

## Objectifs

- Décrire les principes de fonctionnement des moteurs thermiques et des pompes à chaleur
- Exploiter les caractéristiques comportementales des moteurs thermiques et des pompes à chaleur
- Proposer une solution technologique adaptée au cahier des charges

# 14 TRANSFORMATIONS D'ÉNERGIES MÉCANIQUE/THERMIQUE

## 1 Applications mettant en œuvre la transformation

Dans ce chapitre nous présenterons les machines qui permettent de transformer de l'énergie thermique en énergie mécanique. Ces machines trouvent, entre autres, des applications dans les domaines :

- ▶ du transport (se déplacer, déplacer une matière), exemple : véhicule hybride ;
- ▶ de l'habitat et du bâtiment, exemple : système de cogénération ;
- ▶ de l'industrie de l'énergie, exemple : centrales thermiques et nucléaires.

Nous présenterons également les machines qui, à partir d'énergie mécanique, transfèrent et produisent de l'énergie thermique. Il s'agit en particulier des systèmes appelés pompe à chaleur, qui trouvent leurs applications dans le domaine de l'habitat et du bâtiment pour répondre aux besoins en chauffage, climatisation et en production d'eau chaude sanitaire.

### a La cogénération

Un système de cogénération est un système qui permet de produire et de valoriser, à partir d'une même énergie primaire, à la fois de l'énergie thermique et électrique. Les systèmes de cogénération de très petite puissance utilisés dans l'habitat sont appelés micro-cogénération.

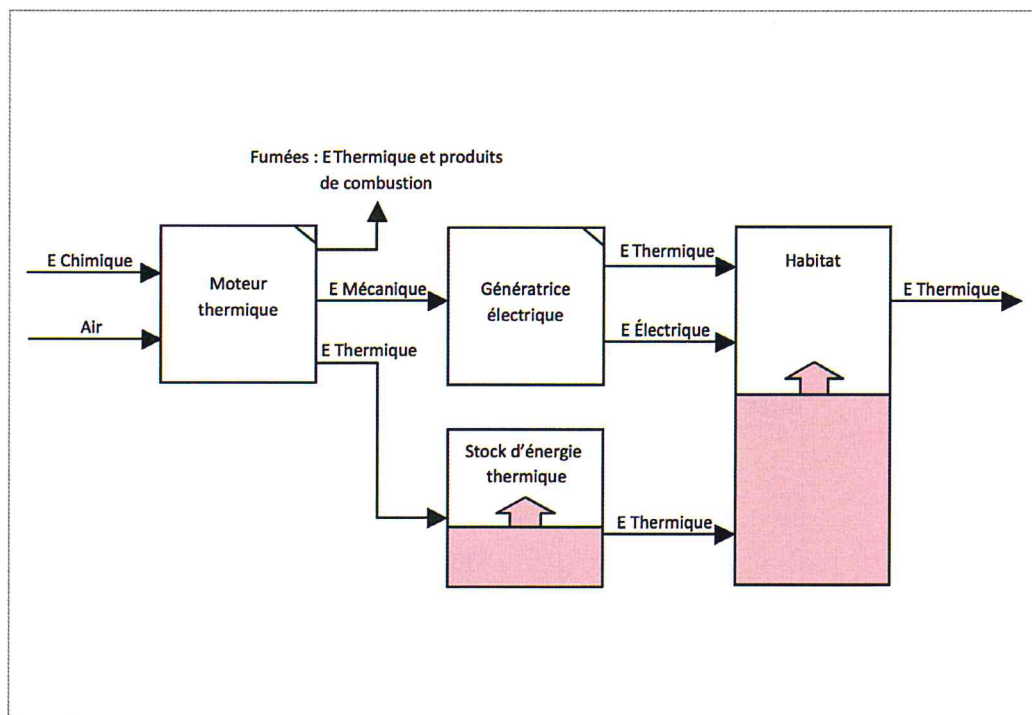


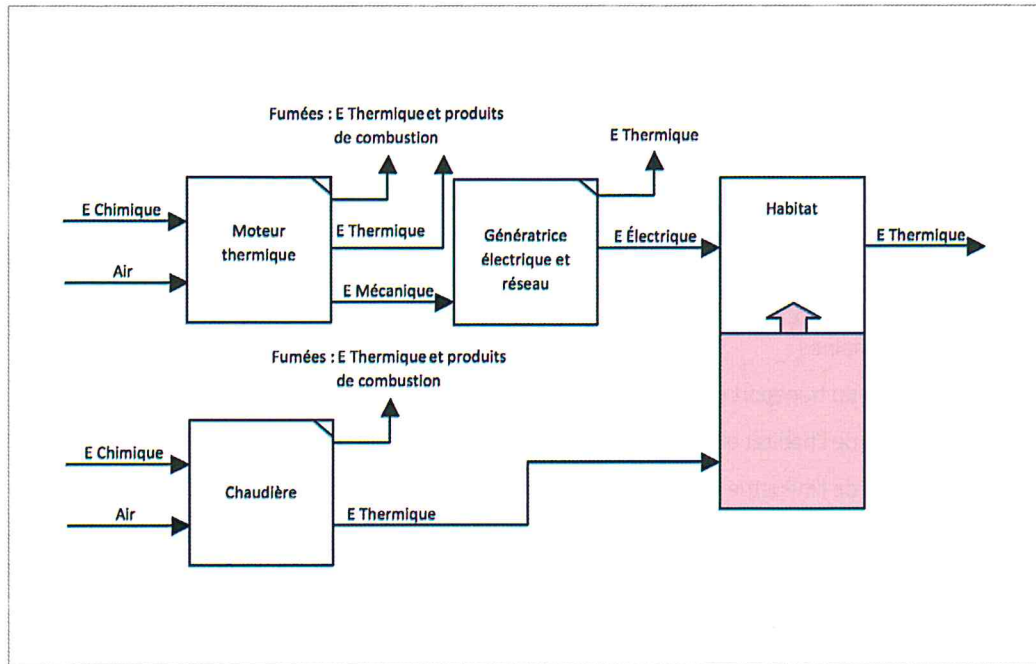
Fig. 1 Système de micro-cogénération

### EXEMPLE

La chaîne d'énergie représentée sur la figure. 1 est un système de micro-cogénération ; il permet d'apporter l'énergie thermique et électrique nécessaire à un habitat.

## b Centrale thermique

C'est un système qui est capable de produire de l'énergie électrique à partir d'une source de chaleur produite par un combustible.



**Fig. 2** Association d'un système centralisé de production d'énergie électrique et d'une production locale de chaleur

### EXEMPLE

La chaîne d'énergie représentée figure 2 est l'association d'un système centralisé de production d'énergie électrique et d'une production locale de chaleur, permettant de répondre aux mêmes besoins de cet habitat.

Dans le cas de la figure 1, l'énergie thermique produite par le moteur est restituée à l'habitat. Dans le cas de la figure 2, l'énergie thermique n'est pas valorisée.

L'intérêt de la cogénération est donc de produire en local l'énergie thermique et électrique nécessaire à l'habitat, ce qui permet de se passer de la chaudière, et sans doute d'avoir une meilleure utilisation de l'énergie chimique primaire dans la mesure où on valorise l'énergie thermique produite par le moteur.

### ACTIVITÉ 1 Intérêt de la cogénération

La lecture de la documentation technique d'une cogénération et d'une chaudière nous donne :

Rendement	Cogénération	Chaudière	Centrale thermique
Électrique	30 %	/	30 %
Thermique	65 %	92 %	/
Global	95 %	92 %	30 %

À partir de ces données et des figures 1 et 2, en supposant que les besoins en énergies électrique et thermique journaliers d'un immeuble sont respectivement de 200 [kW.h] et de 650 [kW.h], évaluer l'économie d'énergie primaire réalisable grâce à une cogénération.

## 2 Notion de cycle thermodynamique

Les moteurs thermiques sont des machines dites thermodynamiques. On peut décrire en partie leur fonctionnement dans un diagramme pression, volume, appelé diagramme de Clapeyron.

Dans ce diagramme les isothermes  $T$  sont des courbes incurvées vers le bas.

### EXEMPLE

#### Cycle moteur de STIRLING

Première étape	Deuxième étape
<p>On chauffe un volume de gaz sans faire varier son volume (transformation isochore). La température et la pression augmentent.</p>	<p>On relâche le piston, il se déplace et fournit un travail mécanique (énergie mécanique) l'ensemble restant à la température chaude (détente isotherme).</p>

On a réussi à transformer une énergie thermique en énergie mécanique.

Pour recommencer le cycle, il faut ramener le gaz dans la situation initiale.

Pour cela il faut le refroidir, et le comprimer.

Troisième étape	Quatrième étape
<p>On refroidit le gaz sans faire varier son volume (transformation isochore). La température et la pression diminuent.</p>	<p>On appuie sur le piston, il se déplace et comprime le gaz en absorbant un travail mécanique (énergie mécanique) l'ensemble restant à la température froide (détente isotherme).</p>

On doit retenir que pour faire un cycle thermodynamique, il faut :

- ▶ un échange de chaleur au contact d'une source « chaude » ;
- ▶ un échange de chaleur au contact d'une source « froide ». Les machines thermiques sont donc forcément bi-thermes (deux températures) ;
- ▶ apporter une énergie mécanique afin de réaliser la compression.

En général, cette énergie est prélevée sur l'énergie motrice créée lors de la phase de détente.

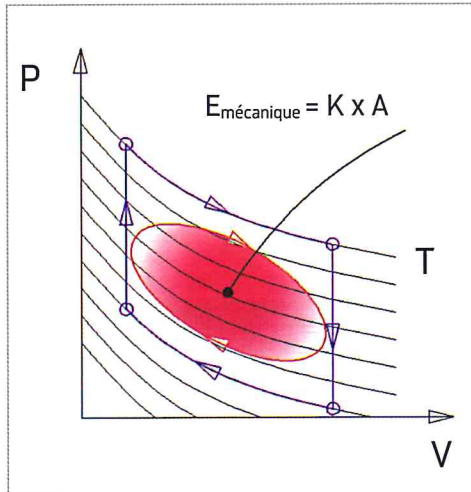


Fig. 3 Cycle Stirling théorique et réel

Pour un cycle réel (voir figure 3), les transformations ne se réalisent pas de manière aussi schématisée : les différentes étapes se mêlent les unes aux autres, les transferts énergétiques ne se font pas de manière idéale... Ce qui conduit à l'obtention d'un cycle réel (en rouge).

Il faut noter que l'énergie produite par un cycle réel est proportionnelle à sa surface A dans le diagramme PV. Ainsi pour augmenter l'énergie mécanique par cycle, il faut :

- ▶ augmenter le volume appelé aussi cylindrée du moteur ;
- ▶ augmenter la différence entre les pressions et températures les plus hautes et les plus basses.

## 3 Moteurs thermiques

On peut distinguer deux familles de moteurs thermiques :

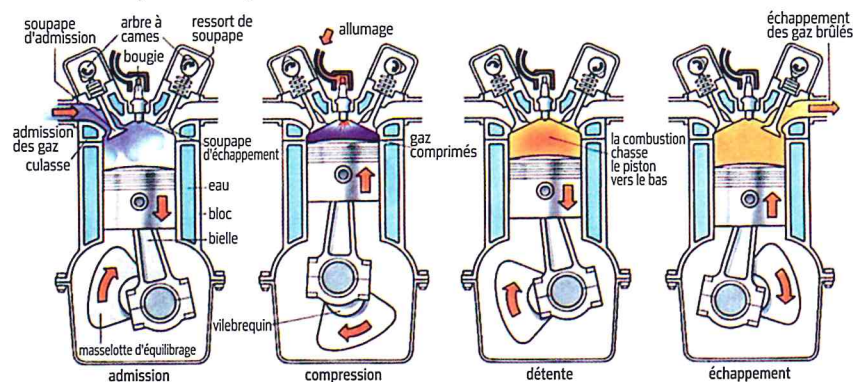
- ▶ **les moteurs thermiques à combustion interne (MACI)**, pour lesquels la libération de l'énergie thermique nécessaire au moteur se fait à l'intérieur du cylindre moteur grâce à la combustion d'un mélange combustible comburant ;
- ▶ **les moteurs à combustion externe (MACE)**, pour lesquels l'apport de l'énergie thermique se fait par l'extérieur du cylindre, il s'agit en particulier des moteurs type STIRLING.

Les moteurs thermiques à combustion interne sont les moteurs thermiques les plus répandus sur le marché, et nous les connaissons relativement bien puisqu'ils équipent la plupart des véhicules automobiles. Il s'agit en particulier des moteurs type Stirling.

### a Comment fonctionne un MACI ?

#### EXEMPLE

#### Moteur à essence à quatre temps



Description du cycle :

- ▶ premier temps : admission du mélange à brûler ;
- ▶ deuxième temps : compression du mélange à brûler, cette phase se termine par l'allumage du mélange inflammable ;
- ▶ troisième temps : détente des gaz brûlés chauds (travail moteur) ;
- ▶ quatrième temps : évacuation des gaz chauds et refroidissement.

La source chaude est apportée par le combustible.

La source froide est l'eau de refroidissement du moteur.

La transformation du mouvement de translation en mouvement de rotation, est réalisée grâce à un système à bielle et vilebrequin. Cette configuration est une des plus classiques.

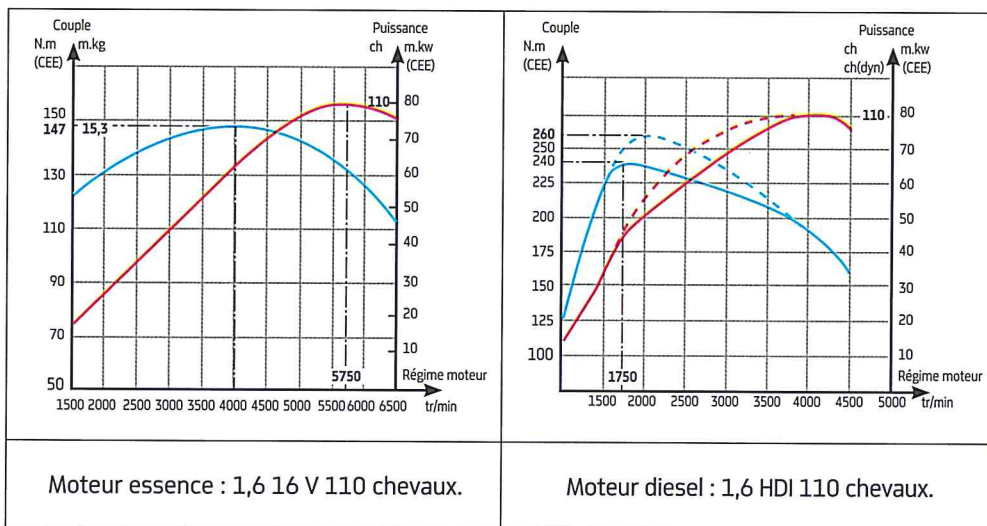
Le moteur est équipé de quatre pistons à plat montés sur le vilebrequin par groupe de 2 à 180°, un seul d'entre eux est moteur à la fois, les autres exploitent une partie de l'énergie mécanique produite pour réaliser leur travail.

**b Quelles sont les performances d'un MACI ?**

**EXEMPLE**

**Performances mécaniques de deux motorisations en régime nominal**

Les graphiques ci-dessous montrent l'évolution de la puissance en rouge et du couple moteur en bleu pour deux motorisations concurrentes.



**► Caractéristiques nominales**

On observe tout d'abord que le moteur est prévu pour fonctionner sur une plage de fréquence de rotation. Le couple sur cette plage a une forme de « cloche ».

La puissance mécanique croît assez régulièrement avec la fréquence de rotation jusqu'à un maximum puis chute brutalement. Ceci s'explique la perte de couple lorsque la fréquence de rotation augmente.

On note également la différence de comportement entre les motorisations essence et diesel. Le moteur diesel offrant un couple plus important que le moteur à essence. Cette différence s'explique par la nécessité dans le cycle diesel de fonctionner avec un taux de compression bien plus élevé, qui induit un rapport entre les pressions hautes et faibles plus important que pour le moteur essence.

**► Variation du régime de fonctionnement**

Le gros avantage des MACI est leur capacité à s'adapter rapidement à la demande de la charge.

La figure 4 représente (en bleu) le couple résistant généré par un véhicule. En rouge, le couple moteur en fonctionnement nominal. Le point d'intersection de ces deux courbes repéré 1 est le point de fonctionnement en régime nominal. Il indique la vitesse de rotation maximale  $\Omega_1$  atteinte par le moteur associée à cette charge. La courbe verte représente le couple moteur obtenu grâce à une diminution du débit de combustible afin d'atteindre la vitesse de rotation moteur  $\Omega_2$ .

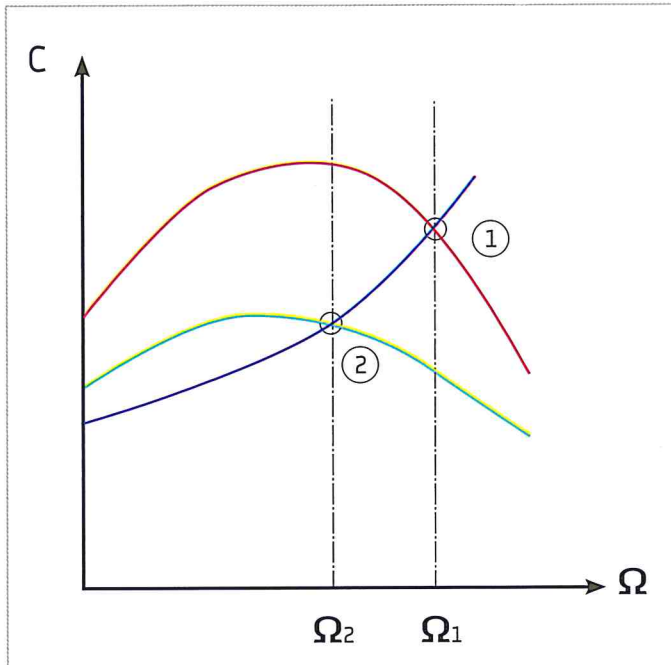


Fig. 4 Adaptation du couple moteur au couple résistant

### ► Association d'un MACI avec un véhicule, consommations

Pour les véhicules, le plus important c'est leur consommation d'énergie. Elle s'exprime en litre de carburant aux 100 kilomètres. Elle est donnée sur la base de parcours du véhicule sur des cycles normalisés dits urbains, extra-urbains et mixtes.

### EXEMPLE

#### Consommation d'un véhicule en cycle mixte

Voiture essence : Citroën C4 1.6 16 V 110 Ch, consommation cycle mixte : 7,1 L/100 km.

Voiture diesel : Citroën C4 1.6 HDI 110 Ch, consommation cycle mixte : 4,5 L/100 km.

PCI essence = 9,19 kW.h.l<sup>-1</sup>.

PCI gazole = 10,05 kW.h.l<sup>-1</sup>.

Pour ces deux véhicules, le besoin en énergie sur un cycle mixte est évalué à 0,15 kW.h/km.

On peut alors déterminer le rendement énergétique de ces véhicules :

- énergie nécessaire sur 100 km de cycle mixte : 15 kW.h ;
- énergie consommée sur PCS par le moteur essence :  $E_{\text{consommée}} = 7,1 \times 9,19 = 65,25 \text{ kW.h}$  ;
- énergie consommée sur PCS par le moteur diesel :  $E_{\text{consommée}} = 4,5 \times 10,05 = 45,23 \text{ kW.h}$  ;
- efficacité du moteur thermique essence associé au véhicule Citroën C4 :  $\eta_{\text{PCI}} = 15/65,25 = 22,9 \%$  ;
- efficacité du moteur thermique diesel associé au véhicule Citroën C4 :  $\eta_{\text{PCI}} = 15/45,23 = 33,16 \%$ .

### c Performances de l'hybridation

Un véhicule hybride est composé de deux types de motorisation : thermique à essence et électrique. La motorisation électrique étant réversible, une batterie électrique permet de stocker l'énergie électrique produite pendant les phases de décélération. Il est alors possible pour un véhicule de caractéristiques équivalentes en termes de masse déplacée et de puissance mécanique d'atteindre une consommation en cycle mixte de 4,3 L/100 km. L'efficacité de l'ensemble motorisation + véhicule passe alors à :  $\eta_{\text{PCI}} = 15/(4,3 \times 9,19) = 37,96 \%$ , contre 20,7 % pour un véhicule « traditionnel ».

**d Comment fonctionne un MACE ?**

**EXEMPLE**

**Moteur STIRLING équipant les produits Sunmachine®**

Combustible : granulé de bois.

Énergies produites : ▶ thermique → eau chaude basse température ;

▶ électrique → courant alternatif monophasé 230 V 50 Hz.

Type de moteur : alpha.

Volume de cylindre : 520 cm<sup>3</sup>.

Vitesse de rotation : 500-1 000 tours/min.

Gaz de travail : azote.

Pression de travail : 33 bar.

Maintenance : toutes les 80 000 heures.

Bruits : 49-54 dB.

Poids : env. 350 kg.

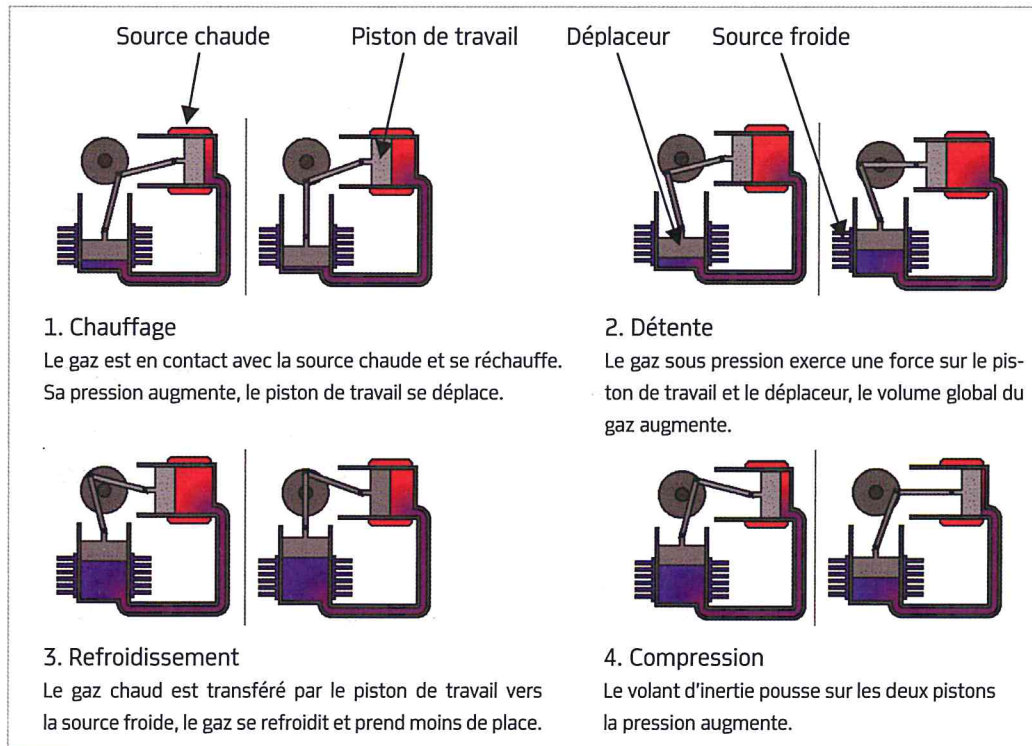
Dimensions (p x l x h) : 800 x 1 200 x 1 500.

La source chaude est apportée par le combustible.

La source froide est l'eau de refroidissement du moteur.

Le moteur est équipé de deux pistons positionnés à 90° et déphasés sur le vilebrequin d'un angle de 45°. Un seul d'entre eux est moteur, il est appelé piston principal. L'autre exploite une partie de l'énergie mécanique produite pour réaliser le travail de déplacement du gaz, il est donc appelé déplaceur.

**e Description du cycle d'un moteur Stirling de type Alpha**



**Fig. 5** Cycle

**f Quelles sont les performances d'un MACE ?**

Les moteurs thermiques à combustion externe présentent l'avantage de pouvoir valoriser toute source de chaleur.

ÉNERGIES

## EXEMPLE

Associés à un miroir parabolique, les MACE permettent de produire de l'énergie électrique à partir d'énergie solaire.

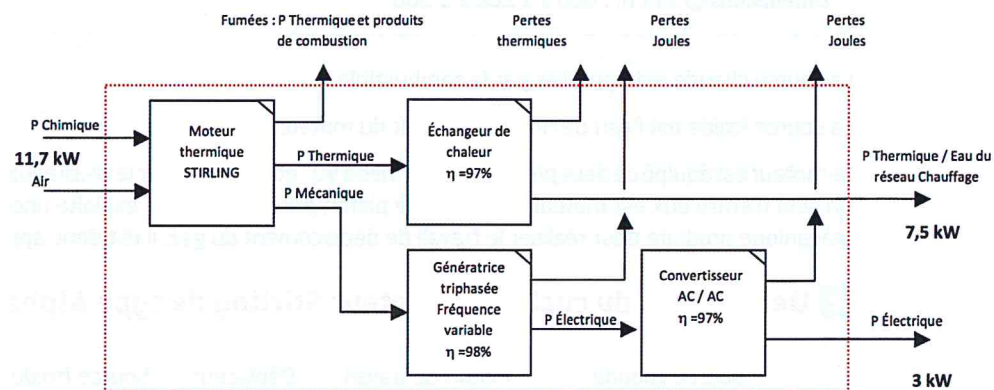
L'efficacité de la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique est de l'ordre de 22 %, ce qui met en compétition ces systèmes avec la filière photovoltaïque.



## EXEMPLE

### Performances énergétiques de la chaîne d'énergie Sunmachine®

Le moteur thermique étant intégré dans la chaîne d'énergie, il est possible de connaître ses performances à partir des données globales fournies par le constructeur en régime de fonctionnement nominal.



On a ainsi pour le moteur :  $P_{\text{mécanique}} = 3 / (0,97 \times 0,98) = 3,15 \text{ kW}$ .

$P_{\text{thermique}} = 7,5 / 0,97 = 7,73 \text{ kW}$ .

On en déduit : un rendement mécanique du moteur de 26,9 %.

Un rendement thermique de 66 % et rendement global de 92,9 %.

#### ► Variation du régime de fonctionnement

À l'inverse de MACI ils sont assez lents à réagir. Une modification de la puissance absorbée aura ainsi un effet sur la puissance mécanique retardé en fonction de la quantité de chaleur emmagasinée dans la machine. On peut d'ailleurs constater que ces moteurs continuent à produire un travail mécanique alors même que l'apport en chaleur est arrêté. Cette difficulté à réagir vite à la demande en puissance les conduit à être utilisés en cogénération.

#### ► Réversibilité

Une machine de Stirling est par nature réversible. En lui fournissant une énergie mécanique elle produira un déplacement de chaleur depuis la source froide vers la source chaude, et deviendra une pompe à chaleur.

## 4 Les turbines

Dans le cadre de la production d'électricité centralisée, les besoins en puissance sont énormes et dans ce cas les moteurs thermiques sont plus adaptés. En effet, leurs dimensions deviendraient trop importantes. On a alors recours aux turbines qui ont la propriété de produire davantage de puissance avec des machines bien plus compactes.



### a Les turbines à combustion interne ou turbine à gaz

Ces machines sont similaires aux réacteurs d'avion. Elles sont composées de trois parties principales :

- ▶ un compresseur centrifuge (1), qui permet d'amener de l'air sous une pression de 10 à 30 bars dans la chambre de combustion ;
- ▶ une chambre de combustion (2), dans laquelle un combustible est injecté sous pression et brûlé avec l'air comprimé ;
- ▶ une turbine (3) dans laquelle les gaz brûlés à haute température sont détendus, c'est elle qui transforme l'énergie thermodynamique en énergie mécanique.

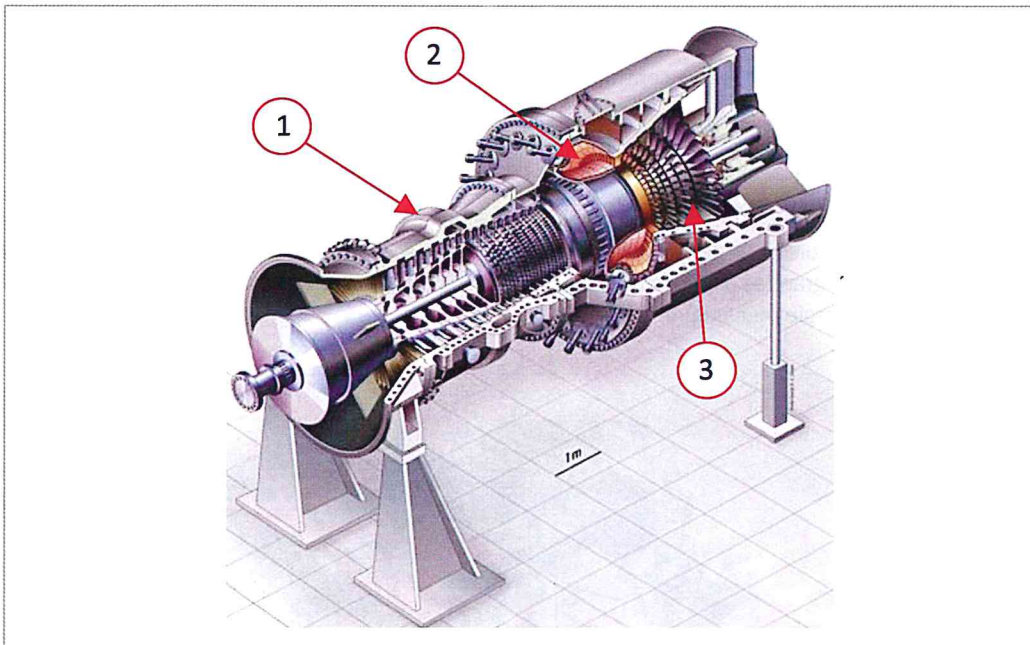


Fig. 5 Turbines à combustion interne

Le rendement d'une turbine à gaz est lié à la détente des gaz chauds. Il ne dépend pas forcément du combustible utilisé, qui est du gaz.

ÉNERGIES

#### EXEMPLE

##### Turbine à gaz pour centrale électrique

Caractéristiques nominales :

- ▶ puissance électrique : 47 MWe ;
- ▶ combustible : gaz naturel ;
- ▶ fréquence : 50/60 Hz ;
- ▶ rendement global : 37,5 % ;
- ▶ consommation de chaleur : 9 597 kJ/kWh ;
- ▶ vitesse de la turbine : 6 608 tr/min ;
- ▶ taux de compression : 19 ;
- ▶ débit-masse des gaz d'échappement : 131,5 kg/s ;
- ▶ température d'échappement : 544 °C.

### b Performances des turbines à gaz

#### ▶ Gamme de puissance

Il est possible de réaliser des turbines de très petite taille et la gamme de puissance nominale est donc très étendue : 10 W à 400 MW.

#### ▶ Efficacité

Pour les centrales thermoélectriques utilisant des turbines à gaz de forte puissance l'efficacité énergétique est de l'ordre de 35 %. C'est-à-dire que l'on produit 350 kWh d'énergie électrique pour 1 MW.h d'énergie primaire combustible consommée.

## ► Variation du régime de fonctionnement

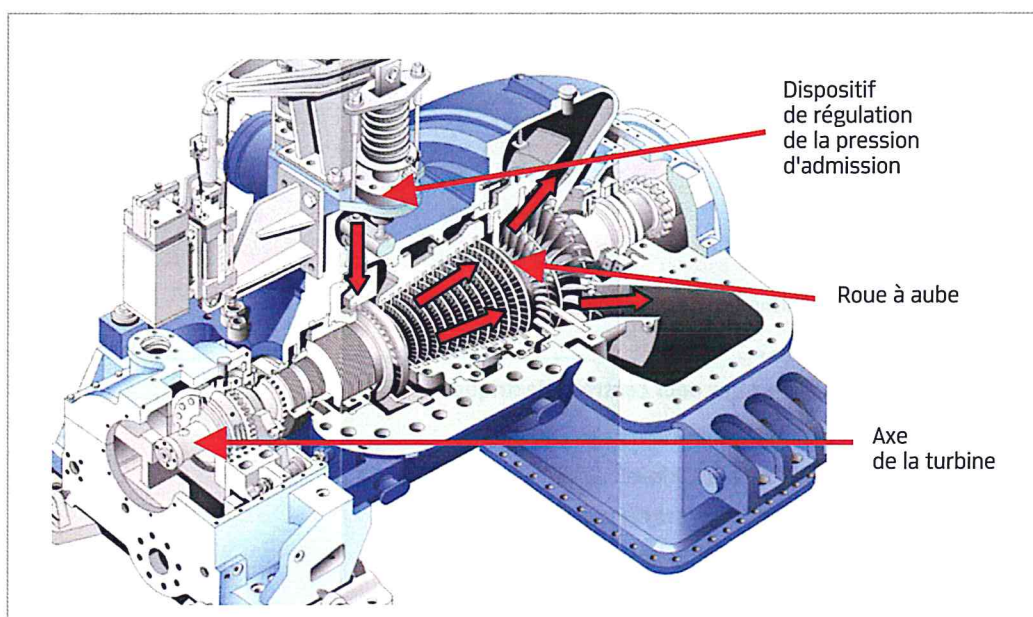
La puissance des turbines à gaz peut être réglée en faisant varier le débit de combustible. Leur longévité est cependant d'autant plus importante qu'elles sont utilisées autour d'un régime de fonctionnement constant. Par ailleurs, le rendement de ces turbines est maximum en régime nominal.

## ■ Les turbines vapeur

Ces turbines utilisent de la vapeur haute pression produite par une chaudière vapeur. Ces chaudières utilisent une source d'énergie primaire qui peut être variée :

- énergie nucléaire → centrale nucléaire ;
- charbon, pétrole, gaz → centrale thermique classique ;
- énergie solaire → centrale solaire thermique, appelées « héliothermiques » ;
- énergie géothermique → centrale géothermique ;
- biomasse ou déchet urbains → centrale associée aux usines d'incinération.

La turbine est composée de plusieurs étages de roues à aubes. Comme pour la turbine à gaz, le sens d'écoulement de la vapeur va des roues les plus petites (zone de pression forte), vers les roues les plus grandes (zone de pression faible). Ces roues à aubes sont solidaires de l'axe tournant qui fournira l'énergie mécanique.



**Fig. 6** Turbines vapeur moyenne pression

### EXEMPLE

#### Turbine à vapeur ST 300 pour centrale électrique

Caractéristiques nominales :

- puissance mécanique : 50 MW ;
- vitesse de la turbine : 12 000 tr/min ;
- pression d'alimentation : 120 bar ;
- température vapeur d'alimentation : 500 °C ;
- pression de sortie : 16 bar ;
- température de refoulement : 230 °C ;
- débit de vapeur d'eau : 105 kg/s ;
- dimensions : L = 12 m, l = 4 m, h = 5 m.

**d Performances des turbines vapeur**

**▷ Gamme de puissance**

La gamme de puissance nominale est donc très étendue : 45 kW à 2 000 MW.

**▷ Efficacité**

Pour les centrales thermoélectriques utilisant des turbines à vapeur seule, l'efficacité énergétique est de l'ordre de 30 %. C'est-à-dire que l'on produit 300 kW.h d'énergie électrique pour 1 MW.h d'énergie primaire combustible consommée.

**▷ Variation du régime de fonctionnement**

La puissance des turbines à vapeur peut être régulée en faisant varier la différence de pression entrée sortie de la vapeur d'alimentation. Ce sont des machines robustes et fiables.

**5 Les pompes à chaleur**

À la manière d'un réfrigérateur, ces machines transfèrent de la chaleur d'une source froide (corps à une température faible) vers une source chaude (corps à une température forte). C'est pourquoi on les appelle pompes à chaleur.

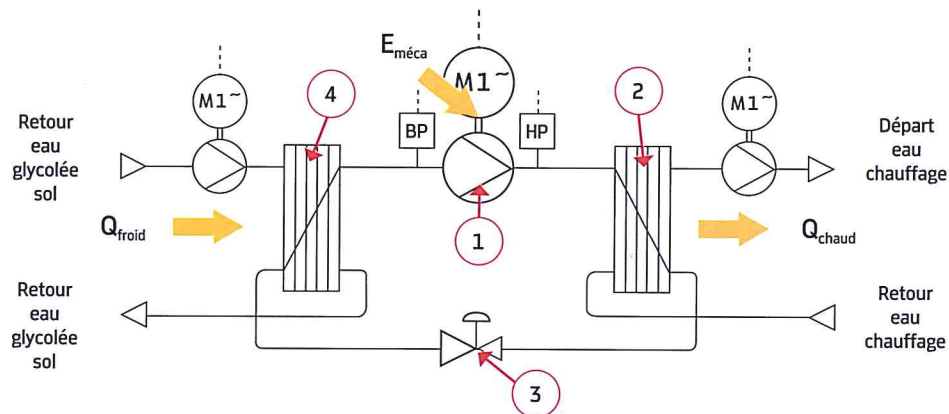
**a Comment sont faites les pompes à chaleur ?**

**EXEMPLE**

**Pompe à chaleur équipant la maison à énergie positive**

On donne ci-dessous le schéma de principe simplifié de la pompe à chaleur eau géothermique utilisée pour le chauffage de cette maison.

Le circuit frigorifique est composé de quatre organes principaux, qui sont sur le sens de circulation du fluide, le compresseur (1), le condenseur (2), le détendeur (3) et l'évaporateur (4) :



**b Comment fonctionne une pompe à chaleur ?**

Lieu	Transformation	État à l'entrée	État de sortie	Quantité d'énergie échangée avec l'extérieur
Compresseur	Compression	Gaz basse pression	Gaz haute pression	+ $E_{méca}$
Condenseur	Condensation	Gaz haute pression	Liquide haute pression	- $Q_{chaud}$
Détendeur	Détente	Liquide haute pression	Gaz + liquide basse pression	Aucune
Évaporateur	Évaporation	Gaz + liquide basse pression	Gaz haute pression	+ $Q_{froid}$

ÉNERGIES

## C Quelles sont les performances d'une pompe à chaleur ?

Le bilan énergétique décrit ci-dessus montre que le régime permanent est :  $Q_{\text{froid}} + E_{\text{méca}} = Q_{\text{chaud}}$

L'efficacité énergétique de la pompe à chaleur, appelée aussi coefficient de performance (COP) est le rapport de l'effet utile sur la dépense soit :  $\text{COP} = Q_{\text{chaud}}/E_{\text{méca}}$ , on en déduit :  $\text{COP} = 1 + Q_{\text{froid}}/E_{\text{méca}}$ .

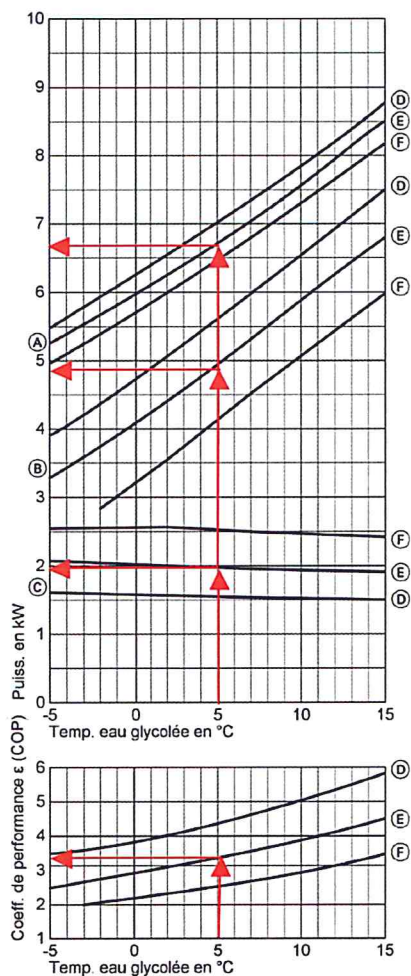
Le coefficient de performance est donc supérieur à 1.

Ceci traduit le fait que la pompe à chaleur subvient à la demande de la source chaude grâce à l'effort mécanique (dépense) et grâce à la chaleur prélevée sur la source froide qui est « gratuite ».

### EXEMPLE

#### Pompe à chaleur (PAC) Eau/Eau Vitocal 343

Diagrammes de puissance



On souhaite utiliser une PAC eau/eau pour produire de l'eau chaude basse température alimentant un plancher chauffant à une température de 45 °C.

On prélève de la chaleur sur le sol d'un jardin dont la température est de 10 °C, grâce à de l'eau glycolée dont la température moyenne est de 5 °C.

L'énergie mécanique apportée au fluide est fournie par un moteur électrique. Le constructeur nous donne pour cette machine un graphique permettant d'en déterminer les performances.

On peut lire : THV = 45 °C courbe E.

$$P_{\text{chaud}} = 6,7 \text{ kW.}$$

$$P_{\text{Froid}} = 4,95 \text{ kW.}$$

$$P_{\text{élec}} = 2 \text{ kW.}$$

On en déduit le COP de la PAC :

$$\text{COP} = 6,7/2 = 3,35.$$

Ceci signifie que pour fournir la puissance nécessaire dans cette situation, l'énergie finale électrique consommée est 3,35 fois moins importante.

- |                                   |                                    |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| (A) Puissance calorifique         | (D) $T_{\text{H}} = 35 \text{ °C}$ |
| (B) Puissance frigorifique        | (E) $T_{\text{H}} = 45 \text{ °C}$ |
| (C) Puissance électrique absorbée | (F) $T_{\text{H}} = 55 \text{ °C}$ |

On peut faire ici une analogie hydraulique. La différence de température étant assimilable à une différence de hauteur « force », on sent bien qu'il est d'autant plus difficile pour une pompe de fournir un débit « flux », que cette différence de hauteur est importante.

On observe que le COP est assez variable en fonction des différences de température entre la source froide et la source chaude.

Plus cette différence augmente plus le COP diminue.

**Réversibilité :** Toute PAC est une machine qui produit du chaud et du froid en même temps. Quand on souhaite valoriser le fait de refroidir, on parle de machine frigorifique. Beaucoup de machines sont réversibles dans la mesure où elles peuvent fonctionner alternativement en mode chaud (PAC) ou en mode froid (machine frigorifique).

SYNTHÈSE

Comparaison des différentes technologies de moteur thermique

Type de Moteur	Énergie primaire utilisable	Gamme de puissance	Efficacité	Avantages	Inconvénients	Domaine d'utilisation
MACI	Combustible liquide ou gazeux	0 – 30 MW	30 à 40 %	Souplesse d'adaptation à la charge Investissement faible	Maintenance coûteuse	Transport Cogénération Centrale électrique
Turbines à gaz	Combustible liquide ou gazeux	20 W – 400 MW	20 à 40 %	Rejet haute température permettant un usage secondaire Fiabilité	Rendement qui chute à charge partielle Faible durée de vie	Transport aérien et maritime Cogénération Centrale électrique
MACE	Toute source de chaleur à haute température	0 – 100 kW	10 à 30 %	Maintenance réduite Fiabilité	Manque de réactivité, inertie	Transport maritime Cogénération Centrale électrique
Turbines à vapeur	Toute source de chaleur à haute température	10 kW – 2 000 MW	10 à 30 %	Large plage de fonctionnement en puissance Fiabilité	Manque de réactivité, inertie Coût élevé	Transport maritime Cogénération Centrale électrique