

**TOUT EN  
FICHES**

**L'ESSENTIEL D'**

**ÉLECTROTECHNIQUE**

**BTS, SCIENCES APPLIQUÉES**



**TOUT EN  
FICHES**

**Dominique Bareille**

Professeure agrégée de  
physique appliquée en STS  
électrotechnique (Pau)

**Laurent Mossion**

Professeur agrégé de  
physique appliquée en STS  
électrotechnique (Périgueux)

**L'ESSENTIEL D'**

**ÉLECTROTECHNIQUE**

**BTS, SCIENCES APPLIQUÉES**

**DUNOD**

## NOUS NOUS ENGAGEONS EN FAVEUR DE L'ENVIRONNEMENT :



Nos livres sont imprimés sur des papiers certifiés pour réduire notre impact sur l'environnement.



Le format de nos ouvrages est pensé afin d'optimiser l'utilisation du papier.



Depuis plus de 30 ans, nous imprimons 70 % de nos livres en France et 25 % en Europe et nous mettons tout en œuvre pour augmenter cet engagement auprès des imprimeurs français.



Nous limitons l'utilisation du plastique sur nos ouvrages (film sur les couvertures et les livres).

# Table des matières

	Préface	VII
	<b>Énergie</b>	
<b>Fiche 1</b>	Formes d'énergie	1
<b>Fiche 2</b>	Énergie thermique	7
<b>Fiche 3</b>	Énergie et rayonnement	13
<b>Fiche 4</b>	Énergie et chimie	22
<b>Fiche 5</b>	Puissances	29
	<b>Les lois de la mécanique</b>	
<b>Fiche 6</b>	Mécanique du solide	33
<b>Fiche 7</b>	Mécanique des fluides	42
	<b>Les lois de l'électricité</b>	
<b>Fiche 8</b>	Les lois de l'électricité	50
<b>Fiche 9</b>	Circuit en régime périodique	57
<b>Fiche 10</b>	Circuit en régime sinusoïdal	64
	<b>Énergie électrique</b>	
<b>Fiche 11</b>	Puissance électrique	73
<b>Fiche 12</b>	Qualité de l'énergie électrique	80
	<b>Magnétisme</b>	
<b>Fiche 13</b>	Éléments de magnétisme	88

## Transformateurs

<b>Fiche 14</b>	Transformateur monophasé	95
<b>Fiche 15</b>	Transformateur triphasé	102

## Convertisseurs électromécaniques

<b>Fiche 16</b>	Principe de fonctionnement des machines tournantes	110
<b>Fiche 17</b>	Chaîne motorisée	115
<b>Fiche 18</b>	La machine à courant continu à excitation constante	122
<b>Fiche 19</b>	La machine asynchrone	131
<b>Fiche 20</b>	La machine synchrone	143

## Modulation de l'énergie électrique

<b>Fiche 21</b>	Convertisseurs statiques	150
<b>Fiche 22</b>	Hacheur	160
<b>Fiche 23</b>	Redresseur	165
<b>Fiche 24</b>	Onduleur	175
<b>Fiche 25</b>	Gradateur	184

## Comportement dynamique des systèmes linéaires

<b>Fiche 26</b>	Comportement dynamique des systèmes linéaires	191
-----------------	---	-----

## Maîtrise des procédés

<b>Fiche 27</b>	Régulation – asservissement	200
<b>Fiche 28</b>	Régulation : performances – correction	208

Les métiers de l'électrotechnique connaissent une évolution très importante, la chaîne d'information et la chaîne d'énergie se rapprochent et parfois fusionnent quand la chaîne d'énergie devient support des courants porteurs et vecteur de communication. Les systèmes communiquent, dialoguent, s'adaptent à l'environnement. Dans ce contexte évolutif, les métiers de l'électrotechnique et la formation des techniciens en électrotechnique connaissent également des évolutions significatives. C'est dans cet esprit et ce besoin d'enseigner « autrement » que les Éditions Dunod ont imaginé la collection Tout en fiches – L'essentiel. Il faut remercier Dominique Bareille et Laurent Mossion pour avoir tenté de résumer en 28 fiches les grands thèmes de l'électrotechnique moderne.

Cet ouvrage résume sous forme de fiches totalement indépendantes les principales notions, fondamentales de la discipline et indispensables pour appréhender les systèmes modernes. L'originalité de ce document réside dans la rédaction de chaque fiche qui aborde les différents thèmes en respectant l'histoire et l'évolution technologique. En effet, les moteurs électriques sont abordés, dans un premier temps, de manière traditionnelle ce qui permet de faire le lien avec les cours classiques, mais rapidement les notions modernes liées à la vitesse variable, qui sont maintenant usuelles pour les techniciens, sont abordées de manière synthétique. Les phénomènes fondamentaux en électromagnétisme sont également développés avec les mêmes soucis de précision et de concision des fiches.

Il faut féliciter les auteurs pour la faculté de synthèse dont ils ont fait preuve tout au long des 28 fiches. Il est en effet tentant, pour des professeurs passionnés, de transmettre des savoirs sans limitation mais il est beaucoup plus difficile d'extraire les savoirs essentiels et de se limiter pour « rentrer » le maximum d'informations dans un petit format de 224 pages. La rédaction était d'autant plus difficile que les auteurs n'ont pas voulu sacrifier la démarche pédagogique à la synthèse. Chaque fiche comporte des exemples d'applications industrielles, des descriptions de systèmes et des exercices qui garantissent une assimilation rapide et une compréhension des phénomènes permettant au lecteur un approfondissement plus aisé et une recherche plus efficace lorsque le besoin se fait sentir. On retrouve dans cet ouvrage la longue expérience acquise par les auteurs et leur passion commune pour cette discipline qui les anime depuis de nombreuses années.

Les lecteurs apprécieront ce concept moderne et trouveront très rapidement réponse aux questions qu'ils se posent.

Claude Bergmann  
Professeur des universités  
Inspecteur Général de l'Éducation nationale



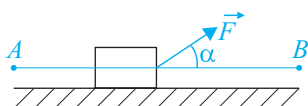
## 1. Travail d'une force

Une force effectue un travail lorsqu'elle provoque le déplacement d'un corps. Le travail est une grandeur algébrique, il peut être positif lorsqu'il contribue au mouvement (moteur) ou négatif lorsqu'il s'y oppose (résistant).

### Force constante

Le travail  $W_{A \rightarrow B}(\vec{F})$  effectué par une force constante  $\vec{F}$  au cours d'un déplacement  $\overline{AB}$  de son point d'application est le produit scalaire  $\vec{F} \cdot \overline{AB}$ .

$$W_{A \rightarrow B} = \vec{F} \cdot \overline{AB} = F \cdot AB \cdot \cos \alpha$$

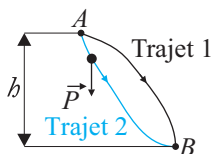


$W$  en joules (J).  
 $F$  en newtons (N).  
 $AB$  en mètres (m).

Le travail d'une force constante est indépendant du trajet suivi. Il ne dépend que de la position initiale et de la position finale du point d'application de la force.

### EXEMPLE. TRAVAIL DE LA FORCE DE PESANTEUR

$$W_{A \rightarrow B}(\vec{P}) = m \cdot g \cdot h$$



$g$  représente l'intensité du champ de la pesanteur en newtons par kilogramme ( $\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $m$  la masse du solide en kilogrammes (kg) et  $h$  la dénivellation en mètres (m).

Le travail du poids  $\vec{P} = m \cdot \vec{g}$  est le même quel que soit le trajet suivi.

### Cas d'une force quelconque

Le travail élémentaire  $dW(\vec{F})$  d'une force  $\vec{F}$  pour un déplacement infiniment petit  $d\vec{l}$  de son point d'application est le produit scalaire :

$$dW(\vec{F}) = \vec{F} \cdot d\vec{l}$$

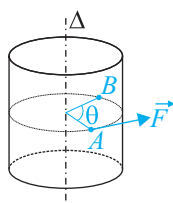
Le travail effectué par la force  $\vec{F}$  lors du parcours  $AB$  s'obtient en faisant la somme des travaux élémentaires. Nous le notons de la façon suivante :

$$W_{A \rightarrow B}(\vec{F}) = \sum_{A \rightarrow B} dW(\vec{F}) = \sum_{A \rightarrow B} \vec{F} \cdot d\vec{l}$$

### Travail d'une force appliquée à un solide en rotation

On considère un solide mobile autour d'un axe  $\Delta$ . On lui applique une force  $\vec{F}$  dont le moment par rapport à l'axe  $\Delta$  est constant.

Le travail de la force  $\vec{F}$  de moment constant  $T$ , au cours d'une rotation d'angle  $\theta$  autour de l'axe fixe  $\Delta$  est donné par :



$$W(T) = T\theta$$

$W$  en joules (J).

$T$  en newtons mètres (N.m).

$\theta$  en radians (rad).

On peut étendre cette définition au travail d'un couple de forces.

## 2. Énergie

On appelle énergie tout ce qui peut se transformer en travail ou en une autre forme d'énergie.

### Loi de conservation de l'énergie

La nature obéit à une loi de **conservation** qui affirme que, dans un système isolé, il existe une quantité, **l'énergie**, qui ne change pas lors de ses multiples modifications.

**L'énergie totale d'un système isolé reste constante.**

### Unités

L'énergie se note  $E$  et s'exprime en joules (J).

1 J = 1 newton  $\times$  1 mètre = 1 volt  $\times$  1 ampère  $\times$  1 seconde = 1 W  $\times$  1 seconde.

Électricité : 1 kW = 1 000 W et 1 h = 3 600 s  $\rightarrow$  1 kWh = 3 600 000 J.

4,18 J sont nécessaires pour accroître de 1 °C la température d'un gramme d'eau.

Carburants : TEP = tonne équivalent pétrole, 1 TEP = 11 600 kWh.

### 3. Énergie cinétique

#### ■ Définition

C'est l'énergie que possède un corps du fait de sa masse et de son mouvement de translation ou de rotation (dans un référentiel donné).

Cette énergie n'est pas stockable à long terme. Elle est qualifiée **d'énergie de flux**.

#### ■ Cas d'un mouvement de translation

Un corps de masse  $m$  (kg), animé d'un mouvement de translation à la vitesse

$v$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) possède une énergie cinétique  $E_c$  (J) : 
$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

#### ■ Cas d'un mouvement de rotation

Un corps de moment d'inertie  $J$  en ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ), animé d'un mouvement de rotation à la vitesse de rotation angulaire  $\Omega$  ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ), possède une énergie cinétique  $E_c$  (J) :

$$E_c = \frac{1}{2} J \cdot \Omega^2$$

### 4. Énergie potentielle

#### ■ Définition

L'énergie potentielle d'un corps ou d'un système peut être considérée comme une énergie emmagasinée. Elle est liée à une interaction. Elle peut se transformer en énergie cinétique. Cette énergie est stockable à long terme. Elle est qualifiée **d'énergie de stock**.

#### ■ Énergie potentielle de pesanteur

Un corps de masse  $m$ , situé à une altitude  $h$ , présente une énergie potentielle :

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$
  $E_p$  en joules (J) et  $h$  en mètres (m).  $g$  intensité du champ de la pesanteur (valeur voisine de  $9,81 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$  à la surface de la Terre).

### 5. Énergie mécanique

**L'énergie mécanique d'un corps est la somme de son énergie cinétique et de son énergie potentielle.**

En l'absence de frottement ou de force motrice, l'énergie mécanique reste constante. En présence de frottements, l'énergie mécanique diminue au cours du temps. L'énergie perdue est transférée au milieu extérieur sous forme de chaleur.

## 6. Énergie interne

### ■ Définition

L'énergie interne représente la somme des énergies cinétiques des particules en mouvement qui constituent un corps à une température donnée. C'est également la somme des énergies potentielles entre les particules qui constituent ce corps. Cette énergie est souvent notée  $U$ .

### ■ Température

Les atomes, les molécules et les ions constituant la matière ne sont pas immobiles mais en agitation perpétuelle.

Sur le plan microscopique, l'agitation des particules appelée agitation thermique est liée à la température de ce corps.

Sur le plan macroscopique, la température caractérise la sensation de chaud et de froid.

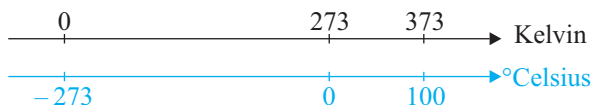
#### Échelle de températures

Quand on chauffe un corps, sa température augmente. Quand il refroidit, l'agitation de ses particules diminue et sa température également.

La température dit du « zéro absolu » correspond à un corps présentant des particules immobiles.

L'échelle des kelvins fait correspondre 0 K au zéro absolu. Cette échelle ne présente pas de température négative.

L'échelle des degrés Celsius fait correspondre la température de fusion de la glace à 0 °C et la température de vaporisation de l'eau sous pression normale à 100 °C.



Soit une température notée  $T$  en kelvins et  $\theta$  en degrés Celsius.

$$T(\text{K}) = \theta(^{\circ}\text{C}) + 273 \text{ ou } \theta(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273$$

### ■ Variation de l'énergie interne d'un corps

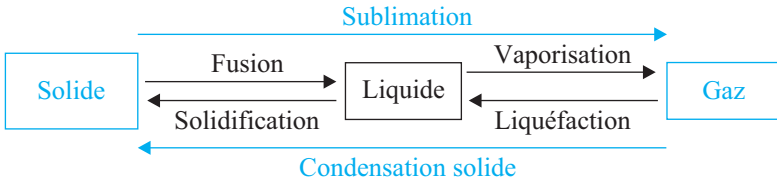
Lorsque la température d'un corps solide ou liquide varie d'une valeur initiale  $\theta_i$  à une valeur finale  $\theta_f$ , la quantité de chaleur  $Q$  (ou énergie thermique) transférée égale à la variation d'énergie interne  $\Delta U$  s'écrit :

$$\boxed{Q = \Delta U = m.C.\Delta\theta} \text{ avec en } \Delta\theta = \theta_f - \theta_{in} \text{ en } (^{\circ}\text{C}).$$

- $Q$  : énergie thermique transférée en J.
- $m$  : masse du corps en kg.
- $c$  : capacité thermique massique du corps en  $\text{J.kg}^{-1}.\text{C}^{-1}$ .

### Variation de l'énergie interne lors d'un changement d'état à pression constante

Le changement d'état d'un corps met en jeu de l'énergie thermique, il modifie donc son énergie interne.



L'énergie peut être reçue (réaction endothermique) ou fournie (réaction exothermique) par les corps lors du changement d'état. Elle dépend de la nature du corps considéré.

$Q$  : énergie thermique mise en jeu en joules (J).

$$Q = \Delta U = m.L$$

$L$  : énergie massique (enthalpie) de changement d'état en joules par kilogramme ( $\text{J/kg}$ ).

$m$  : masse du corps en kilogrammes (kg).

### EXERCICE Jet d'eau (d'après sujet BTS)

On veut déterminer la hauteur d'un jet d'eau.

Masse volumique de l'eau  $\rho = 1\,000 \text{ kg.m}^{-3}$

Accélération de la pesanteur  $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ .

On appelle  $\vec{v}_A$  la vitesse d'une petite masse  $m$  d'eau à la sortie de la conduite du jet d'eau.

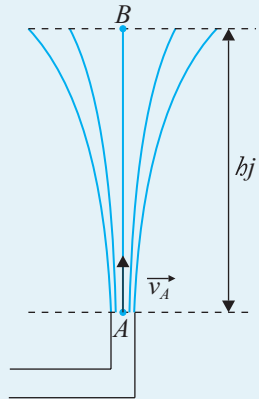
Le point  $B$  est la position moyenne pour laquelle la vitesse est nulle.

Le point  $A$  est pris comme référence :  $h_A = 0$ .

On note  $h_j$  la hauteur moyenne du jet.

1. Donner l'expression de l'énergie cinétique, notée  $E_{cA}$ , de la petite masse  $m$  d'eau en  $A$ .

2. Donner la valeur de l'énergie cinétique, notée  $E_{cB}$ , de la petite masse  $m$  d'eau en  $B$ .



- Donner la valeur de l'énergie potentielle, notée  $E_{pA}$ , de la petite masse  $m$  d'eau en  $A$ .
- Donner l'expression de l'énergie potentielle, notée  $E_{pB}$ , de la petite masse  $m$  d'eau en  $B$ .
- En exploitant le principe de conservation de l'énergie mécanique, trouver la relation existante entre la vitesse  $v_A$  et la hauteur du jet  $h_J$ . Calculer la valeur de  $h_J$  lorsque  $v_A = 17,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .
- Quel phénomène a-t-on négligé ? Comment sera la hauteur du jet réel par rapport à la valeur calculée ?

### Solution

- Au point  $A$  :  $E_{cA} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_A^2$ .
- Au point  $B$  :  $E_{cB} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_B^2 = 0$  car la vitesse  $v_B$  de la goutte d'eau en ce point est nulle.
- Au point  $A$  :  $E_{pA} = m \cdot g \cdot h_A = 0$  la hauteur  $h_A$  est nulle car elle est prise comme référence.
- Au point  $B$  :  $E_{pB} = m \cdot g \cdot h_B = m \cdot g \cdot h_J$ .
- Conservation énergie mécanique :

$$E_{mA} = E_{cA} + E_{pA} = E_{mB} = E_{cB} + E_{pB}$$

$$E_{cA} = E_{pB} \Rightarrow \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_A^2 = m \cdot g \cdot h_J$$

$$h_J = \frac{\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_A^2}{m \cdot g} = \frac{v_A^2}{2 \cdot g} = \frac{17,4^2}{2 \cdot 9,81} = 15,4 \text{ m}$$

- Nous avons négligé les frottements avec l'air. La hauteur du jet réel sera inférieure à la valeur calculée.

L'énergie totale d'un système isolé reste constante.  
Le transfert d'énergie ne peut se faire que sous forme de travail et de chaleur.

## 1. Définitions

### ■ Chaleur

Le transfert d'énergie est appelé **chaleur** et s'exprime en joules (J).

On utilisera également le terme **d'énergie thermique**.

Par convention, la chaleur  $Q$  est comptée positive si le corps considéré reçoit de la chaleur de l'extérieur, et négative dans le cas contraire.

Cette convention est comparable à la convention récepteur utilisée en électricité.

### ■ Flux thermique

Le flux thermique représente la quantité d'énergie thermique qui traverse une surface isotherme par unité de temps.

$$\Phi_{th} = \frac{dQ}{dt}$$

C'est donc une **puissance thermique** qui s'exprime en watts (W). Elle correspond à un « débit de chaleur ».

La densité de flux thermique représente le flux thermique par unité de surface ( $W.m^{-2}$ ).

$$\varphi = \frac{d\Phi_{th}}{dS}$$

## 2. Transferts thermiques

### ■ Conduction

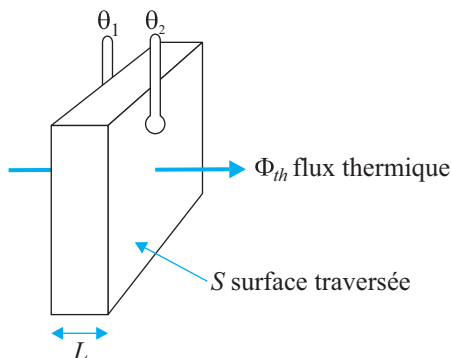
Le transfert par conduction est un échange d'énergie thermique par contact. Il se fait par la transmission de l'agitation thermique des particules, atomes ou molécules d'une zone à température plus élevée vers les particules, atomes ou molécules d'une zone à température moins élevée.

Les matériaux sont plus ou moins bons conducteurs de la chaleur : cette capacité à conduire la chaleur est quantifiée par la conductivité thermique  $\lambda$  ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ ).

Quelques exemples

Matériau	Cuivre	Aluminium	Eau	Huile	Amiante
$\lambda (W.m^{-1}.K^{-1})$	386	204	0,6	0,16	0,157

Considérons un conducteur thermique de section  $S$ , de largeur  $L$  parcouru par un flux thermique  $\Phi_{th}$ .



Les échanges par conduction suivent la loi de Fourier :

$$\Delta\theta = R_{th} \cdot \Phi_{th}$$

$R_{th}$  représente la résistance thermique en  $^{\circ}C.W^{-1}$ ,

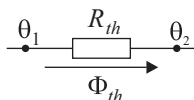
$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$  la différence de température entre les deux extrémités du conducteur considéré est exprimée en  $^{\circ}C$

$\Phi_{th}$  le flux thermique est exprimé en  $W$ .

**REMARQUE :**

Si l'écoulement de chaleur est unidirectionnel et le transfert thermique limité à la

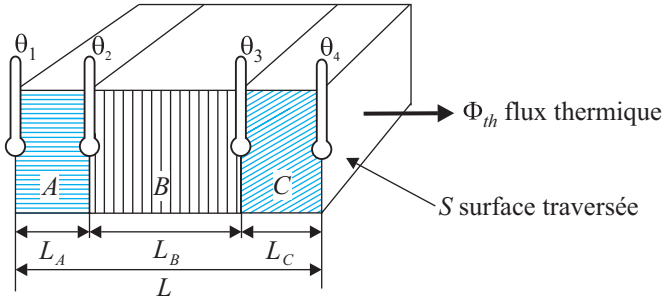
conduction :  $R_{th} = \frac{L}{\lambda \cdot S}$ .



On peut faire l'analogie entre la résistance thermique  $R_{th}$  et la résistance électrique  $R$ , les températures  $\theta$  et les potentiels électriques  $u$ , le flux thermique  $\Phi_{th}$  et le courant électrique  $i$ .



**Association de plusieurs matériaux :** on positionne côte à côte plusieurs matériaux comme lorsque l'on rajoute des isolants dans le bâtiment.



$$\theta_1 - \theta_4 = \left( \frac{L_A}{\lambda_A \cdot S} + \frac{L_B}{\lambda_B \cdot S} + \frac{L_C}{\lambda_C \cdot S} \right) = (R_{thA} + R_{thB} + R_{thC}) \cdot \Phi_{th}$$

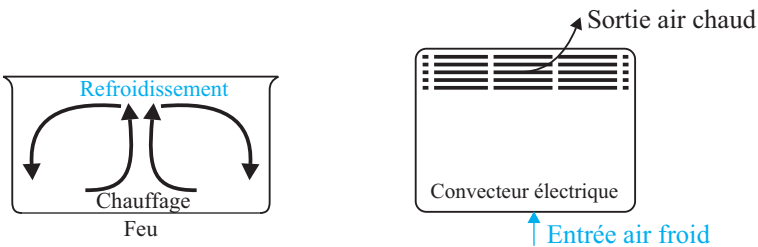
Les résistances thermiques des différentes parties s'additionnent et permettent de réduire les pertes thermiques.

## Convection

C'est le transfert de chaleur qui s'accompagne de mouvements de molécules dans un fluide (liquide ou gaz).

On distingue la convection naturelle et la convection forcée.

**Convection naturelle :** un fluide au contact d'une source chaude se réchauffe. La densité de ce fluide devient inférieure à celle du fluide environnant. Le principe de la poussée d'Archimède entraîne le fluide dans un mouvement ascensionnel. Il chasse le fluide environnant de la partie haute qui redescend. On peut observer ce double mouvement ascendant et descendant sur l'eau que l'on fait chauffer dans une casserole. Ce mode de transfert est utilisé dans le chauffage des habitations avec des convecteurs électriques.



**Convection forcée :** la circulation du fluide est provoquée par un système de ventilation ou de pompage.

## Rayonnement

Le transfert se fait par rayonnement électromagnétique.

Il peut être réalisé dans le vide.

Tout corps à la température  $T$  émet de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique dont le spectre de fréquence dépend de la valeur de  $T$ . Seule la partie du spectre située dans les infrarouges est transformée en chaleur.

Plus la température du corps émetteur est élevée, plus les fréquences émises le seront.

La loi de Stefan-Boltzmann quantifie ces échanges. L'énergie rayonnée par un corps de surface  $S$  à la température  $T$  s'écrit :

$$E = \varepsilon \cdot S \cdot \sigma \cdot T^4$$

$\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ , constante de Stefan-Boltzmann.

$\varepsilon$  : coefficient qui vaut 1 pour un matériau noir et qui est compris entre 0 et 1 selon l'état de surface du matériau.

**Corps noir** : c'est un corps récepteur qui absorbe tous les rayonnements électromagnétiques.

### Applications

- chauffage localisé et mise hors gel de postes de travail, comptoirs de vente ;
- chauffage de terrasses, patios, vestiaires ;
- préchauffage et séchage de carrosserie, plâtre, peinture, etc. ;
- couvoirs.

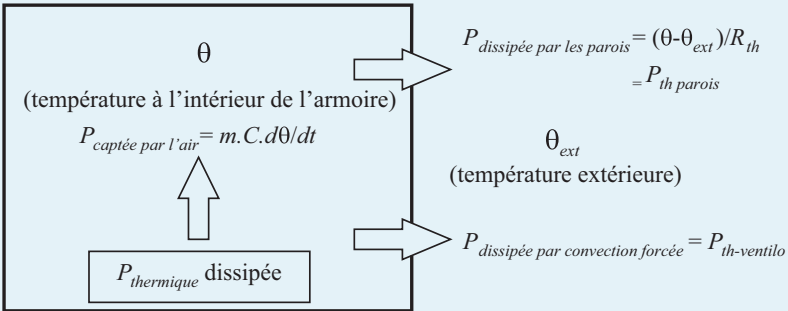
## EXERCICE Ventilation armoire électrique (d'après sujet BTS)

La puissance thermique dissipée par la totalité des composants d'une armoire électrique est de 710 W. On étudie les conditions d'échauffement de l'armoire pour dimensionner le ventilateur d'extraction d'air.

L'armoire de dimension  $1\,000 \times 1\,200 \times 470$  (en mm) présente un coefficient de transmission thermique global  $K_G = 4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ .

On prendra  $C = 1\,000 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  pour la capacité thermique de l'air et  $\rho = 1,15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  pour sa masse volumique. On impose une température maximale dans l'armoire de  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Le volume d'air dans l'armoire sera pris égal à  $0,42 \text{ m}^3$ . La température extérieure vaut  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ .

On utilisera le modèle thermique suivant :



1. Montrer que la résistance thermique  $R_{th} = \frac{1}{K_G \cdot S}$  de l'armoire vaut 0,056 unité SI. Préciser l'unité de la résistance thermique.
2. Calculer la température atteinte en régime permanent (lorsque la température interne ne varie plus) dans l'hypothèse où il n'y aurait pas de ventilation. Conclusion ?
3. Montrer qu'il faut évacuer une puissance  $P_{th-ventilo} = 406$  W par convection forcée pour respecter la température maximale imposée.
4. En utilisant la relation  $P_{th-ventilo} = m.C.\frac{d\theta}{dt}$ , calculer la masse d'air à extraire chaque seconde (on considère que l'air est injecté à 18 °C et rejeté à 35 °C).
5. Déterminer en  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  le débit  $q$  du ventilateur d'extraction.

## Solution

1. On commence par déterminer la surface totale de l'armoire, c'est-à-dire la somme des surfaces des faces avant et arrière, des deux faces latérales et des faces du haut et du fond.

$$S = 2(L.H + H.P + L.P) = 2(1,12 + 1,2 \cdot 0,47 + 1,0,47) = 4,47 \text{ m}^2$$

$$R_{th} = \frac{1}{K_G \cdot S} = \frac{1}{4,4,47} = 0,056 \text{ unité SI } R_{th} \text{ s'exprime en } ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}.$$

2.  $P_{thermique\ dissipée} = P_{captée\ par\ l'air} + P_{th-parois}$   $710 = m.C.\frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta - \theta_{ext}}{R_{th}}$  avec  $m.C.\frac{d\theta}{dt} = 0$  quand on travaille à l'équilibre thermique.

$$\Rightarrow 710 = \frac{\theta - \theta_{ext}}{R_{th}} \Rightarrow \theta = 710 \cdot R_{th} + \theta_{ext} = 710 \cdot 0,056 + 18 = 57,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Cette valeur est supérieure à la limite imposée de 35 °C max.

3. On écrit l'équilibre des puissances thermiques de l'armoire électrique :  $P_{thermique\ dissipée} = P_{captée\ par\ l'air} + P_{th-parois} + P_{th-ventilo}$

$$710 = m.C.\frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta - \theta_{ext}}{R_{th}} + P_{th-ventilo}$$

$m \cdot C \cdot \frac{d\theta}{dt} = 0$  quand on travaille à l'équilibre thermique.

$$\Rightarrow 710 = \frac{\theta - \theta_{ext}}{R_{th}} + P_{th-ventilo}$$

$$\Rightarrow P_{th-ventilo} = 710 - \frac{\theta - \theta_{ext}}{R_{th}} = 710 - \frac{35 - 18}{0,056} = 406 \text{ W.}$$

4. La masse d'air à extraire chaque seconde est de 0,0239 kg.

$$P_{th-ventilo} = m \cdot C \cdot \frac{d\theta}{dt} \Rightarrow m = \frac{P_{th-ventilo}}{C \cdot (\theta - \theta_{ext})} = \frac{406}{1000 \cdot (35 - 18)} = 0,0239 \text{ kg}$$

5. On commence par calculer le volume équivalent à une masse d'air de

$$0,0239 \text{ kg} : \rho = \frac{m}{V} \Rightarrow V = \frac{m}{\rho} = \frac{0,0239}{1,15} = 0,0208 \text{ m}^3. \text{ On en déduit le débit :}$$

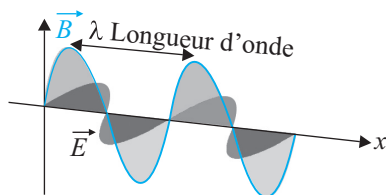
$$q = \frac{V}{t} = 0,0208 \text{ m}^3 / \text{s} = 0,0208 \cdot 3600 = 74,8 \text{ m}^3 / \text{h.}$$

## 1. Rayonnement

### ■ Modélisation du rayonnement

Un rayonnement peut être défini par un modèle ondulatoire ou par un modèle corpusculaire.

Le modèle ondulatoire est celui d'une onde électromagnétique qui correspond à la propagation d'un champ électrique couplé à un champ magnétique.



Le modèle corpusculaire est celui de la propagation d'un photon.

### ■ Structure d'une onde électromagnétique

Le déplacement d'une onde électromagnétique dans un milieu homogène est rectiligne et s'effectue à une vitesse de propagation notée  $c$ .

Dans le vide  $c = 299\,792\,458\text{ m/s} \approx 300\,000\text{ km/s}$ .

Dans un milieu différent du vide, cette vitesse devient  $c_v = \frac{c}{n_v}$  ou  $n_v$  représente

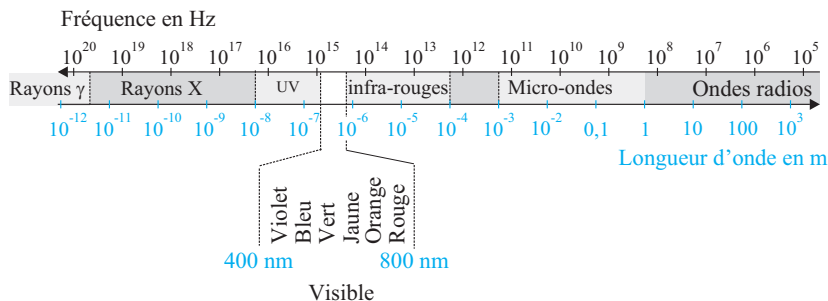
l'indice de réfraction de la lumière monochromatique de fréquence  $\nu$  dans le milieu considéré.

Une onde électromagnétique est caractérisée par une fréquence  $\nu$  et une longueur d'onde  $\lambda$ .

$$\lambda = \frac{c_v}{\nu} \quad \nu \text{ s'exprime en Hz et } \lambda \text{ en m.}$$

### ■ Domaine des ondes électromagnétiques

La **lumière visible** est une petite partie du large **spectre électromagnétique** (de 390 à 790 nm).



### EXEMPLES. FRÉQUENCES D'ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES



### Énergie d'un photon

On appelle quanta les paquets d'énergie émis ou reçus par la matière lorsqu'elle interagit avec une onde électromagnétique. Le photon désigne les particules porteuses de la lumière et de l'énergie associée.

**Énergie d'un photon :  $E = h \cdot \nu$**

$E$  énergie en joules (J).

$h$  constante de Planck  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  en joules secondes (J.s).

$\nu$  fréquence en hertz (Hz).

## 2. Éclairage et sources lumineuses

### Spectre d'émission

Le spectre d'émission représente l'ensemble des radiations émises par une source.

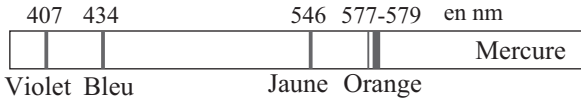
#### *Spectre d'émission continu d'origine thermique*

Un corps à haute température (solide, liquide ou gaz sous haute pression) émet une lumière dont le spectre est continu. La largeur du spectre dépend de la température du corps.

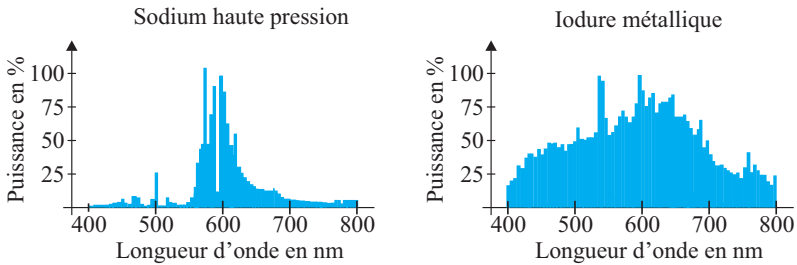
### Spectre de raies d'émission

Un gaz à haute température sous basse pression émet de la lumière dont le spectre est composé de raies d'émission. À chaque raie, correspond une radiation monochromatique de longueur d'onde bien définie.

#### EXEMPLE. SPECTRE DU MERCURE



#### EXEMPLE. SPECTRES DE LAMPES À HAUTE PRESSION (D'APRÈS DOCUMENTATION OSRAM)



## 3. Photométrie

### Flux lumineux

Le flux lumineux  $\Phi$  représente l'énergie de chaque bande de longueur d'onde du spectre émis par une source interprétée par l'œil ou un récepteur physique ayant la même sensibilité.

**Le flux lumineux  $\Phi$  s'exprime en lumens (lm).**

On caractérise une source par son **efficacité lumineuse**. Elle correspond au rapport du flux lumineux émis par la puissance électrique consommée :

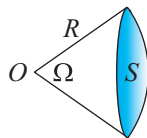
$$K = \frac{\Phi}{P} \text{ exprimée en lm/W.}$$

Ordre de grandeurs :

- lampe à incandescence  $K = 12$  à  $27$  lm/W ;
- tube fluorescent  $K = 60$  à  $110$  lm/W ;
- LED  $K = 80$  à  $200$  lm/W.

### ■ Angle solide

On considère un cône de sommet  $O$  placé au centre d'une sphère de rayon  $R$ . On désigne par  $S$  la surface découpée par le cône sur la sphère.



L'angle solide  $\Omega$  est donné par la relation :  $\Omega = \frac{S}{R^2}$ , l'unité choisie est le stéradian (sr).

L'angle solide d'une sphère entière vaut  $4 \cdot \pi$  stéradians et celui d'une demi-sphère  $2 \cdot \pi$  stéradians.

### ■ Intensité lumineuse

L'intensité lumineuse  $I$  correspond à un flux énergétique  $\Phi$  par stéradian :  $I = \frac{\Phi}{\Omega}$ .  
L'unité d'intensité lumineuse est le candela (cd).

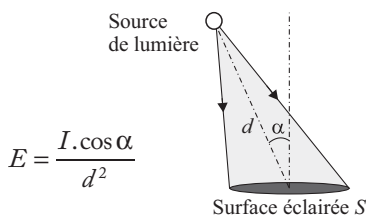
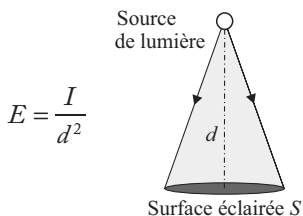
### ■ Éclairement

L'éclairement en un point du plan à éclairer, est le quotient du flux lumineux émis par la surface éclairée :  $E = \frac{\Phi}{S}$ .

Il se mesure à l'aide d'un luxmètre.

L'unité d'éclairement est le lux (lx) :  $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$ .

L'éclairement dépend de l'orientation de la source.



Exemples de valeurs :

- plein soleil jusqu'à 100 000 lux ;
- près d'une fenêtre par temps couvert de 1 000 à 3 000 lux ;
- pleine lune dans ciel clair 0,25 lux.

### ■ Irradiance (éclairement énergétique)

Contrairement à l'éclairement, l'irradiance ou puissance surfacique prend en compte **tout le spectre** d'émission de la source étudiée.

Elle se mesure en  $\text{W/m}^2$  à l'aide d'un **solarimètre**.

C'est cette grandeur qui est prise en compte pour l'analyse de la production photovoltaïque.



## ■ Indice de rendu des couleurs

L'indice de rendu des couleurs est déterminé en comparant l'effet chromatique d'une source par rapport à une source de référence.

Classification de l'indice de rendu des couleurs :

- IRC > 90, appréciation exacte des couleurs (examens cliniques) ;
- 80 < IRC < 90, éclairage agréable (habitations, hôtels, etc.) ;
- 60 < IRC < 80, bon rendu des couleurs (atelier sans problème de couleurs) ;
- 50 < IRC < 60, pas d'exigence de rendu des couleurs (fonderie, mécanique lourde, stockage).

## ■ Température de couleur

La température de couleur  $T_c$  d'une source de lumière dépend de sa température. À une couleur donnée de la source, on fait correspondre la température de cette source appelée **température de couleur**.

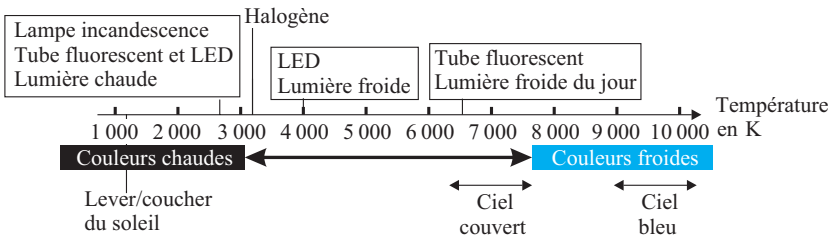


Diagramme de KRUTHOF sur Dunod.com.

## 4. Énergie solaire

Une cellule photovoltaïque est constituée comme une diode de deux zones de silicium, une dopée  $N$  et une dopée  $P$ . Entre ces zones, se forme une jonction  $PN$ .

Les électrons libres de la zone dopée  $N$  n'ont pas l'énergie suffisante pour franchir cette jonction.

Les photons d'un rayon lumineux peuvent leur communiquer l'énergie suffisante pour franchir cette jonction et ainsi générer un courant électrique.

