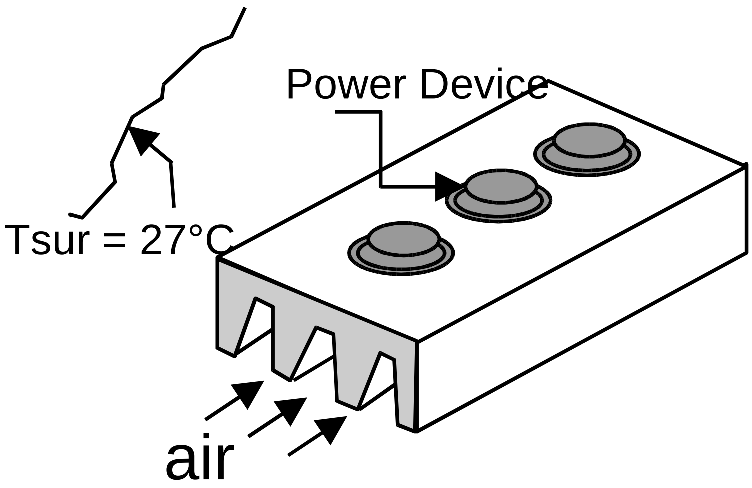
Nous poserons $h_r = \varepsilon\sigma(T_2 + T_1)(T_2^2 + T_1^2)$ coefficient de rayonnement, soit :
$\Phi = h_r.\ (T_2 - T_1)$

<u>Note</u> : La convection et le rayonnement sont caractérisés dans le calcul des radiateurs en électronique par une résistance boîtier/ambiance et contribue au bon fonctionnement de la dissipation de la chaleur.

<u>Exercice 7</u> (texte en anglais)

(Hors TD)

Electronic power devices are mounted to a heat sink having an exposed surface area of 0.045 m^2 and an emissivity àf 0.80 When the devices dissipate a total power of 20 W and the air and surroundings are at 27°C, the average sink temperature is 42°C.



What average temperature will the heat sink reach when the devices dissipate 30 W for the same environnemental condition ?

TD3 : calcul des puissances électriques (1 séance)

Vous connaissez plusieurs formules pour le calcul des puissances : P = U.I, P = U.I.cosϕ etc... Le problème est de comprendre que chacune des formules s'applique dans un cas particulier seulement, continu et sinusoïdal pour les deux formules citées. Plutôt que d'apprendre un ensemble de formules pour tous les cas particuliers, il faut mieux apprendre une formule générale et savoir l'appliquer à ces cas particuliers. Tout n'est pourtant pas gratuit, il faudra par contre calculer des intégrales, mais dans la pratique, souvent très simples.
La formule générale du calcul d'une puissance électrique dans le cas d'un courant et/ou d'une tension périodique est :

$$\boxed{P=\frac{1}{T}\int_0^T u(t).i(t).dt}$$

Cette formule générale se simplifie dans deux cas particuliers importants :

Courant i(t) constant égal à I

$$P=\frac{1}{T}\int_0^T u(t).i(t).dt=\frac{1}{T}\int_0^T u(t).I.dt=I\frac{1}{T}\int_0^T u(t).dt=I.U_{moy}$$

$$\boxed{P=\frac{1}{T}\int_0^T u(t).i(t).dt=I.U_{moy}}$$

Tension u(t) constante égale à U

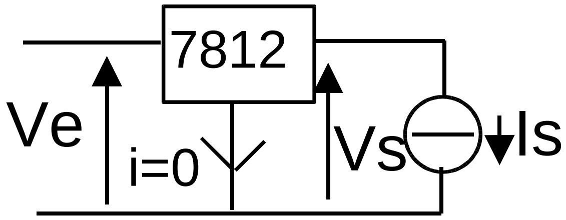
$$P=\frac{1}{T}\int_0^T u(t).i(t).dt=\frac{1}{T}\int_0^T U.i(t).dt=U\frac{1}{T}\int_0^T i(t).dt=U.I_{moy}$$

$$\boxed{P=\frac{1}{T}\int_0^T u(t).i(t).dt=U.I_{moy}}$$

Remarque : N'oubliez pas que parfois le calcul d'une moyenne ne nécessite pas de se lancer tête baissée dans le calcul d'une intégrale mais que des raisonnements simples permettent de la trouver !

Dans tous les autres cas, il sera nécessaire de calculer l'intégrale.

Exercice 1



Un régulateur de tension intégré 7812 est destiné à fournir à sa sortie une tension Vs constante et égale à 12 V. Un récepteur consomme un courant constant Is=0,8A. Par contre, à l'entrée du régulateur se trouve un redresseur double alternance filtré par un condensateur délivrant une tension Ve.
1°) Représenter Ve(t) si on suppose qu'elle varie entre 16 et 20 V.
2°) En assimilant la tension d'entrée à une tension triangulaire, on vous demande de calculer la puissance dissipée dans le régulateur.

Exercice 2

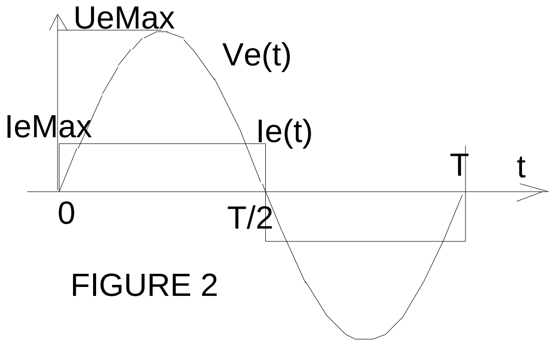


FIGURE 2

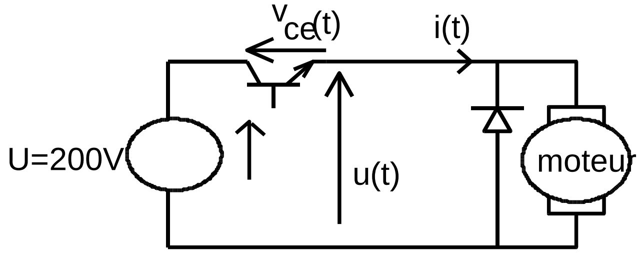
1°) On donne sur la figure 2 l'allure du courant Ie et de la tension Ve aux bornes d'entrées d'un redresseur (f = 50 Hz).
Calculer la puissance électrique moyenne en entrée sur une demi-période :

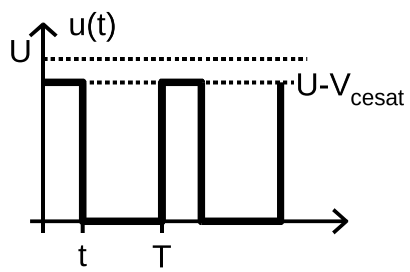
$$P_e = \frac{2}{T}\int_0^{T/2} U_{eMAX}\sin(\omega t).I_{eMAX}.dt$$

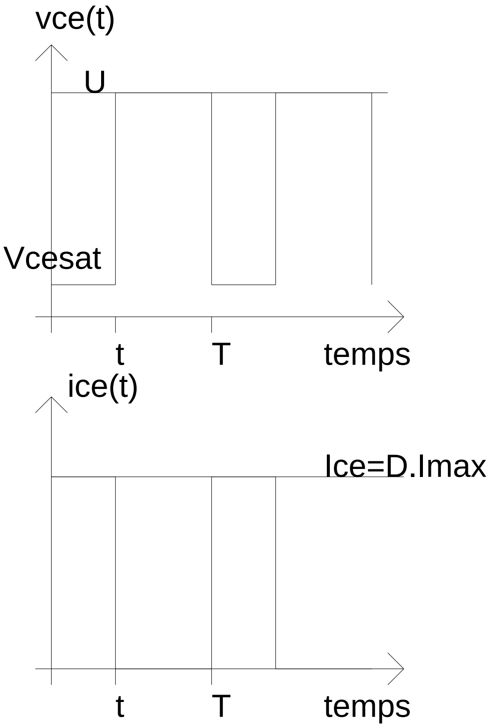
(Sur une demi-période I_e est constant égal à I_{eMAX})= 10A et U_{eMAX} = 120V)
Que vaut P_e sur une période ?
2°) On rappelle que lors d'un redressement double alternance, chaque diode conduit sur une demi-période. Sachant que pendant sa conduction une diode a une tension de 1,1 V et est traversée par le courant I_{eMAX}, quelle est la puissance moyenne maximale dissipée dans chaque diode sur une demi-période, sur une période ?

Exercice 3

Un moteur électrique à courant continu est commandé par un hacheur à transistor dont on désire étudier le comportement thermique en vue de dimensionner un radiateur destiné au transistor. Le schéma de principe est donné ci-dessous :



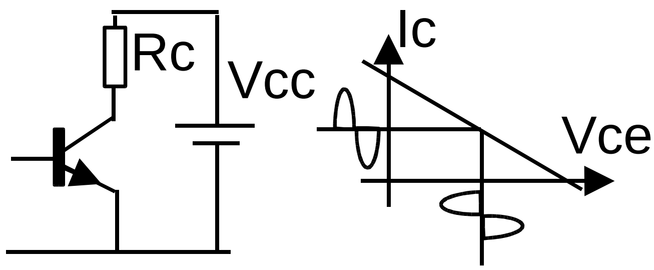




Le principe d'un tel système est de faire varier la vitesse du moteur en faisant varier le rapport cyclique D=t/T. Dans toute la suite du problème T sera fixé à T=1 ms.
1°) Lorsque le rapport cyclique est de D=1, le moteur absorbe un courant constant de I_{max}=10 A et la diode n'est traversée par aucun courant. La tension aux bornes du transistor $v_{ce}(t)$ est constante et a pour valeur : V_{cesat}=1,8V. Quelle est la puissance dissipée dans le transistor et quelle est alors la puissance fournie par la source de tension ?
2°) Le moteur est supposé suffisamment inductif pour que le courant le traversant soit constant. On suppose que la charge du moteur impose que le courant qui traverse le moteur soit proportionnel au rapport cyclique. Pour le courant et la tension ci-contre aux bornes du transistor, calculer la puissance moyenne dissipée dans ce composant et représenter sur une courbe la variation de la puissance instantanée correspondante.

Exercice 4 Puissance dissipée.

Un transistor est polarisé en classe A selon le montage ci-dessous où l'on n'a pas représenté la polarisation de la base.



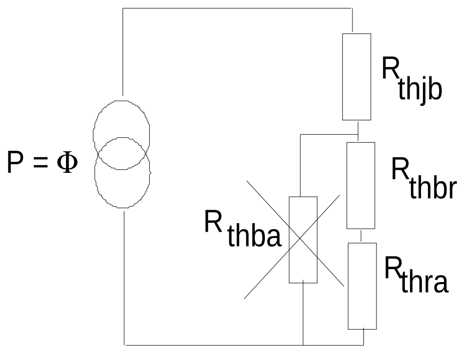
La résistance Rc est de 24 Ω et la tension de polarisation de Vcc=48V.
Le courant I_c est composé d'une partie continue I_C et d'une partie variable i_c ici sinusoïdale : $I_c=I_C+i_c$.
Calculer la puissance dissipée en l'absence de signal sinusoïdal (ic=0).
Calculer la puissance dissipée pour un signal sinusoïdal de sortie maximal (en négligeant V_{CEsat}=0). Comparer.

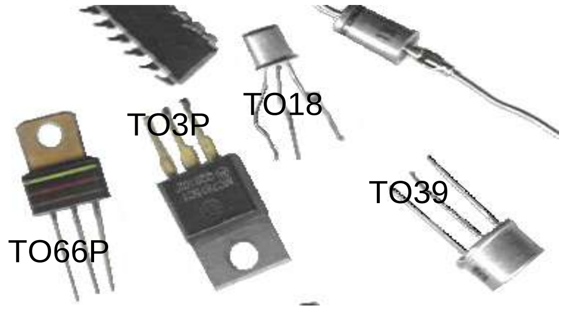
TD4 : calcul des radiateurs thermiques (2 séances)

Les performances des semi-conducteurs, en particulier leur fiabilité, dépendent de leur température; pour éviter tout risque de détérioration par des températures trop élevées, le montage des composants de puissance sur radiateur s'impose. Ces dissipateurs de chaleur augmentent la surface d'échange entre le semi-conducteur et l'air ambiant et permettent ainsi, pour une température de jonction donnée, une puissance à dissiper plus grande.
La conception des circuits électroniques et l'optimisation des composants permettent de réduire la puissance à dissiper, tout en améliorant le rendement électrique du montage, ce n'est pas l'objectif de notre propos.
La disposition des radiateurs, dans un appareil ou à l'extérieur, en position verticale ou horizontale, ainsi que le choix des composants selon le type de boîtier du semi-conducteur doivent être judicieux et contribuent énormément à la fiabilité de l'ensemble.

1°) Calcul des radiateurs en régime permanent

La puissance à dissiper par un semi-conducteur est calculée en faisant le bilan des puissances
électriques P mises en oeuvre. Lorsqu'on passe à la partie thermique elle devient Φ (notation traditionnelle de la thermique). Un composant électronique est modélisé par un certain nombre de résistances thermiques comme indiquées ci-dessous : (j = jonction, b = boîtier (case en anglais mb pour mountingbase), r = radiateur (h=heatsink en anglais), a = ambiant (ambient en anglais))





Pour dimensionner un radiateur, il faut rechercher la chaîne thermique suivie par les lignes de flux de chaleur depuis la jonction, jusqu'à l'air ambiant. C'est celle qui est présentée ci-dessus. Comme on le voit elle est constituée de résistances thermiques en parallèle et on vous montre qu'on néglige systématiquement R_{thba}. En général on néglige quand on a un facteur 10. Certains calculs montreront un facteur bien inférieur à 10 alors pourquoi négliger ? Pour la bonne et simple raison que le fait de mettre un radiateur thermique en contact avec le boîtier diminue la surface de contact entre celui-ci et le milieu ambiant, ce qui a pour conséquence d'augmenter R_{thba}.

Résistances thermiques boîtier TO		
Boîtier	R_{thja}	R_{thjb}
TO-18	500	200
TO-92	250	150
TO-39	200	12,5
TO-126	100	5
TO-220	70	2
T0-3	40	1,5

Techniques de montages et R_{thbr}	
	R_{thbr}
sans plaquette d'isolation sans pâte	0,05 à 0,2
sans plaquette d'isolation avec pâte	0,005 à 0,1
plaquette oxyde Al avec pâte	0,2 à 0,6
plaquette mica avec pâte	0,4 à 0,9
plaquette en silicone sans pâte	0,84 à 0,88

Exercice 1

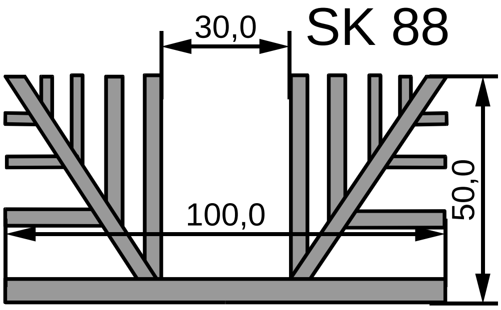
On se replace dans le cas de l'exercice 1 du TD précédent sur le 7812.
Pour des raisons de fiabilité, la température du substrat de silicium du C.I. ne doit pas dépasser 130°C, la température ambiante dans l'appareil est de 40°C.
La résistance thermique de la jonction au boîtier dépend du type de boîtier. Pour le boîtier du type TO-220, la résistance thermique est $Rth_{JB} = 2\ KW^{-1}$.
Entre le boîtier et le radiateur, il faut insérer une rondelle de mica qui assure l'isolation électrique et
un bon contact thermique à l'aide d'une pâte thermoconductrice. Cette rondelle avec la pâte possède une résistance de $1\ KW^{-1}$.
Quelle doit être la résistance thermique du radiateur ?

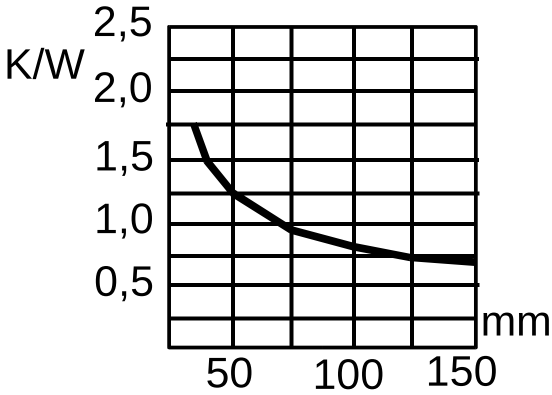
Exercice 2 (Calcul d'un radiateur)

T0-3

Un transistor de puissance à boîtier TO-3 est soumis à une tension émetteur-collecteur de 20V. Le courant d'émetteur est de 3 A. Quelle est la puissance électrique à dissiper ? Quelle sera la température de jonction si l'on ne lui ajoute pas de radiateur et que la température ambiante est Ta=25°C ?
On suppose que la température de jonction Tj peut atteindre 200°C. Quelle est la résistance thermique totale que l'on ne doit pas dépasser ?

Choisir la solution la plus favorable pour fixer le radiateur sur le boîtier avec isolation. Que prendra-t-on donc comme résistance R_{thbr} ? Quelle doit-être la résistance R_{thra} ?
Quelle longueur de radiateur de type SK88 devra-t-on choisir ?





2°) Calcul des radiateurs en régime transitoire

Pour une certaine puissance en régime permanent, la température de jonction est déterminée par la résistance thermique présente entre la jonction et l'air ambiant. Lorsque le flux thermique fourni par la jonction est égal au flux évacué dans l'air, nous obtenons le régime stable qui est stationnaire.

2-1) Présence d'une capacité thermique

Il est facile de remarquer que les résistances thermiques seules n'expliquent pas tous les phénomènes thermiques. En effet aux bornes d'une résistance thermique un échelon de puissance thermique Φ a pour conséquence un échelon de température (car $\Delta T = R_{th}\Phi$). Or on n'a jamais observé un tel échelon de température. Dès qu'il y a variation de température il y a constante de temps.
Le phénomène physique représentant cette constante de temps a déjà été étudié dans le TD n°1 :
$dQ = m.c.dT$
Cette relation introduit en effet : $\Phi = dQ/dt = m.c.(dT/dt)$
Si nous définissons la capacité thermique C_{th} : $C_{th} = m.c$ alors cette relation devient :

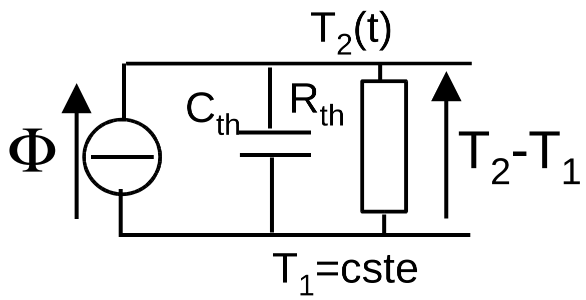
$$\boxed{\Phi = C_{th} \cdot \frac{dT}{dt}} \quad \text{à comparer à} \quad i(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt}$$

qui montre bien pourquoi on parle de <u>capacité</u> thermique.

<u>Parlons des unités</u> : m masse [kg], c chaleur massique [J/kg.K], C_{th} capacité thermique [J/K].
Une capacité associée à une résistance thermique détermine une constante de temps :
$T = R_{th}.C_{th}$ avec R_{th} [°C/W], C_{th} [J/K] et T [s].

Exercice 3

Un composant électronique est modélisé par une résistance thermique R_{th} et une capacité thermique C_{th}. Il est soumis soudainement à un échelon de puissance Φ. Exprimer l'équation différentielle liant Φ, R_{th}, C_{th} et $T_2(t)-T_1$. Quelle est la valeur asymptotique de $T_2(t)$?



Refroidissement : Le composant précédent a atteint la température T_2, nous le laissons se refroidir.
Donner l'équation différentielle et sa solution.Une puissance périodique Φ de période T et de rapport cyclique $\alpha=0,5$ est dissipée dans le composant. On prend $T<<T_{th}=R_{th}.C_{th}$.
Dessiner l'allure de T(t) et établir la valeur de la température moyenne de la jonction.

2-2) Impédance thermique

De même qu'en électricité on définit la notion d'impédance, on va aussi ici définir la notion d'impédance thermique. Elle permet elle aussi d'éviter de résoudre des équations différentielles mais pas pour les cas sinusoïdaux peu intéressant pour la thermique des radiateurs des composants.

La formule de la résistance thermique doit être révisée :

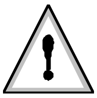
$$\boxed{Z_{th}(t) = r(t,D).R_{th}}$$

où r(t) est une loi établie selon l'allure des impulsions de puissance et du modèle thermique, elle peut être obtenue expérimentalement par le fabricant du composant, comme l'exemple ci-dessous (2N5632).
Pour un rapport cyclique D et une durée t connus ces courbes permettent de calculer l'impédance thermique en appliquant un coefficient correcteur à R_{th}. Elles permettent aussi de connaître la température de crête (la valeur dangereuse) par :

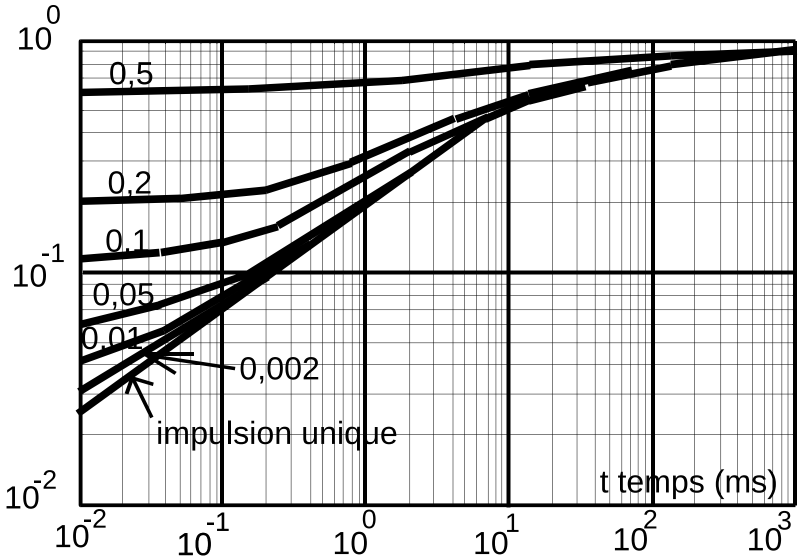
$$\boxed{T2_{crête} = r(t,D).R_{th}.P + T_1}$$

La température moyenne est :

$$\boxed{T2_{moy} = R_{th}.P.D + T_1}$$



Remarque : l'impédance thermique peut être donnée avec le coefficient r(D,t) comme ci-dessous mais aussi directement comme un peu plus loin !
On note la puissance de manière un peu plus classique P au lieu de Φ.



Zth=r(t).Rth

courbes r(t)
en fonction du
rapport cyclique
D =t/T
t: durée de dissipation
T: période

Transistor 2N5632

Exercice 4 (Température de jonction en impulsion)

Une impulsion de puissance de 50 W est envoyée sur un transistor 2N 5632. Sa durée est t=5ms, le boîtier est à 75°C, la résistance thermique Rth_{jb} est de 1,17°C/W.
Quelle est la température maximum atteinte ?
Maintenant les impulsions de puissance sont périodiques (T= 20ms).
Quelle est alors la température de crête pour un rapport cyclique D=0,5 ?
Quelle est alors la température moyenne de la jonction ?

Pour des impulsions périodiques brèves le boîtier (comme le radiateur s'il y en a un) n'est sensible qu'à la puissance moyenne du fait de sa forte inertie thermique (sa grande constante de temps thermique). La jonction atteint une température donnée par :

$$T_{j\ crête} = P.(r(t,D).Rth_{jb} + D.Rth_{ba}) + T_a$$

Exercice 5

Un transistor Darlington BDX 63 travaille en impulsion de puissance de durée t=1 ms et de périodicité T= 10ms, avec $T_{j\ max}$= 200°C, T_{amb}=75°C.

Dans un premier temps, il n'est pas fixé sur radiateur (R_{thba} = 26°C/W), déterminer sa puissance maximum admissible.
Nous le fixons sur un radiateur de R_{thba} = 1.5°C/W, même question.

Document réalisé avec OpenOffice 1.1 sous LINUX

Transistor de puissance darlington NPN

RTC

BDX63 – BDX 63A
BDX 63B – BDX63C

Caractéristiques principales

Puissance maximale T_{mb}<25°C 90W

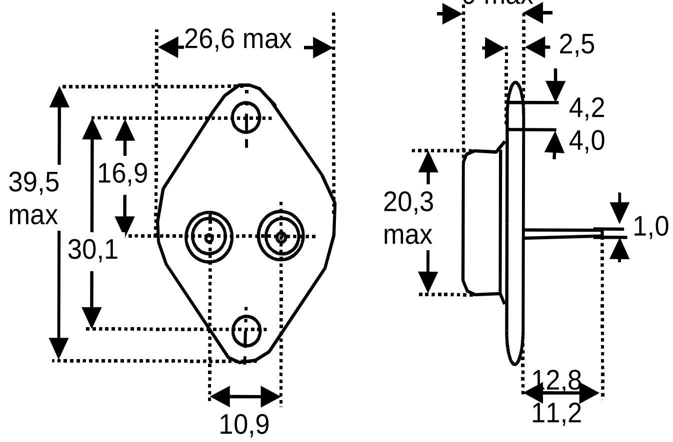
Température de jonction T_j 200°C

Courant collecteur en continu I_C 8A

Courant collecteur en pointe max 12 A

Données mécaniques boîtier TO-3

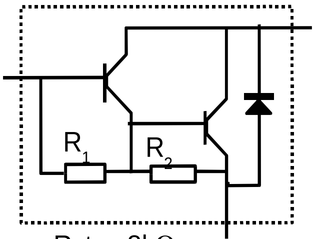
Dimensions en mm



Résistance thermique

Jonction-fond de boîtier

$R_{th\ j\text{-}mb}$ =1,94 K/W



R_1 typ 8kΩ

R_2 typ 100Ω