

Objectif

- Être capable de poser un bilan énergétique et de matière sur un système afin d'en évaluer les performances énergétiques

11 EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE - PRINCIPE DE RÉVERSIBILITÉ

1 Bilan de masse et d'énergie - Principes de conservation

a Conservation de la matière et de l'énergie

Ce sont deux principes physiques qui peuvent s'exprimer par la formule bien connue : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ». Ils traduisent la conservation pour un système clos de la masse et de l'énergie.

La conservation de l'énergie est aussi le premier principe de la thermodynamique.

Il peut s'énoncer ainsi : « pour un système physique délimité par une frontière, la somme des échanges d'énergies aux frontières de ce système est égale à la variation de l'énergie interne portée par ce système. »

b Bilan énergétique

Faire un bilan énergétique est une opération qui nécessite de la méthode. La figure 1 ci-dessous propose une check-list permettant d'y parvenir.

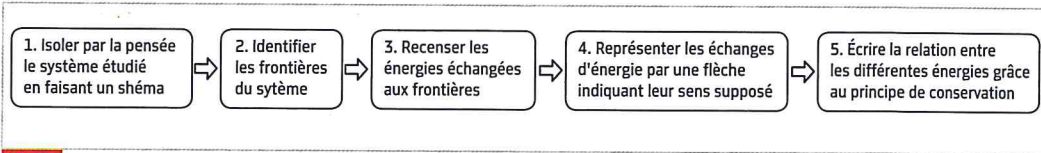


Fig. 1 Check-list pour établir un bilan énergétique

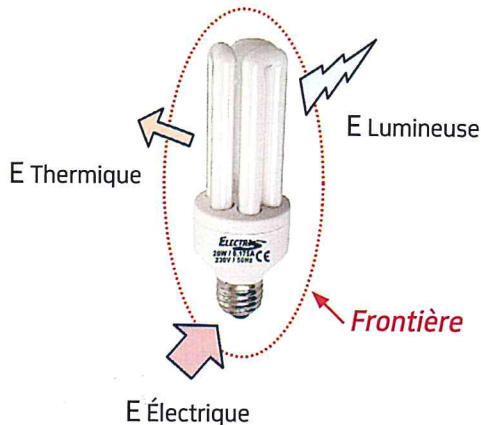
EXEMPLE

Ampoule basse consommation

Une ampoule est un objet permettant de convertir de l'énergie électrique en lumière, on sait par ailleurs que ces dispositifs ont tendance à chauffer.

Sur la figure ci-contre représentant l'ampoule, on fait apparaître une frontière pointillée et on recense les énergies échangées par l'ampoule sur cette frontière.

Dans le cas de l'ampoule et dans la mesure où l'on considère que le dispositif ne stocke pas d'énergie, le principe de conservation de la masse nous permet d'écrire :



$$E_{\text{Électrique}} - E_{\text{Lumineuse}} - E_{\text{Thermique}} = \Delta E_{\text{Interne}} = 0$$

$\Delta E_{\text{Interne}}$ représente la variation de l'énergie contenue par le système appelée énergie interne.

EXEMPLE

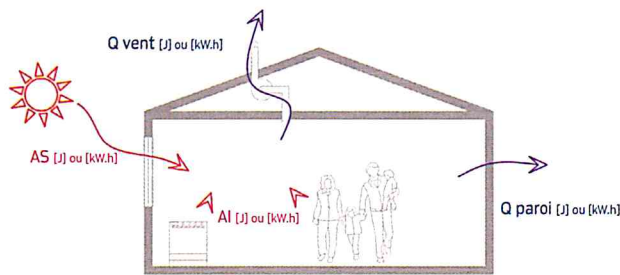
Bilan énergétique d'un habitat

Les résultats d'une simulation thermique d'un habitat de 145 m² habitables sur une période de chauffage donnent :

- ▶ pertes de chaleur par transmission au travers des parois : $Q_{\text{paroi}} = 88,4 \text{ kW.h.m}^{-2}$;
- ▶ pertes de chaleur liées au renouvellement d'air et aux infiltrations : $Q_{\text{vent}} = 27,6 \text{ kW.h.m}^{-2}$;
- ▶ apports de rayonnement solaire au travers des vitrages : $AS = 39,4 \text{ kW.h.m}^{-2}$;
- ▶ apports de chaleur internes (occupant, électroménager, cuisine...) : $AI = 28,3 \text{ kW.h.m}^{-2}$.

En faisant un bilan énergétique sur la période de chauffage on peut déterminer les besoins en chauffage de cet habitat.

Le schéma ci-dessous illustre le système étudié.



Les limites du système étudié sont les limites du volume intérieur de l'habitat qui est le volume chauffé. Ces limites sont matérialisées par les murs mais aussi par la surface des occupants ainsi que celle des appareils électroménagers.

On compte positivement les apports (flèches entrantes), négativement les pertes (flèches sortantes).

Remarque : les besoins en chauffage s'ils existent sont des apports ils seront donc comptés positivement !

La conservation de l'énergie nous donne : $AS + AI + B_{\text{chauffage}} - Q_{\text{paroi}} - Q_{\text{vent}} = 0$.

On considère en effet ici que la variation d'énergie interne de la maison est nulle sur une saison de chauffe : « La maison ne stocke pas d'énergie sur une saison de chauffe ».

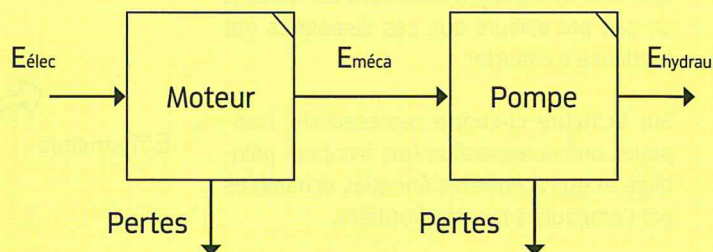
Soit : $B_{\text{chauffage}} = Q_{\text{paroi}} + Q_{\text{vent}} - AS - AI = 88,4 + 27,6 - 39,4 - 28,3 = 48,3 \text{ kW.h.m}^{-2}$.

Soit : $B_{\text{chauffage}} = 48,3 \times 145 = 7\,003,5 \text{ kW.h}$.

Les valeurs sont données en kilowatt-heure pour 1 mètre carré de surface habitable.

ACTIVITÉ

1 Bilan énergétique d'un système de pompage



Un système de pompage équipant une petite ville prélève de l'eau sur une nappe et la transfère dans des châteaux d'eau. Le volume pompé chaque année est de 1,8 million de m³, et l'énergie hydraulique moyenne apportée à l'eau par le système de pompage est de 245 250 kW.h. La consommation d'énergie électrique des pompes est de 350 357 kW.h. Les moteurs électriques équipant les pompes ont des pertes thermiques et mécaniques s'élevant à 3 % de la consommation d'énergie électrique.

En posant un bilan énergétique, déterminer quelle est la valeur des pertes liées aux pompes (résultats exprimés en % et en kW.h).

2 Rendement énergétique

a Définitions

Le **rendement** d'un système énergétique est le rapport entre un effet utile produit par ce système en regard d'une dépense à mettre en œuvre pour réaliser l'effet utile.

Pour tout système énergétique, on peut trouver un effet utile et donc une énergie utile E_u , et une dépense caractérisée par une énergie absorbée E_a . Le rendement énergétique du système se calculera alors comme suit : $\eta = E_u/E_a$.

Dans le cas d'une machine thermodynamique mettant en œuvre deux sources thermiques comme les pompes à chaleur, on ne parlera pas de rendement mais de coefficient de performance. Le COP chaud d'une pompe à chaleur étant le rapport entre l'énergie thermique produite par pompe à chaleur sur l'énergie électrique consommée.

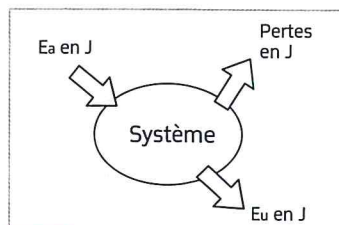


Fig. 2 Système énergétique

EXEMPLE

Rendement moyen annuel d'une centrale hydroélectrique

Une centrale hydroélectrique turbine un volume d'eau de $400 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ par an.

La chute alimentant la centrale est de 15 mètres. L'énergie électrique produite chaque année est de 14 GW.h. Déterminons le rendement moyen annuel de cette centrale.

L'effet utile est ici l'énergie électrique et la dépense est l'énergie hydraulique absorbée. Cette énergie se calcule à partir du volume turbiné V et de la hauteur de chute ΔH , on a :

$$E_{\text{HYD}} = \rho \cdot g \cdot V \cdot \Delta H$$

$$E_{\text{HYD}} = 1\,000 \times 9,81 \times 400 \cdot 10^6 \times 15 = 5,886 \cdot 10^{13} \text{ J. Soit } E_{\text{HYD}} = 16,35 \text{ GW.h.}$$

Le rendement de la centrale est donc : $\eta = E_{\text{élec}}/E_{\text{HYD}} = 14/16,35 = 0,856$. Soit : $\eta = 85,6 \%$.

ACTIVITÉ

2 Rendement global d'une raffinerie

Les statistiques issues de l'Agence internationale de l'énergie donnent pour l'année 2008 les chiffres suivants pour les procédés de raffinage consistant à transformer le pétrole brut en produits pétroliers :

- ▶ pétrole brut raffiné : 3 967 MTEP ;
- ▶ consommation de gaz nécessaire aux processus : 574 kTEP ;
- ▶ produits pétroliers générés : 3 929,15 MTEP.

Déterminer le rendement d'une raffinerie.

b Régime de fonctionnement permanent

Le fonctionnement en **régime permanent** signifie que les paramètres de fonctionnement (températures, tensions, pressions, débits, courants...) sont stables dans le temps : ils peuvent être constants, on parle alors de régime permanent établi, ou périodique et on parle alors de régime permanent périodique (Fig. 3).

Dans le cas du régime permanent établi, on pourra faire un bilan énergétique sur une durée T quelconque, ce qui revient à raisonner en puissance.

Dans le cas du régime permanent périodique, il faudra faire un bilan énergétique sur une période T imposée par le comportement du système étudié. On utilisera les valeurs moyennes sur une période pour faire le bilan énergétique.

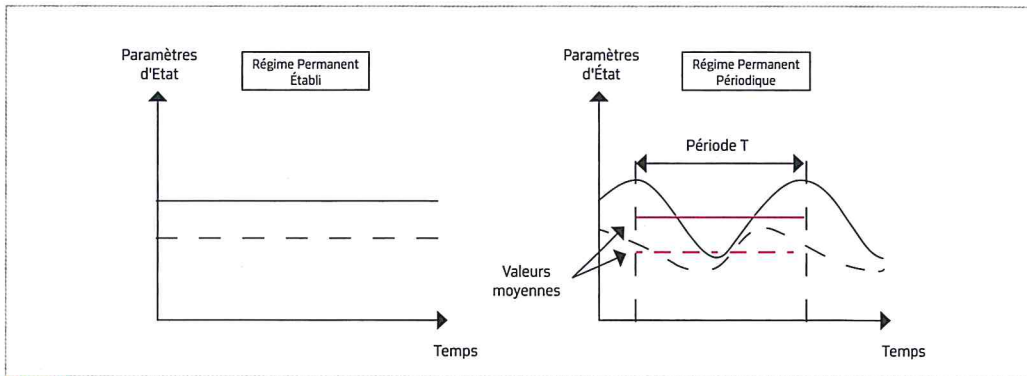
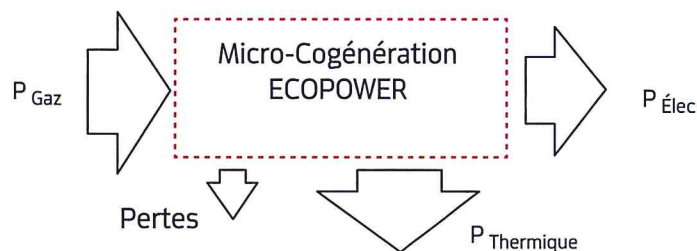


Fig. 3 Caractérisation des régimes permanents

EXEMPLE

Micro-cogénération gaz



Une micro-cogénération est un système permettant de produire à partir d'une énergie combustible chaleur et électricité. On mesure en régime nominal et permanent établi sur le système de micro-cogénération au gaz « ECOPOWER » les valeurs suivantes :

P_{Gaz} kW	$P_{\text{Thermique}}$ kW	$P_{\text{Élec}}$ kW
20	12,5	4,7

En régime permanent les paramètres d'état ne varient pas avec le temps, on peut donc faire un bilan énergétique sur une période de temps quelconque t .

On a : $E = P \times t$, sachant que $\eta = E_{\text{UTILE}}/E_{\text{ABSORBÉE}}$ il vient alors : $\eta = P_{\text{UTILE}} \times t/P_{\text{ABSORBÉE}} \times t$, ou encore : $\eta = P_{\text{UTILE}}/P_{\text{ABSORBÉE}}$

La valeur du rendement électrique de ce système est le rapport de la puissance électrique à la puissance gaz absorbée : $\eta_{\text{élec}} = P_{\text{élec}}/P_{\text{gaz}} = 4,7/20 = 0,235$. Soit : $\eta_{\text{élec}} = 23,5 \%$.

La valeur du rendement thermique de ce système est le rapport de la puissance thermique à la puissance gaz absorbée : $\eta_{\text{therm}} = P_{\text{thermique}}/P_{\text{gaz}} = 12,5/20 = 0,625$. Soit : $\eta_{\text{therm}} = 62,5 \%$.

La valeur du rendement global de ce système est le rapport des puissances utiles thermique et électrique à la puissance gaz absorbée : $\eta_{\text{global}} = (P_{\text{thermique}} + P_{\text{élec}})/P_{\text{gaz}} = (12,5 + 4,5)/20 = 0,85$. Soit : $\eta_{\text{global}} = 85 \%$.

Les pertes de ce système sont donc de 15 % de la puissance absorbée, soit : 3 kW

3 Efficacité énergétique

Cette notion est complémentaire à la notion de rendement. Il s'agit ici de comparer les performances énergétiques globales de différents systèmes ou procédés techniques capables de fournir le même service énergétique. Elle se traduit pour chaque système par l'évaluation de l'énergie primaire nécessaire à la fourniture de ce service énergétique.

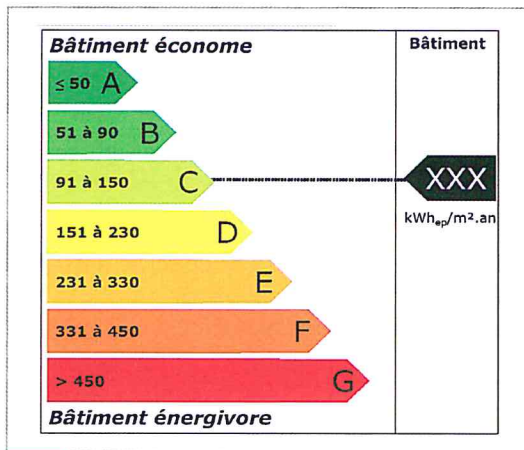


Fig. 4 Étiquette énergie d'un habitat individuel

Aujourd'hui, l'efficacité énergétique fait partie de notre quotidien. Par exemple, lors de l'acquisition d'un bien immobilier ou lors de l'achat d'un bien électroménager, le vendeur ou le fabricant se doivent d'afficher sous forme d'une étiquette énergie l'efficacité énergétique de ce bien. Dans le secteur du bâtiment cette étiquette donne une idée de l'énergie primaire nécessaire permettant de fournir pour un m² de surface habitable et une année les services énergétiques du bâtiment que sont : chauffage, climatisation, production d'eau chaude sanitaire et éclairage.

EXEMPLE

Comparaison de chaînes de production d'énergie électrique

On cherche à définir l'efficacité de deux filières de production d'énergie électrique renouvelable. La première consiste en la valorisation de l'énergie hydraulique via une centrale hydroélectrique, la seconde consiste en valoriser l'énergie chimique d'une biomasse (paille, bois...) via une centrale thermoélectrique.

Type de centrale	Thermique à cycle vapeur	Hydraulique
Énergie primaire	Biomasse	Chute d'eau
Énergie finale en sortie de centrale	Courant électrique Haute tension 50 Hz	Courant électrique Haute tension 50 Hz
Transformations mises en œuvre dans la chaîne d'énergie	Chimique/Thermique : $\eta = 90\%$ Thermique/Mécanique : $\eta = 36\%$ Mécanique/Électrique : $\eta = 95\%$	Hydraulique/Mécanique : $\eta = 90\%$ Mécanique/Électrique : $\eta = 95\%$
Efficacité de la chaîne d'énergie	$\eta = 0,90 \times 0,36 \times 0,95 = 30,8\%$	$\eta = 0,90 \times 0,95 = 85,5\%$

La chaîne de production hydroélectrique est plus efficace du point énergétique que la chaîne de production thermoélectrique.

ÉNERGIES

4 Réversibilité et irréversibilité

Certaines transformations énergétiques sont réversibles. Cela signifie que l'effet utile d'un procédé technique de transformation énergétique peut devenir la dépense, et la dépense l'effet utile. Parmi les procédés techniques présentés dans cet ouvrage on peut citer les procédés réversibles suivants :

- ▶ Moteur électrique/Générateur électrique
- ▶ Turbine/Pompe - Compresseur
- ▶ Éolienne/Ventilateur
- ▶ Moteur Stirling/Pompe à chaleur

a Représentation quatre quadrants (Moteur/Générateur électromécanique)

Un tel système est un convertisseur réversible d'énergie électrique en énergie mécanique.

- ▶ Si l'on raisonne du point de vue de l'énergie mécanique, ce type de convertisseur peut fonctionner :
 - en moteur il fournit de la puissance mécanique Quadrant 1 et 3.
 - en frein, il absorbe de la puissance mécanique Quadrant 2 et 4.
- ▶ Si l'on raisonne du point de vue de l'énergie électrique, ce type de convertisseur peut fonctionner :
 - en récepteur il absorbe de la puissance électrique Quadrant 1 et 3.
 - en générateur, il fournit de la puissance électrique Quadrant 2 et 4.

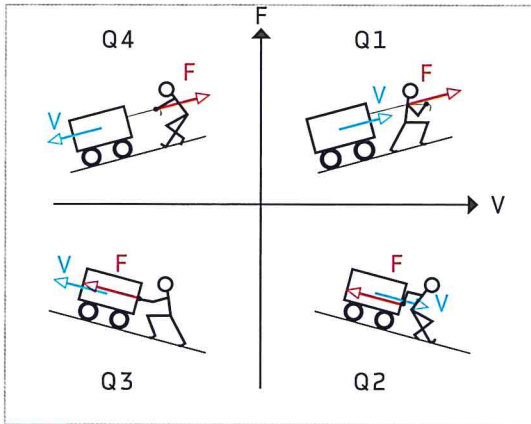


Fig. 5 Quadrant 1, 2, 3 et 4

La figure ci-dessous donne la représentation quatre quadrants d'un moteur / générateur électromécanique.

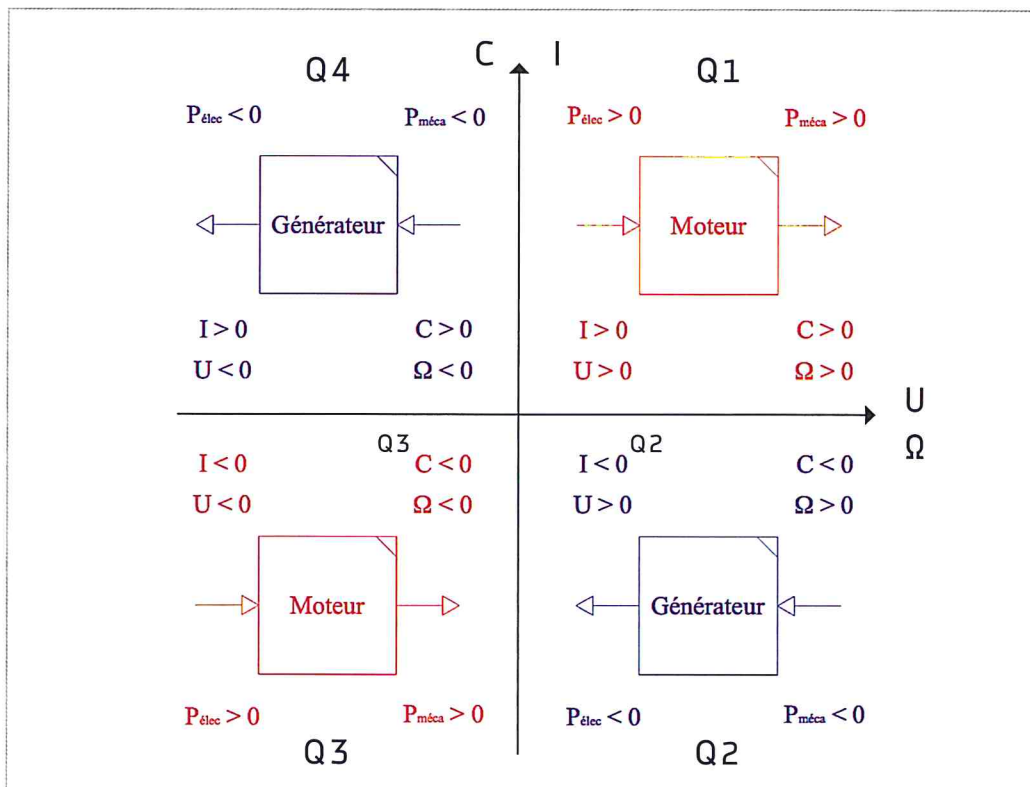


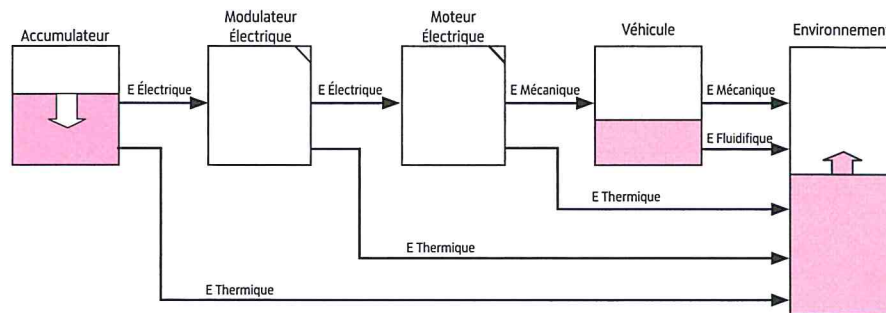
Fig. 6 Représentation quatre quadrants d'un moteur/générateur électromécanique

Pour cette représentation, on utilise la convention récepteur pour l'énergie électrique et la convention générateur pour l'énergie mécanique.

EXEMPLE

Véhicule électrique autonome

Un véhicule automobile électrique est lancé en ville à une vitesse stabilisée de 50 km/h. Une représentation de la chaîne d'énergie dans cette configuration est donnée ci-dessous. Dans cette configuration le moteur du véhicule fonctionne dans le quadrant Q1, puisqu'il consomme de la puissance électrique, pour fournir de la puissance mécanique.



Lors de son freinage, le moteur électrique se transforme en générateur, ce qui conduit à récupérer une partie de l'énergie cinétique stockée par ce véhicule et à la stocker sous forme chimique dans l'accumulateur.

Dans cette configuration le convertisseur électromécanique du véhicule fonctionne dans le quadrant Q2, puisque les roues tournent toujours dans le même sens ($\Omega > 0$), le courant électrique s'inverse et le système absorbe de la puissance mécanique. Une représentation de la chaîne d'énergie dans cette configuration est donnée figure 7.

b Irréversibilité « thermodynamique »

On observe dans le cadre de l'exemple du véhicule que le moteur/générateur électromécanique est l'objet de pertes qui se traduisent par le rejet d'énergie thermique quel que soit le mode de fonctionnement (moteur ou générateur). Ainsi si l'on transforme une énergie électrique en énergie mécanique, il sera impossible de récupérer en inversant le mode de fonctionnement l'intégralité de l'énergie fournie. Ce phénomène qui est observé pour toutes les transformations réelles est appelé : irréversibilité thermodynamique.

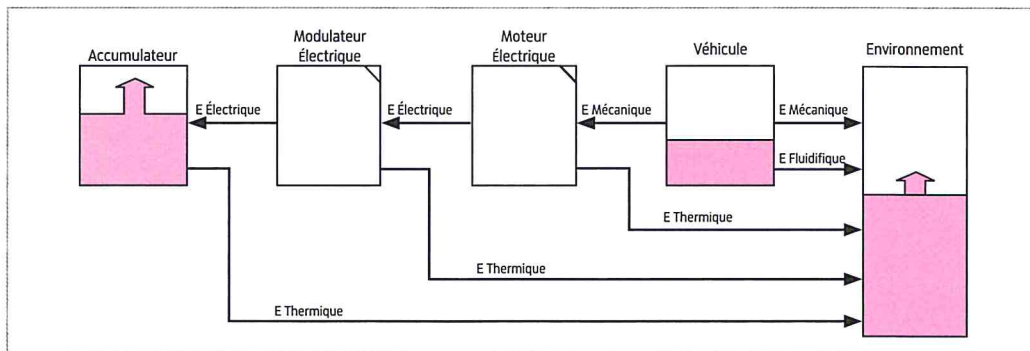


Fig. 7 Irréversibilité thermodynamique

SYNTHÈSE

De ce chapitre on peut retenir :

- que le **rendement** est le **rapport de l'effet utile sur la dépense** énergétique, il s'exprime en % ;
- que la notion d'efficacité énergétique est la seule façon de comparer les performances de chaînes de conversions énergétiques concurrentes. Il s'agit alors de définir le **niveau de consommation en énergie primaire de chaque chaîne concurrente** ;

- que toutes les **transformations énergétiques réelles** se font avec **des pertes** énergétiques qui réduisent le rendement ;
- que les transformations réversibles réelles ne le sont pas totalement dans la mesure où elles sont sujettes à des pertes générant une irréversibilité thermodynamique.

ÉNERGIES

Exercices

POUR S'ENTRAÎNER

1 Bilan énergétique d'un drone

Le Drone Parrot est capable de voler en vol stabilisé grâce à quatre hélices motorisées pilotées par microcontrôleur. L'énergie stockée par les accumulateurs embarqués par le drone est de 11,1 W.h.

La puissance électrique absorbée sous forme fluïdique et thermique par chaque moteur dans ces conditions est de 14 W.

En supposant que les moteurs sont les consommateurs principaux d'énergie, évaluer la durée d'un vol stabilisé.

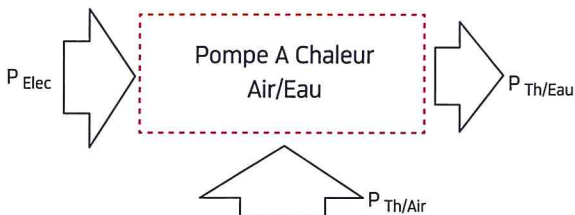
2 Rendement d'un capteur solaire

Un ensemble de capteurs solaires d'une surface utile totale de 5,5 m² reçoit un éclairage solaire d'une valeur de 850 W/m².

Le débit d'eau traversant l'ensemble des capteurs est de 220 litres par heure. L'écart de température entrée-sortie de l'eau lors de son parcours au travers de capteurs est de 10 °C.

Déterminer la valeur du rendement des capteurs solaires, ainsi que la valeur de la puissance perdue.

3 Bilan énergétique d'une pompe à chaleur



Une pompe à chaleur, air/eau est un système permettant de chauffer un débit d'eau chaude basse température à partir d'électricité et d'énergie thermique prélevée sur l'air extérieur.

Un résultat d'essai donne les valeurs suivantes : $T_{ext} = 7\text{ °C}$.
Puissance électrique consommée par le compresseur : 2,32 kW.

Puissance calorifique ECBT : 8,6 kW.

- En réalisant un bilan énergétique, estimer la valeur de la chaleur prélevée sur l'air extérieur.
- Déterminer alors le rendement utile en mode chaud appelé aussi COP chaud.

4 Rendement d'un capteur solaire photovoltaïque

Un capteur photovoltaïque d'une surface utile de 0,92 m² est éclairé par un flux lumineux de 900 W/m². Il produit alors un courant continu de 3,84 Ampères sous une tension de 26 Volts.

Déterminer le rendement de ce capteur.

5 Rendement d'une turbine vapeur

Une turbine vapeur fonctionne en régime permanent établi. Elle est alors alimentée avec un débit de 33 tonnes par heure. La vapeur entre avec une énergie massique de 3 631 kJ/kg et ressort avec une énergie massique de 2 255 kJ/kg.

La turbine tourne alors à une vitesse de 3 000 tours par minute et fournit un couple de 36,1 kN.m.

Déterminer le rendement de cette turbine.

6 Rendements d'une centrale thermoélectrique

Une centrale thermique au charbon absorbe un débit d'antracite de 3,5 t.h⁻¹. Elle restitue un courant électrique triphasé par phase de 320 A efficace, sous une tension entre phase de 20 kV efficace. La génératrice a un facteur de puissance de : 0,9.

Déterminer le rendement sur PCI de cette centrale thermique. On donne le PCI de l'antracite : 36 160 kJ.kg⁻¹.

POUR ALLER PLUS LOIN

7 Rendement d'une chaudière à condensation

On mesure en fonctionnement permanent périodique sur une chaudière gaz à condensation, les grandeurs suivantes :

Durée de la période	15 minutes
Volume de gaz consommé sur une période	320 normaux litres
Temps de marche du brûleur	10 minutes
Température moyenne de retour de l'eau vers la chaudière	39,8 °C
Température moyenne de départ de l'eau de la chaudière	45 °C
Débit d'eau	2 200 litres par heure

Déterminer la valeur du rendement sur PCI et sur PCS, et des pertes de la chaudière.

On rappelle : $c_{p, \text{eau}} = 4\,185\text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

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

$\text{PCI}_{\text{gaz}} = 36\,500\text{ kJ.nm}^{-3}$ et $\text{PCS}_{\text{gaz}} = 40\,600\text{ kJ.nm}^{-3}$

8 **AC EE**
Comparaison de solutions techniques de chauffage

Une maison de 145 m² habitable a des besoins annuels en chauffage et en production d'eau chaude sanitaire de l'ordre de 11 000 kW.h, on souhaite comparer les performances énergétiques de 3 systèmes permettant de couvrir ces besoins : une chaudière gaz à condensation, une chaudière à granule de bois et une pompe à chaleur eau/eau géothermique (voir tableau).

La consommation des auxiliaires électriques (pompes) est estimée à : 440 kW.h.

Le rendement global de la production centralisée d'électricité : 38,7 %.

Les consommations en énergie électrique hors chauffage sont de 3 500 kW.h.

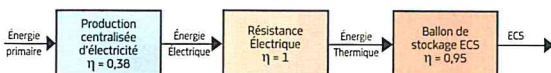
- Déterminer les besoins locaux en énergie finale exprimés en kW.h de chaque solution.
- Déterminer les besoins locaux en énergie primaire exprimés en TEP de chaque solution.
- Déterminer les émissions en CO₂, ainsi que le coût annuel en énergie de chaque solution.
- En déduire le ratio énergétique de cette maison en kW.hep/m² (voir tableau).

	Chauffage au gaz naturel	Chauffage au granule de bois	Chauffage par PAC
Rendement moyen annuel	95,1 %/PCI	80 %/PCI	COP = 3
Ratio $E_{\text{primaire}}/E_{\text{finale}}$	1,11	1,08	2,58
Ratio CO ₂ non renouvelable/ E_{finale}	206 gCO ₂ /kW.h	0 gCO ₂ /kW.h	180 gCO ₂ /kW.h
Coût approximatif €/kW.h E_{finale}	0,053	0,04	0,11

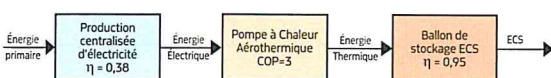
9 **AC EE**
Efficacité énergétique d'un chauffe-eau

On souhaite produire de l'eau chaude sanitaire pour couvrir des besoins énergétiques de 2500 kW.h/an. Plusieurs systèmes s'offrent à nous :

► un chauffe eau électrique



► un chauffe eau thermodynamique



► un chauffe associé à une chaudière Gaz



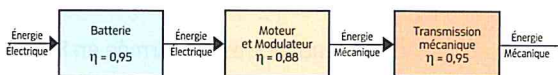
À partir des chaînes d'énergie présentée ci-dessous et des rendements fournis pour chaque composant, déterminer l'efficacité énergétique de chacune d'entre elle.

10 **EE ITEC**
Efficacité énergétique d'un moteur de véhicule automobile

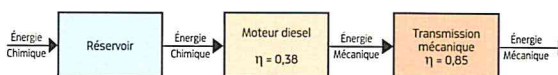
On souhaite comparer les performances énergétiques de deux chaînes d'énergie permettant de motoriser un véhicule automobile citadin. Les besoins énergétiques de ce véhicule en cycle urbain sont estimés à 60 W.h/km.

Les schémas qui suivent présentent les chaînes d'énergies embarquées par le véhicule dans le deux cas, et les valeurs moyennes des rendements de chaque constituant de ces chaînes.

► Moteur électrique



► Moteur thermique diesel



- Déterminer les consommations moyennes en énergie de ces deux motorisations pour un kilomètre parcouru en cycle urbain.

2. Efficacité

L'énergie électrique n'étant pas une énergie primaire, on donne le rendement moyen des chaînes d'énergies permettant de produire de manière centralisée l'énergie électrique à partir d'énergie dite primaire :

$$\text{prod}_{\text{centralisée}} = 0,38$$

On considérera que l'énergie chimique déterminée à l'entrée du moteur diesel est une énergie primaire.

En déduire les consommations en énergie primaire de chaque solution.

3. Réversibilité

Le moteur électrique et son modulateur sont capables de récupérer de l'énergie lors des phases de freinage, on récupère ainsi 23 % de l'énergie primaire nécessaire.

Déterminer les consommations en énergie primaire du véhicule électrique dans ce cas.

Conclure quant à l'efficacité de chacune des chaînes d'énergie.

Objectifs

- Être capable d'identifier les activités humaines qui consomment le plus d'énergie et les paramètres à l'origine de ces consommations
- Être capable d'identifier les besoins réels en énergie
- Caractériser la demande d'un point de vue temporel

12

BESOINS ÉNERGÉTIQUES

1 Besoins en énergie finale – État des lieux

L'énergie finale est ici l'énergie dont l'utilisateur va se servir pour répondre à ses besoins.

C'est l'énergie qui va alimenter la chaîne d'énergie locale, celle qu'il paye et qui est mise à disposition par les chaînes de production.

On l'appellera aussi dans ce chapitre énergie finale absorbée.

a Quelle est l'énergie finale la plus consommée ?

Les besoins en énergie des activités humaines s'expriment au travers de la consommation en énergie finale.

La figure 1 montre que nous avons aujourd'hui essentiellement recours aux produits pétroliers.

Cette tendance est confirmée en France avec près de 46 % de l'énergie finale consommée, sur un total de 165,5 MTEP en 2008.

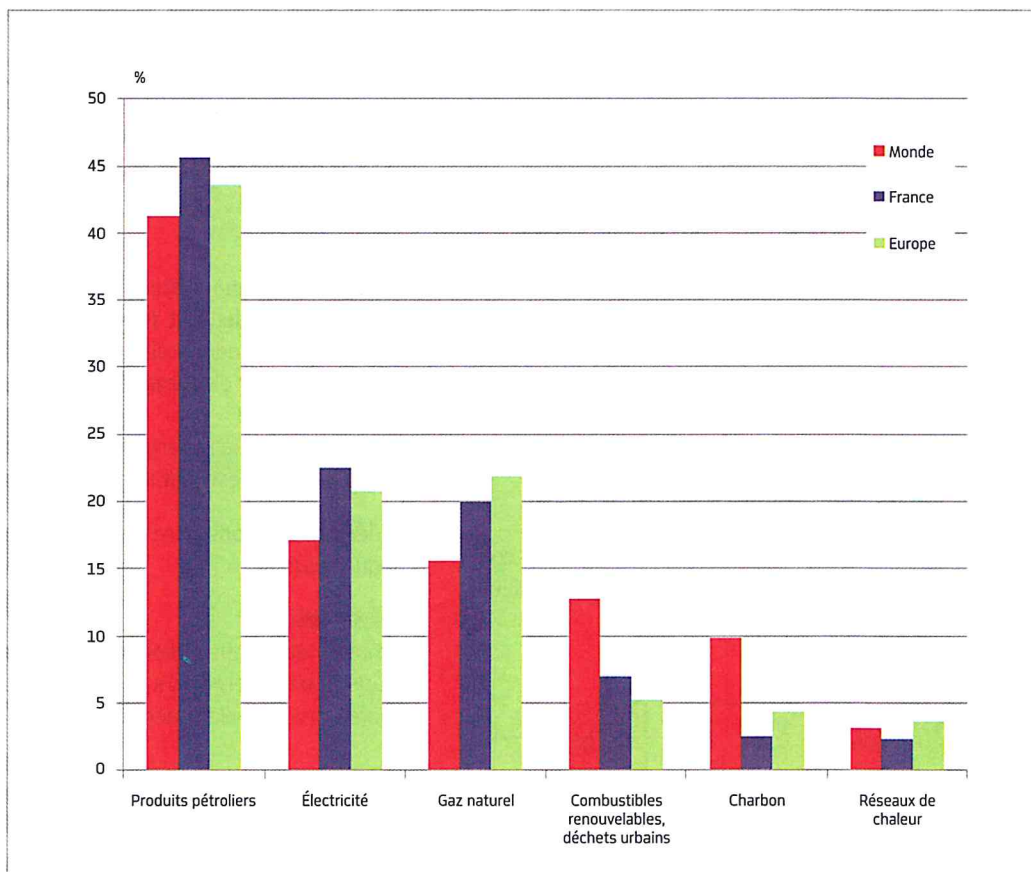


Fig.1 Répartition des consommations en énergie finale