10 ÉNERGIES

Objectifs

- Rappeler les outils physiques de quantification des performances des systèmes et sous-systèmes énergétiques
- Préciser les unités utiles et quelques ordres de grandeur
- Identifier une énergie, évaluer quantitativement les énergies et puissances en présence sur un système
- Préparer un bilan énergétique

1 Énergies

a Qu'est-ce que l'énergie ?

L'énergie est une grandeur physique caractérisant un système et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il entre en interaction.

b Quelles sont les formes prises par l'énergie ?

L'énergie peut se présenter sous sept formes principales : énergie lumineuse (rayonnement), énergie nucléaire, énergie chimique, énergie mécanique, énergie électrique, énergie hydraulique (ou fluidique), énergie thermique.

Le diagramme ci-dessous indique les transformations qui permettent de passer d'une forme à une autre.

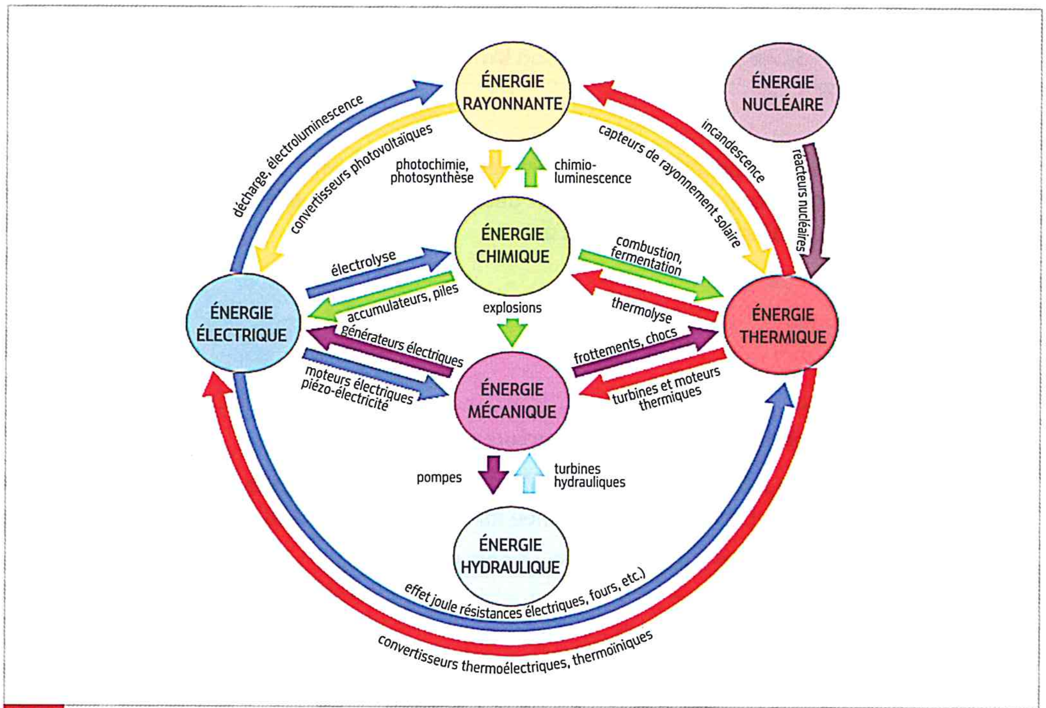


Fig. 1

tion
rgie/puissance :
P.t
:
énergie exprimée
oule (J).
puissance
imée en watt (W).
temps exprimé
econde (s).

c Quelles sont les unités de l'énergie ?

L'énergie s'exprime en Joule **J** (unité du Système International). Le Joule est une unité dérivée des unités de base que sont la distance, la masse, et le temps.

Elle s'exprime aussi en **W.h**, ce qui signifie que l'énergie est aussi le fruit de l'utilisation d'une puissance pendant un temps donné.

Elle s'exprime aussi en **TEP** (tonne équivalent pétrole). La TEP étant l'énergie qu'une tonne de pétrole peut libérer lors de sa combustion.

EXEMPLE

Conversion d'unités énergétiques

Le kilowatt heure est l'énergie apportée par une puissance de 1 000 W pendant 1 heure.

Soit : 1 000 × 3 600 = 3 600 000 Joules.

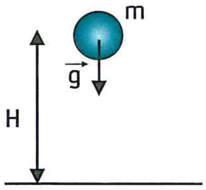
2 Énergie et puissance mécanique

a Énergie mécanique potentielle

Une masse « *m* » subissant une accélération « g » et pouvant réaliser un déplacement potentiel « *H* », dispose d'une énergie potentielle :

$E_p = m.g.H$ **J = kg . m.s⁻² . m = kg.m² .s⁻²**

$E_p = P . H$ **J = N . m**



EXEMPLE

Énergie potentielle de hauteur

On cherche à évaluer l'énergie récupérable lors de la descente d'un ascenseur. La masse de l'ensemble de la cabine et de sa charge est 1 200 **kg** et la hauteur totale de la descente est de 27 **m**. On rappelle : g = 9,81 **m.s^{-2}.**

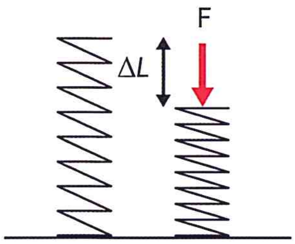
E_p = m.g.h, soit E_p = 1200 x 9,81 x 27 = 317,84 **kJ**

E_c = 317,8.10^3/3600000 = 0,088 **kW.h**

Une énergie mécanique est aussi homogène au produit d'une force et d'un déplacement ! Ainsi on peut déterminer l'énergie stockée dans un ressort (système élastique) par :

$E_{sto} = F . \Delta L$

J = N . m



EXEMPLE

Énergie stockée dans une structure élastique

Une structure métallique soumise à une charge ponctuelle de 10 tonnes subit une déformation de 5 cm. L'énergie emmagasinée dans cette structure est : $E_{STO} = F . \Delta L = m . g . \Delta L$

E_{STO} = 10 000 × 9,81 × 5.10^{-2} = 4 905 **J**

b Énergie mécanique cinétique

Une masse « *m* » se déplaçant dans un mouvement de **translation** à une vitesse « *v* », dispose d'une énergie cinétique :

$E_c = ½ .m.v^2$ avec J = kg . (m.s^{-1})^2 = kg.m^2 .s^{-2}

EXEMPLE

Énergie cinétique d'un objet en translation

Une automobile de 1 000 kg lancée à 50 km/h dispose d'une énergie cinétique :

E_c = ½ .m.v² = 0,5 × 1 000 × (50.103/3 600)²

E_c = 96 450 **J**

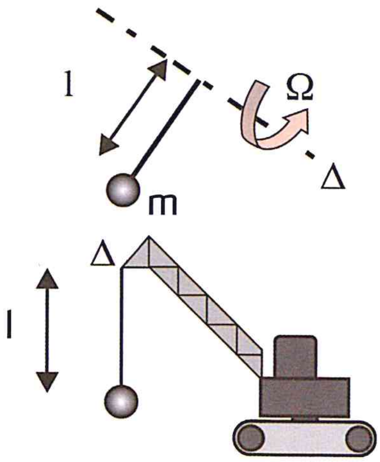
Une masse ponctuelle « m » en mouvement de rotation à une distance « l » autour d'un axe Δ à la vitesse angulaire « Ω » dispose d'une énergie cinétique :

$E_C = ½.m.l^2.\Omega^2$ avec **J = kg . m ². rad².s⁻²**

EXEMPLE

Énergie cinétique d'un objet en rotation

Un boulet sphérique de masse de 5,3 tonnes est suspendu sur la flèche d'une grue, par un câble d'une longueur de 20 m (voir schéma ci-contre). Il est entraîné dans des mouvements pendulaires par cette dernière ce qui confère au boulet une énergie cinétique. Le mouvement du boulet est un mouvement de rotation dans le plan de la feuille autour d'un axe Δ perpendiculaire à ce plan, lorsque le boulet passe par la verticale sa vitesse est $\upsilon = 6{,}26$ **m/s**.



La relation entre cette vitesse v et la vitesse angulaire Ω est :

$\upsilon = \Omega.l$. Soit : $\Omega = \upsilon/l = 6{,}26/20 = 0{,}313$ **rad.s⁻¹**

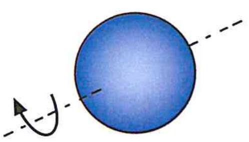
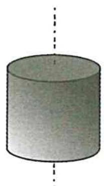
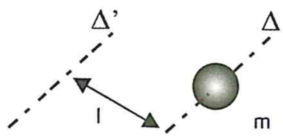
On en déduit l'énergie cinétique portée par le boulet :

$E_C = ½.m.\upsilon^2 = ½.m.(l\Omega^2 = ½\ m.l^2\Omega^2)$.

Soit $E_C = 0{,}5 \times 5\,300 \times 20^2 \times 0{,}313^2 = 103{,}986$ **kJ**

C Généralisation

Le produit $m.l^2$ est appelé aussi le moment d'inertie. Il est noté J_Δ en référence à l'axe de rotation considéré. Ses unités sont le **kg.m²**.
$E_C = ½ . J_\Delta .\Omega^2$ avec **J = kg.m² . (rad.s⁻¹)²**.

Type de Solide	Sphère	Cylindre	Axe décalé
Schéma	Rayon R 	Rayon : R Hauteur : h 	
Valeur de J_Δ	$J_\Delta = \frac{8}{5}.\rho.\pi.R^5$	$J_\Delta = \frac{1}{2}.\rho.\pi.R^4.h$	$J_\Delta' = J_\Delta + m.l^2$

d Puissance mécanique

Une puissance mécanique est homogène au produit d'une force et d'une vitesse.

$P_{MECA} = E/t = F . L/t = F . v$ avec **W = J . s⁻¹ = N.m.s⁻¹**

Une puissance mécanique est homogène au produit d'un couple et d'une fréquence de rotation.

P_{MECA} = C . Ω avec **W = N.m . rad.s⁻¹ = N.m.s⁻¹**

EXEMPLE

Puissance d'un moteur

Une mesure mécanique réalisée sur le moteur d'un véhicule automobile donne :

Couple : 142 **N.m**

Vitesse de rotation : 4 000 **tr/min**

La puissance mécanique développée par ce moteur, est :

$P_{MECA} = C . \Omega$

Or Ω = 2 . π . N/60 = 4 000 × 2 × 3,14/60 = 418,66 **rad/s**

Soit : P = 142 × 418,66 = 59,450 **kW**

ACTIVITÉ 1

Couple moteur

Le moteur d'un véhicule automobile doit développer une puissance mécanique de 65 **kW** pour une vitesse de rotation de 3 500 **tr/min.** Déterminer le couple que doit développer ce moteur.

3 Énergie et puissance fluidique

Un fluide lors de son déplacement transporte avec lui une énergie fluidique. Pour les fluides liquides on parle d'énergie hydraulique, pour l'air d'énergie aéraulique.

Pour évaluer ces énergies fluidiques on a tendance à raisonner en énergie volumique **$J.m^{-3}$**.

Or 1 **$J.m^{-3}$** est homogène à une pression en Pascal Pa.

En effet : 1 **J** = 1 **N** . 1 **m**,

soit : 1 **$J.m^{-3}$** = 1 **N . m . m^{-2}**

1 **$J.m^{-3}$** = 1 **$N.^{m-2}$** = 1 **Pa**

L'énergie portée par un fluide peut prendre trois formes :

- l'énergie volumique due aux forces de pression est alors la pression elle-même : $E_p = P$ **Pa** ;
- l'énergie volumique due à la hauteur est : $E_h = \rho.g.h$ **Pa.**

ρ : masse volumique du fluide **$kg.m^{-3}$**

g : accélération de la pesanteur **$m.s^{-2}$**

h : hauteur de la colonne de fluide considérée m

- l'énergie volumique cinétique (liée à la vitesse) ou pression dynamique : $E_c = \rho.\upsilon^2/2$ Pa

ρ : masse volumique du fluide **$kg.m^{-3}$**

υ : vitesse du fluide **$m.s^{-1}$**

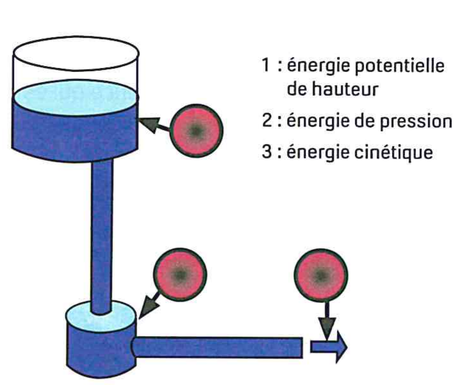
La pression exercée par un fluide sur une surface est égale au rapport de l'effort mécanique transmis perpendiculairement à cette surface et de la valeur de cette surface :
$P = F/S$ avec **Pa = N . m^{-2}**

EXEMPLE

Réseau de distribution d'eau

On réalise des mesures sur un réseau de distribution d'eau selon le schéma ci-dessous.

On rappelle : ρ = 1 000 **kg.m⁻³**



Repère	Altitude	Pression Relative	Vitesse	E_H	E_P	E_C
	m	Pa	$m.s^{-1}$	$J.m^{-3}$/Pa	$J.m^{-3}$/Pa	$J.m^{-3}$/Pa
1	40	0	0,01	= ρ.g.h = 1 000 × 9,81 × (40 - 0) = 392 400	= P = 0	= $\rho.v^2/2$ = 1 000 × $0,01^2/2$ = 0,05
2	0	392 395	0,1	= ρ.g.h = 1 000 × 9,81 × (0 - 0) = 0	= P = 392 395	= $\rho.v^2/2$ = 1 000 × $0,1^2/2$ = 5
3	0	0	3	= ρ.g.h = 1 000 × 9,81 × (0 – 0) = 0	= P = 0	= $\rho.v^2/2$ = 1 000 × $3^2/2$ = 4 500

Puissance fluidique

La puissance fluidique est homogène au produit d'un débit volumique par une énergie volumique.

La puissance fluidique échangée par un débit de fluide noté « Qv » avec un système solide le contenant est égale au produit de ce débit par la différence d'énergie fluidique aval amont aux frontières de ce système.

$P_{hyd} = Qv \cdot (E\,hyd_{aval} - E\,hyd_{amont})$ avec **W = $m^3.s^{-1}$. Pa = $m^3.s^{-1}$. $J.m^{-3}$**

Qv : débit volumique du fluide **$m^3.s^{-1}$**

E hyd : énergie fluidique volumique **$J.m^{-3}$** ou **Pa**

EXEMPLE

Micro-centrale hydraulique

Le système décrit sur la figure ci-dessous est un régulateur de niveau remplaçant les déversoirs traditionnels. Il permet en effet de faire passer sur une turbine le débit d'eau habituellement déversé et ainsi de produire de l'énergie électrique. La puissance hydraulique cédée par l'eau lors du passage d'un débit de 0,5 **m³/s** sur une chute de 3 **m** est : $P_{hyd} = Q\upsilon \,.\, (Ehyd_2 - Ehyd_1)$

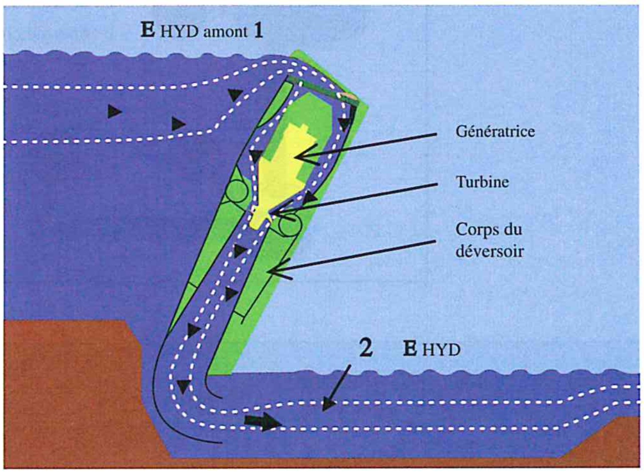
On donne : $P_1 = P_2 = P_{atmosphérique}$; $\upsilon_1 = 0$ **m.s⁻¹** ; $\upsilon_2 = 1{,}25$ **m.s⁻¹**

$Ehyd_2 = P_2 + \rho.g.h_2 + ½ \,.\, \rho.\,\upsilon_2^2$; $Ehyd_1 = P_1 + \rho.g.h_1 + ½ \,.\, \rho.\,\upsilon_1^2$

$(Ehyd_2 - Ehyd_1) = P_{atmosphérique} - P_{atmosphérique} + \rho.g.(h_2 - h_1) + ½ \,.\, \rho.\,\upsilon_2^2$

Soit : $P_{hyd} = Q\upsilon \,.\, \rho.g.(h_2 - h_1) + ½ \,.\, \rho.\,\upsilon_2^2 = -0{,}5 \times 1\,000 \times 9{,}81 \times 3 + 0{,}5 \times 1\,000 \times 1{,}25^2 = -13{,}9$ **kW**

Le signe négatif correspond à une puissance qui est perdue par le fluide !



4 Énergie et puissance électrique

a Énergie électrique

L'énergie électrique se manifeste lors du déplacement de charges électriques (électrons ou ions). Ce déplacement est appelé un courant électrique. Il est noté I et exprimé en ampère (**A**).

Un courant électrique de **1 A** circulant pendant une durée de **1 seconde** correspond au déplacement d'une charge électrique « q » d'une valeur de **1 Coulomb**.

Une charge électrique « q » soumise à une différence de potentiel ΔU dispose d'une énergie potentielle électrique « $E_{élec}$ » tel que :

$E_{élec} = q \,.\, \Delta U$ avec Q exprimé en **Coulomb** et ΔU différence de potentiel en **Volt**.

EXEMPLE

Accumulateur d'un drone

Le drone Parrot est équipé de 3 cellules au lithium délivrant chacune 334 **mA.h** sous 11,1 **V**.

Déterminons l'énergie embarquée par ce drone exprimée en **kJ** et en **W.h** lorsque la batterie est chargée.

La charge contenue dans chaque cellule en Coulombs : $Q = 334.10^{-3} \times 3600$; $Q = 1202{,}4$ **Coulombs**.

L'énergie embarquée par le drone est donc en kJ :
$E_{elec} = 3.Q.\Delta U$ soit $E_{elec} = 3 \times 1202{,}4 \times 11{,}1 = 40040$ **J** soit $E_{elec} = 40{,}040 \times 1000/3600 = 11{,}1$ **W.h**

b Puissance électrique

Courant continu

La puissance électrique est le produit du courant « I » et de la différence de potentiel ΔU notée « U ».

$P = U \,.\, I$ avec $\boldsymbol{W = V \,.\, A}$

Régime alternatif monophasé

Pour déterminer les puissances en régime alternatif on a besoin des valeurs efficaces des courants et des tensions ; qui sont les valeurs des courants et tensions continues qui délivreraient la même puissance que les grandeurs alternatives si elles étaient appliquées à un récepteur résistif pur.

Puissances électriques

Un dipôle électrique absorbant un courant efficace « I_{eff} » sous une tension « U_{eff} », absorbe une puissance apparente « S » exprimée en Voltampère, telle que :

$S = U_{eff} \cdot I_{eff}$ avec **V . A = V.A**

Cette puissance apparente se décompose en trois termes :

- la puissance active, notée « *P* » qui s'exprime en **W** ;
- la puissance réactive, notée « *Q* » s'exprimant en **VAR** (Voltampère Réactif) ;
- la puissance déformante, notée « *D* » s'exprimant en **VAD** (Voltampère Déformant) ;

Les relations entre les différentes puissances s'expriment par : $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$

La puissance active est la puissance qui génère un effet utile du système électrique considéré.

Pour une même puissance active P, on peut dire que les puissances réactive Q et déformante D augmenteront la valeur de la puissance apparente S. Ceci se traduira par une augmentation du courant efficace absorbé par le système électrique. Or sur un réseau de distribution d'énergie électrique les pertes en ligne par effet joule et les chutes de tension sont liées au courant efficace. Ceci explique pourquoi les sociétés qui distribuent de l'énergie électrique sont vigilantes au rapport entre la puissance active et la puissance apparente, appelé facteur de puissance.

ıns le cas particulier régime sinusoïdal, que représenté sur figure 2, les valeurs courant et de la ısion efficace sont :

$I_{eff} = I_{max} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}$;

$U_{eff} = U_{max} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}$

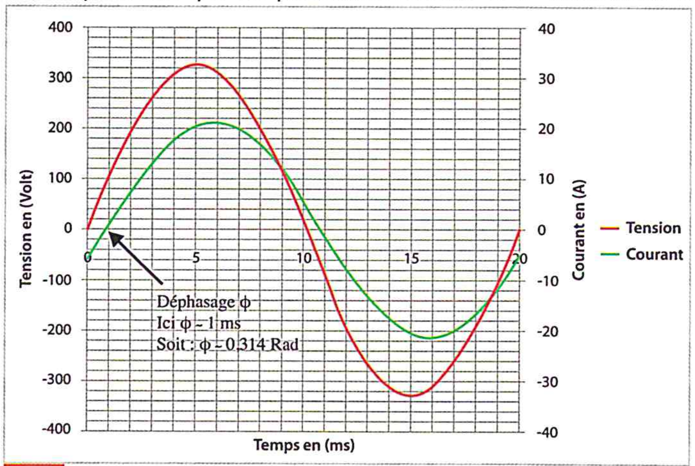


Fig. 2 Relevés du courant et de la tension aux bornes d'un dipôle linéaire monophasé

Facteur de puissance F_P

C'est le rapport entre la puissance active consommée et la puissance apparente : $Fp = \frac{P}{S}$.

Calcul des puissances électriques		
Dipôles linéaires		**Dipôles non linéaires ou déformants**
Ex. : résistifs	Ex. : condensateur, bobines, moteurasynchrone	Ex. : ampoules fluo compactes, hacheurs, redresseurs, adaptateur AC/DC...
$F_p = 1$	$F_p = \cos(\varphi)$*	$F_p = \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{\left(1+\left(\frac{THDv(\%)}{100}\right)^2\right)\cdot\left(1+\left(\frac{THDi(\%)}{100}\right)^2\right)}}$ **
$P = S$	$P = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos(\varphi)$	$P = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi)$***
$Q = 0$	$Q = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \sin(\varphi)$	$Q = U_1 \cdot I_1 \cdot \sin(\varphi)$***
$D = 0$	$D = 0$	$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$

* : φ est le déphasage exprimé en radian entre le fondamental du courant et le fondamental de la tension.

** : *THDi(%)* est le taux de distorsion harmonique du courant exprimé en %.

THDv(%) est le taux de distorsion harmonique de la tension exprimé en % ; il est en général très faible sur les réseaux EDF.

*** : U_1 et I_1 sont les valeurs efficaces des fondamentales des tensions et courants

ÉNERGIES

EXEMPLE

Moteur asynchrone alimenté en tension monophasée sinusoïdale (dipôle linéaire)

La figure 2 illustre le résultat de mesures effectuées grâce à un oscilloscope sur un convertisseur linéaire d'énergie électrique monophasé. Il s'agit d'un moteur asynchrone monophasé dont la valeur efficace du courant alternatif absorbé est de 15 A. La valeur efficace de la tension d'alimentation est de 230 V. Le facteur de puissance de ce convertisseur est de 0,96.

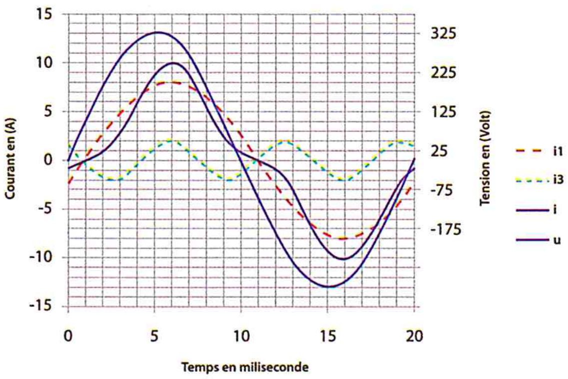
On a donc $\cos(\varphi) = 0{,}96$ et $\sin(\varphi) = \sin(\cos^{-1}(0{,}96)) = 0{,}28$.

On en déduit les valeurs de :

- la puissance apparente : $S = 230 \times 15 = 3{,}45$ **V.A** ;
- la puissance active : $P = S\,.\,\cos(j) = 3{,}45 \times 0{,}96 = 3{,}312$ **kW** ;
- la puissance réactive : $Q = S\,.\,\sin(j) = 3{,}45 \times 0{,}28 = 0{,}966$ **kVAR** ;
- la puissance déformante : $D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} = \sqrt{3{,}45^2 - 3{,}312^2 - 0{,}966^2} = 0$ **kVAD**

EXEMPLE

Courants absorbés par le moteur synchrone d'une pompe à chaleur (dipôle non linéaire)



La figure ci-dessus illustre le résultat de mesures effectuées grâce à un oscilloscope sur un convertisseur non linéaire. Ils'agitd'unmoteursynchronemonophasé. On observe que le courant I est assez déformé.Ilestlasommededeuxcourants sinusoïdauxl'unàunefréquencede50Hz, l'autre à une fréquence de 150 **Hz**. Le déphasage entre le fondamental du courant et la tension est de 1 **ms**, soit : $\varphi = 2\times \pi \times 1/20 = 0{,}314$ ou encore : $\cos(\varphi) = 0{,}95$ et $\sin(\varphi) = 0{,}31$.

Le premier courant est le fondamental noté I1, le deuxième est un harmonique appelé I3.

La valeur efficace du courant I1 est : $I1_{eff} = 8 \times \dfrac{\sqrt{2}}{2} = 5{,}65$ **A.**

La valeur efficace du courant I3 est : $I3_{eff} = 2 \times \dfrac{\sqrt{2}}{2} = 1{,}41$ **A.**

La valeur efficace du courant I est : $I_{eff} = \sqrt{I1^2_{eff} + I3^2_{eff}} = 5{,}82$ **A.**

La valeur efficace de la tension U est : $U_{eff} = 320 \times \dfrac{\sqrt{2}}{2} = 226$ **V.**

La puissance apparente : $S = 226 \times 5{,}82 = 1\,315$ **V.A.**

La puissance active : $P = U1eff\,.I1eff.\,\cos(\varphi) = 226 \times 5{,}65 \times 0{,}95 = 1\,213$ **W.**

La puissance réactive : $Q = U1eff\,.I1eff.\,\sin(\varphi) = 226 \times 5{,}65 \times 0{,}31 = 395$ **VAR.**

La puissance déformante : $D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} = \sqrt{13152 - 12132 - 3962} = 319$ **VAD.**

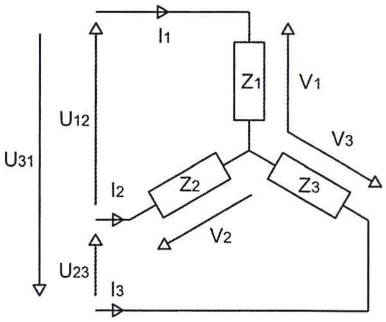
La valeur du facteur de puissance est ici : FP = P/S = 1 213/1 315 = 0,922.

On observe ici que la déformation du courant génère une augmentation du courant efficace absorbé.

Ceci augmente la puissance apparente sans augmenter la puissance active qui est la seule à produire un effet utile.

Régime alternatif triphasé

Pour déterminer les puissances en triphasé il suffit de faire la somme des puissances consommées par chacune des phases.

Calcul des puissances électriques en triphasé équilibré pour des récepteurs linéaires		
Tension simples V	**Tension composée U**	**Exemple : montage d'un récepteur en étoile**
$S = 3.V.I$	$S = \sqrt{3}.U.I$	 **
$P = 3.V.I.\cos(\varphi)$	$P = \sqrt{3}.U.I \cos(\varphi)$	
$P = 3.V.I.\sin(\varphi)$	$P = \sqrt{3}.U.I \sin(\varphi)$	

* : φ est le déphasage exprimé en radian entre le fondamental du courant et le fondamental de la tension de la même phase.

** : en régime triphasé équilibré I1 = I2 = I3 = I ; U12 = U23 = U31 = U ; V1 = V2 = V3 = V.

5 Énergie et puissance thermique

L'énergie thermique se manifeste par l'existence de la température. Exemple : température extérieure donnée par un bulletin météorologique. La température est la représentation macroscopique de l'agitation moléculaire. Plus l'agitation moléculaire d'un corps est importante plus sa température est élevée, et plus l'énergie thermique qu'il contient l'est aussi.

L'unité SI de température est le degré kelvin **K**. Un écart de 1 K est aussi égal à 1 degré Celsius °C.

Si T = 0 °C alors T = 273,15 K.

La chaleur représente une quantité d'énergie thermique échangée par un système physique (reçue ou émise). Notée Q, elle s'exprime en joule. Lorsqu'on apporte de la chaleur à un système physique on peut observer :

- une augmentation de température ;
- une augmentation de pression ;
- une augmentation de volume ;
- un changement d'état physique.

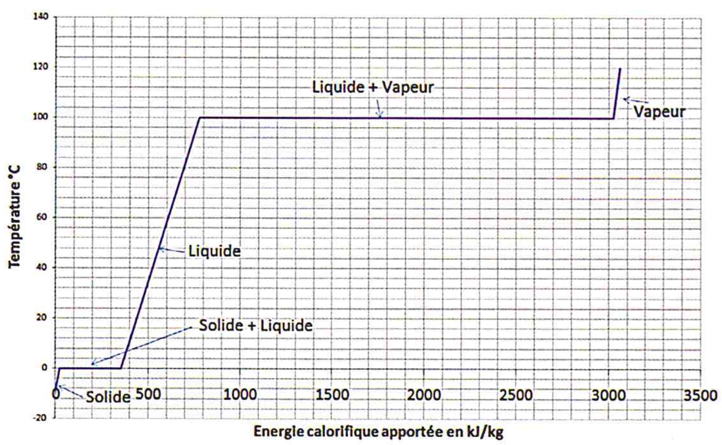


Fig. 3 Comportement énergétique de l'eau lors de son chauffage

La figure 3 illustre quantitativement les comportements lors du chauffage à pression atmosphérique d'une masse de glace à -10 °C jusqu'à transformation de cette glace en vapeur à 120 °C.

On observe des segments de droites croissantes correspondants à l'augmentation de la température des états purs : solide, liquide, et vapeur.

On observe des segments de droites formant des paliers, correspondant aux changements d'états : solide ↔ liquide, liquide ↔ vapeur.

Chaleur sensible – Notée : *Qs* en **J**	**Chaleur latente** –Notée : *QL* en **J**
La chaleur sensible est la part de chaleur échangée qui fait varier la température du système. On a : $Qs = m \,.\, Cp \,.\, \Delta T$ *Qs* : quantité de chaleur sensible échangée **J**. ***m*** : masse du corps considéré **kg**. ***Cp***[a] : capacité calorifique massique $\mathbf{J.kg^{-1}.K^{-1}}$. ΔT : variation de la température du corps **°C**.	La chaleur latente est la part de chaleur échangée qui ne fait pas varier la température du système, mais qui modifie son état. On a : $QL = \Delta m \,.\, L$ **QL** : quantité de chaleur latente échangée **J**. Δm : variation de masse d'une phase du corps considéré **kg**. *L* : chaleur latente de changement d'état $\mathbf{J.kg^{-1}}$.

EXEMPLE

Chauffage du bassin d'une piscine

Lors des opérations de nettoyage semestriel d'une piscine publique, un bassin de nage d'un volume de 630 $\mathbf{m^3}$ est rempli d'eau froide à 10 **°C**. Afin de réchauffer ce bassin pour accueillir les baigneurs, sa température doit être élevée à 28 **°C**. Quelle est l'énergie nécessaire au chauffage l'eau du bassin ? Quelle puissance thermique apporter à ce bassin afin de le chauffer en 24 heures ?

On donne :

$Cp_{eau} = 4\,185$ $\mathbf{J.kg^{-1}.K^{-1}}$

$\rho_{eau} = 1\,000$ $\mathbf{kg.m^{-3}}$

L'énergie thermique à apporter correspond à la chaleur qu'il faut fournir à l'eau du bassin pour augmenter sa température de 18 **°C**. Cet échange de chaleur se fait sans changement d'état de l'eau du bassin, il s'agit donc de chaleur sensible.

On a : $Qs = m_{eau} \,.\, Cp_{eau} \,.\, \Delta T = \rho_{eau} \,.V_{eau} \,.\, Cp_{eau} \,.\, \Delta T$.

Soit : $Qs = 1\,000 \times 630 \times 4\,185 \times 18 = 4{,}745 \,.\, 10^{10}$ **J** = 47 458 **MJ**.

On en déduit la puissance : $Pth = E/t = 47\,485 \,.\, 10^6/(24 \times 3\,600) = 549{,}6$ **kW**.

Puissance portée par un débit de fluide caloporteur

Un fluide caloporteur est un liquide ou un gaz qui se charge en chaleur et transporte cette chaleur avec lui d'un point à un autre dans un système thermique.

Généralisation : puissance thermique portée par un débit de fluide*	
Puissance portée sous forme sensible	**Puissance portée sous forme latente**
$P_S = qm \,.Cp.\, \Delta T$ en **Watt** q_m : débit massique du fluide $\mathbf{kg.s^{-1}}$. **Cp** : capacité calorifique massique $\mathbf{J.kg^{-1}.K^{-1}}$. ΔT : variation de la température du fluide **°C**.	$P_L = q_m.\, L$ **Watt** q_m : débit massique du fluide $\mathbf{kg.s^{-1}}$. *L* : chaleur latente de changement d'état $\mathbf{J.kg^{-1}}$.

* : À pression constante

EXEMPLE

Système de chauffage à eau chaude

Une pompe à chaleur eau/eau réchauffe un débit d'eau chaude basse température (eau de chauffage) de 1 100 **l/h**. La température de cette eau passe de 35 **°C** à 40 **°C** lors de son passage dans la pompe à chaleur. Quelle est la puissance thermique transportée par le débit d'eau ?

On donne : $Cp_{eau} = 4\,185$ **J.kg⁻¹.K⁻¹**, $\rho_{eau} = 1\,000$ **kg.m⁻³**.

On peut considérer qu'il passe au travers de la PAC un volume d'eau de 1 100 litres chaque heure. La quantité d'énergie apportée à l'eau est la chaleur sensible : $Qs = \rho_{eau} . V_{eau} . Cp_{eau} . \Delta T$,

soit : $Qs = 1\,000 \times 1{,}1 \times 4\,185 \times 5 = 23{,}018$ **MJ**.

La relation puissance énergie nous donne : $P = E/t$ soit : $P = Qs/t$.

La PAC apporte en 1 heure la quantité de chaleur Qs, la puissance apportée par la PAC à l'eau est donc : $P = 23{,}018 . 10^6/3\,600 = 6\,394$ **W**.

On peut également calculer cette puissance directement à partir des données fournies :

$P = \rho_{eau} . QV_{eau} . Cp_{eau} . \Delta T = 1\,000 \times 1\,100/3\,600/1\,000 \times 4\,185 \times 5 = 6\,394$ **W**.

6 Énergie chimique

Les réactions chimiques sont l'expression macroscopique d'une modification des liaisons microscopiques entre les atomes de molécules qui interagissent. Elles s'accompagnent d'échanges énergétiques. Pour qu'une réaction ait lieu, il faut en général apporter une énergie d'activation suffisante « E_a » permettant aux molécules en présence de se dissocier avant de se réorganiser.
Pour des réactions chimiques s'effectuant à pression et température constante l'échange d'énergie se traduit uniquement par un échange de chaleur.

a Cas des combustions (Fig. 4)

Pour les combustions on ramène l'énergie thermique libérée « E_{CH} » par une combustion complète neutre à l'unité de masse ou de volume du combustible brûlé. On parle alors de pouvoir calorifique « P.C. ». On peut déterminer l'énergie chimique « E_{CH} » libérée par une combustion :

$E_{CH} = PC_m . m$ en J

$E_{CH} = PC_V . V$ en J

PC_m : pouvoir calorifique massique ($J.kg^{-1}$).

PC_V : pouvoir calorifique volumique ($J.m^{-3}$)^b.

m : masse de combustible (kg).

V : volume de combustible (m^3).

Il s'agit ici de volume exprimé dans les conditions normales de température et de pression, c'est-à-dire P= 101 325 Pa et T = 0 °C.

e réaction chimique libère de l'énergie dite **exothermique**. e réaction chimique absorbe de l'éner- thermique est dite **dothermique.**

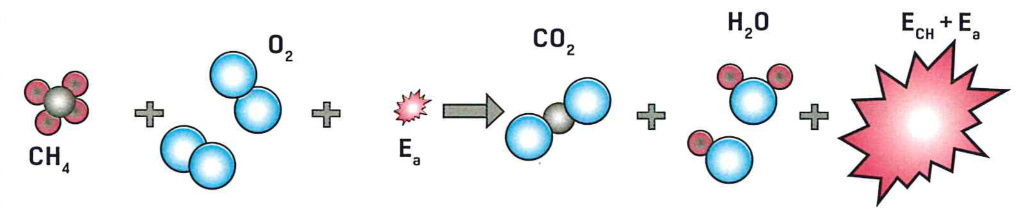


Fig. 4 Exemple de combustion du méthane

b Pouvoir calorifique supérieur

C'est la quantité totale d'énergie thermique ou de chaleur récupérable lors de la combustion neutre et complète d'un combustible. Elle comprend en particulier la chaleur liée à la transformation de la vapeur d'eau produite lors de la combustion en eau liquide.

c Pouvoir calorifique inférieur

C'est la quantité d'énergie thermique ou de chaleur récupérable lors de la combustion neutre et complète d'un combustible, sans compter la chaleur liée à la transformation de la vapeur d'eau produite lors de la combustion en eau liquide.

Caractéristiques de quelques combustibles				
Combustible	**PCI ($kJ.kg^{-1}$)**	**PCS ($kJ.kg^{-1}$)**	**Masse volumique ($kg.m^{-3}$)**	**Masse de CO_2 (kg/GJ)****
Gaz naturel (Lacq)	49 700	55 200	1,36*	57
GPL	45 800	49 600	543	64
Essence	42 700	47 300	775	73
Éthanol	27 000	29 700	789	
Gazole	42 600	44 800	850	75
Fioul Oil domestique	41 992	44 780	865	75
Granulé de bois	17 450	18 830	650	92
Charbon (houille)	≈ 36 160	≈ 35 360	≈ 1 500	95

* Phase gazeuse.
** Source MEDD.

EXEMPLE

Tonnes équivalent pétrole (TEP)

Nos sociétés qui consomment beaucoup d'énergie (pas toujours d'origine pétrolière) ont choisi d'utiliser la **tonne équivalent pétrole** pour se comparer les unes aux autres. Or le PCI massique du pétrole brut a une valeur de 41 868 **kJ/kg**. Une tonne de pétrole contient donc une énergie chimique :

$E_{CH} = 41\,868.10^3 \times 1\,000 = 41{,}868.10^9$ **J**.

1 TEP = 41,868 **GJ**.

1 TEP = $41{,}868.10^9/3\,600\,000 = 11\,630$ **kW.h**.

ACTIVITÉ 2

Comparaison de combustibles – équivalent plein de voiture

La quantité moyenne d'énergie correspondant à l'autonomie d'un plein pour une voiture est de 400 **kW.h**.

Déterminer les masses et volumes de combustible : gaz naturel, essence, gazole, GPL et éthanol apportant sur PCI cette quantité d'énergie lors de leur combustion.

7 Énergie nucléaire – chaudières nucléaires

Les centrales nucléaires sont des systèmes exploitant l'énergie développée par des réactions nucléaires, et transforment cette énergie en chaleur. La chaleur développée permet de produire de la vapeur d'eau à partir d'eau liquide dans une chaudière vapeur. Cette vapeur entraîne une ou plusieurs génératrices via une turbine à vapeur. On parle de réacteur thermonucléaire.

Les réactions nucléaires sont des réactions qui à l'échelle microscopique modifient les liaisons entre les différents éléments composant un atome : protons, neutrons et électrons. Les réactions nucléaires sont très énergétiques.

Aujourd'hui, on exploite des réacteurs thermonucléaires utilisant la fission d'éléments lourds tels que l'uranium 235 : ^{235}U. L'uranium 235 est composé de 92 protons, 92 électrons et 143 neutrons. C'est un élément naturellement instable (radioactif) et fissile. Il ne représente cependant qu'une faible partie (0,7%) du minerai uranium exploité, l'uranium naturel étant essentiellement composé d'uranium 238 stable (92 protons, 92 électrons, 146 neutrons).

Lors de la fission de l'^{235}U (Fig. 5), celui-ci donne naissance à des éléments plus légers et libère des neutrons qui, après avoir été ralentis par un modérateur (eau, eau lourde, graphite) qui va se réchauffer, peuvent créer la fission d'un nouvel atome d'^{235}U (réaction en chaîne), ou être absorbés par un atome d'^{238}U (noyau fertile).

[...]ssion : lorsque la [...]action nucléaire a [...]ur conséquence de [...]sser un atome lourd [...] plusieurs atomes [...]us légers, on parle [...] fission nucléaire.

Les atomes d'^{238}U après absorption d'un ou deux neutrons peuvent alors se transformer en atome de plutoniums ^{239}Pu, ^{240}Pu qui sont eux aussi fissiles.

Cette dernière réaction est utilisée par l'industrie nucléaire afin d'exploiter au mieux le potentiel du minerai nucléaire qu'est l'uranium, en fabriquant à partir des produits de fission générés par les centrales, des mélanges d'oxydes de plutonium et d'uranium appauvri appelés « MOX » qui sont de nouveau combustibles fissiles.

[...]sion : lorsque la [...]action nucléaire [...]pour conséquence [...] rassembler deux [...]omes légers afin [...]en fabriquer un plus [...]urd on parle alors [...] fusion nucléaire.

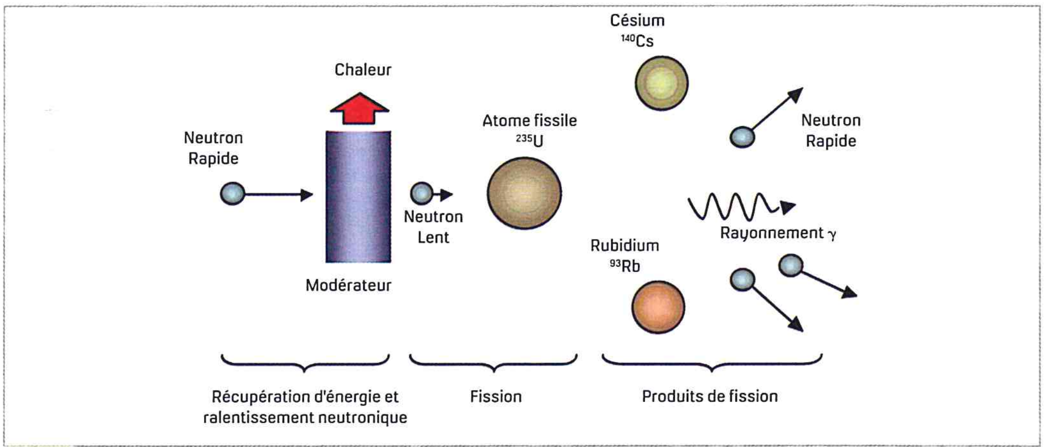


Fig. 5 Fission de l'uranium 235

EXEMPLE

Potentiel énergétique de l'uranium 235

La fission d'un atome d'uranium 235 libère près de 190.10^6 **eV**, ce qui est près de 200 000 000 fois plus que les réactions chimiques !

Un électronvolt est égal à environ $1{,}6021.10^{-19}$ **J.**

On souhaite déterminer l'énergie que peut libérer la fission d'1 kg d'uranium 235. On rappelle qu'un atome d'uranium 235 a une masse molaire de 23 **g/mol.**

Nombre d'atomes composant 1 **kg** d'^{235}U : $N = 1\ 000/235 \times 6.10^{23} = 2{,}553.10^{24}$ atomes.

Énergie libérée par la fission de ces atomes : $E_{NU} = N \times 190.10^6 = 4{,}851.10^{32}$ **eV**.

$E_{NU} = 4{,}851.10^{32} \times 1{,}6021.10^{-19} = 7{,}771.10^{13}$ **J.**

Soit : $E_{NU} = 21{,}58$ **GW.h.**

Soit : $E_{NU} = 1{,}856$ **kTEP.**

8 Énergie rayonnante

Lorsqu'on parle de rayonnement on a tendance à penser à la lumière visible. Les propriétés de la lumière visible nous enseignent :

- qu'il existe des sources lumineuses (donc de rayonnement) ;
- que ce rayonnement est composé de plusieurs rayonnements monochromatiques aux couleurs de l'arc-en-ciel ;
- que certains milieux sont opaques ou transparents, d'autres sont réfléchissants ou absorbants (couleurs).

Une onde monochromatique est une onde électromagnétique définie par son amplitude et sa fréquence notéeν (**Hz**) ou longueur d'onde notée λ (**m**). La figure 6 montre les familles de rayonnement et les ondes électromagnétiques monochromatiques associées.

Ces ondes électromagnétiques transportent de l'énergie dont on peut ressentir et exploiter les effets :

- éclairement : émission ou réflexion dans le domaine de la lumière visible ;
- échauffement : absorption d'énergie entraînant une excitation des molécules et des atomes… ;
- déplacement ou échange électroniques : effet photovoltaïque, photosynthèse, transmission d'information (ondes radio).

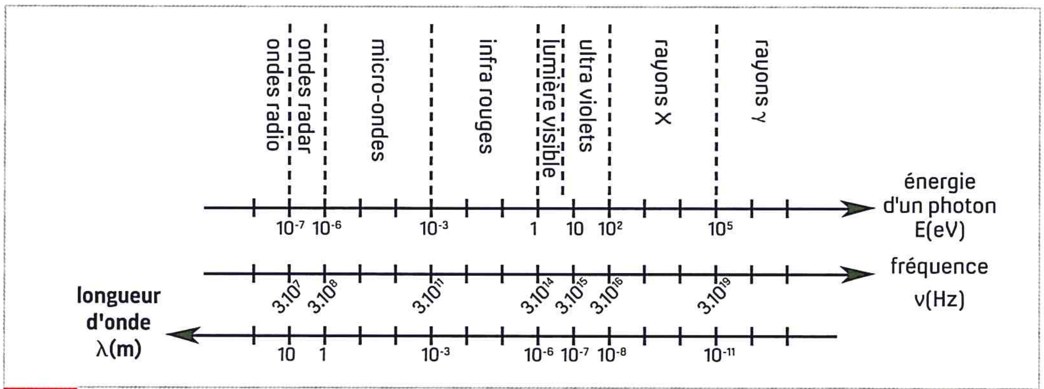


Fig. 6 Correspondance énergie / fréquence / longueur d'onde / familles de rayonnement

a Comment quantifier l'énergie portée par une onde électromagnétique ?

La mécanique quantique associe à une radiation électromagnétique monochromatique un corpuscule nommé photon dont l'énergie est :

E = h. où h est la constante de Planck et ν est la fréquence de l'onde électromagnétique monochromatique.

$h \approx 6{,}626069.10^{-34}$ **J.s** et $h \approx 4{,}13567.10^{-15}$ **eV.s**.

EXEMPLE

Énergie portée par un photon

Pour un rayonnement de longueur d'onde 10^{-12} **m**, la fréquence est $\nu = c/\lambda$.

c étant la vitesse de la lumière, soit 300 000 000 **m.s**$^{-1}$.

Soit : $\nu = 3.10^8/10^{-12} = 3.10^{20}$ **Hz**.

L'énergie de ce photon est donc :

$E\gamma = 6{,}626.10^{-34} \times 3.10^{20} = 1{,}987.10^{-13}$ **J**.

$E\gamma = 4{,}135.10^{-15} \times 3.10^{20} = 1{,}24.10^{6}$ **eV**.

Sachant qu'une réaction chimique a un potentiel de l'ordre de 1 **eV** et qu'elle est capable de modifier les liaisons moléculaires, on comprend que le rayonnement gamma émis par des produits radioactifs soit capable de casser les molécules organiques composant la matière vivante (brûlures).

b Puissance du rayonnement solaire

Le soleil est une étoile dont la température de surface est proche de 5 780 **K**, l'énergie rayonnante qu'elle émet dans l'espace est portée par de nombreuses longueurs d'ondes, la courbe représentant la densité d'énergie émise par le soleil portée par chaque longueur d'onde s'appelle le spectre solaire (Fig. 7)

Aux limites de l'atmosphère terrestre, on peut montrer que la puissance du rayonnement solaire reçu par une surface de 1 **m²** est de l'ordre de 1 350 **Watt**. Cette valeur est appelée la constante solaire.

Après passage au travers de l'atmosphère, cette puissance est réduite à cause de phénomènes d'absorption, de réflexion de l'atmosphère qui, à la manière d'un filtre, vont supprimer certaines ondes monochromatiques et déformer le spectre solaire.

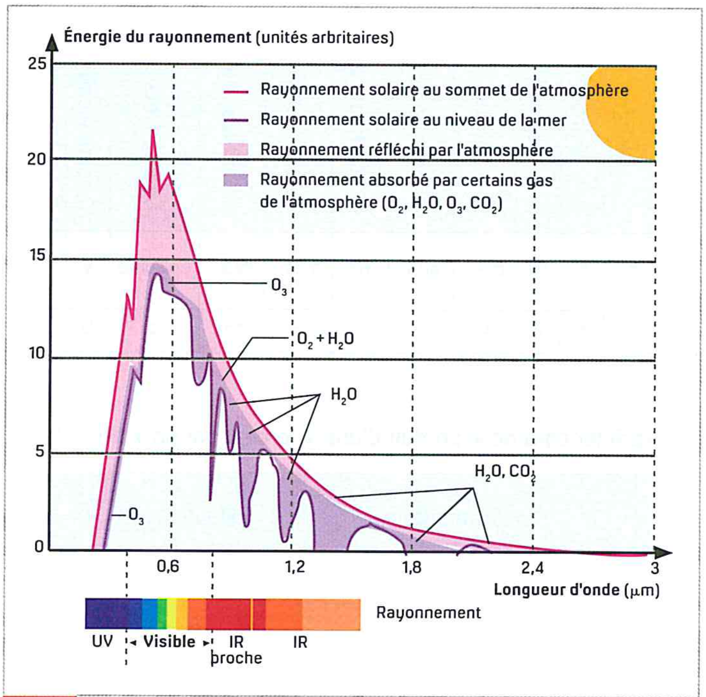


Fig. 7 Spectre solaire

c Qu'observe-t-on grâce à une caméra thermique ?

Une caméra thermique utilisée lors d'une opération de thermographie mesure le rayonnement dans le domaine des infrarouges lointains.

À chaque température est associée une longueur d'onde principale qui est celle qui porte le maximum d'énergie. Elle est donnée par la loi de Wien : $\lambda max = 2,898.10^{-3}/T$.

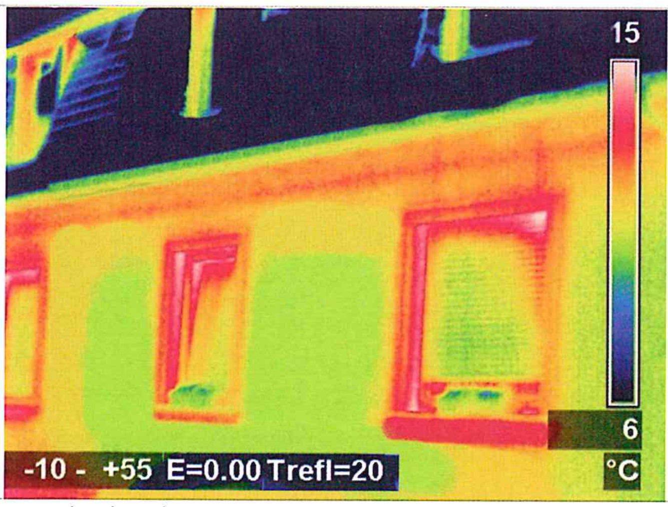


Fig. 8 Image d'une caméra thermique

EXEMPLE

Longueur d'onde associée à une température de 5 °C

Si T = 5 °C alors T = 273,15 + 5 K. La longueur d'onde principale est donc :

$\lambda max = 2{,}898.10^{-3}/278{,}15$.

$\lambda max = 10{,}4 \,.\, 10^{-6}$ m ce qui correspond au domaine des infrarouges.

SYNTHÈSE

Notations et unités du système international

Combustible	Temps	Masse	Distance	Longueur d'onde	Surface	Volume	Force	Pression	Vitesse	Vitesse angulaire	Fréquence	Débit Volumique	Débit Massique	Charge électrique	Tension électrique	Courant électrique	Énergie	Puissance	Flux de puissance
Unité S.I.	s	kg	m	m	m^2	m^3	N	Pa	$m.s^{-1}$	$rad.s^{-1}$	Hz	$m^3.s^{-1}$	$kg.s^{-1}$	Coulomb	V	A	J	W	$W.m^{-2}$
Notation	t	m	d	λ	S	V	F	P	v	Ω	ν	qv	qm	q	U	I	E	P	φ

Toutes les puissances peuvent s'exprimer comme le produit d'une « force » par un « flux » ! Exemples :

Type d'énergie	Électrique	Mécanique		Fluidique	Chimique
Force ou Potentiel	U	F	C	ΔP	PC
Flux	I	v	Ω	qv	qm
Puissance	$P_{élec} = U \times I$	$P_{méca} = F \times v$	$P_{méca} = C \times \Omega$	$P_{hydrau} = \Delta P \times qv$	$P_{chim} = PC \times qm$