TH4 MACHINES THERMIQUES

On appelle **machines thermiques** tout dispositif dans lequel **le système** (généralement un **fluide**) qui tient le rôle d'**agent thermique** subit une transformation <u>cyclique</u> au cours de laquelle il échange du travail avec le milieu extérieur, et de la chaleur avec une ou plusieurs sources.

I. Inégalité de Clausius Carnot

I.1. Système en contact avec un thermostat.

• <u>Source de chaleur</u> : système fermé n'échangeant aucun travail, et capable d'échanger de la chaleur sans que sa température T_S évolue.

Ainsi, un système réel s'approche d'autant mieux d'une source de chaleur qu'il est plus grand. On les appelle aussi thermostats ou sources thermiques.

- Evolution d'un système au contact d'une source de chaleur
- Système : Σ
- Transformation : en contact avec une source thermique (S) de température T_S , Σ reçoit la chaleur Q.
- Entropie échangée :
- Entropie créée :
- Le second principe

On obtient <u>l'inégalité de Clausius Carnot</u> : $\Delta S \ge \frac{Q}{T_S}$

L'égalité est réalisée pour une transformation réversible $\Delta S = \frac{Q}{T_S}$

Si la transformation est irréversible $\Delta S > \frac{Q}{T_S}$

I.2. Généralisation

Le système est mis en contact avec n sources successives, chacune cédant la chaleur Q_i à la température T_{Si} .

En tenant compte des n transformations successives : $\Delta S \ge \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i}{T_{Si}}$

En particulier si le système décrit un cycle, c'est-à-dire qu'après avoir été mis en contact avec les n sources il revient à son état initial : $\Delta S = 0$ J.K⁻¹.

<u>L'inégalité de Clausius Carnot pour un cycle</u> : $\sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i}{T_{Si}} \le 0$

II. Machine monotherme

Le système reçoit de la chaleur d'une seule source.

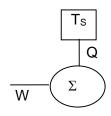
Système : Σ le fluide

Energie reçue : la chaleur Q de la part de la source T_S

le travail W

Transformation: cycle monotherme.

Premier principe : Cycle ⇒
Deuxième principe : Cycle ⇒



Inégalité de Clausius Carnot :

Enoncé de Lord Kelvin (1851)

Un système qui subit une transformation cyclique monotherme reçoit nécessairement du travail et fournit nécessairement de la chaleur.

$$Q \le 0$$
 et $W \ge 0$.

Ou encore il est impossible de trouver un moteur fonctionnant de manière cyclique qui produise du travail à partir d'une seule source de chaleur : moteur de seconde espèce.

« Un bateau muni, s'il existait, d'un tel moteur, avancerait en puisant de l'énergie dans la mer et en laissant un sillage de glace derrière lui. »

Remarque : le moteur perpétuel de première espèce fonctionnerait en puissant son énergie de nulle part, interdit par le premier principe.

III. Machines dithermes

III.1. Notations et relations

Le système sur lequel on va travailler et le fluide caloporteur, attention en aucun cas le système est la « machine ».

 $\underline{\text{Système}} \text{ Le fluide } \Sigma$

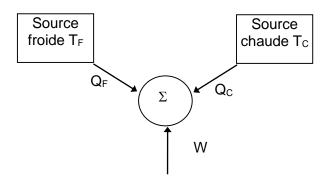
Transformation: cycle ditherme

Echanges énergétiques

- Un travail W de la part du milieu extérieur
- Un transfert thermique Q_c de la part d'une source chaude à la température T_C.
- Un transfert thermique Q_F de la part d'une source froide à la température T_F.

Remarque: le vocabulaire utilisé implique que T_C > T_F.

Schéma de principe



Le sens des flèches indique le sens positif des échanges. Rappelons que si le système reçoit effectivement l'énergie elle est positive, s'il la perd elle est négative.

<u>Premier principe</u> : Cycle ⇒ <u>Deuxième principe</u> : Cycle ⇒ Inégalité de Clausius Carnot :

III.2. Principe du moteur ditherme

- D'un point de vue industriel, il est intéressant de connaître les lois qui régissent la conversion de la chaleur (provenant de combustion) en énergie mécanique directement utilisable.
- Système : Σ Le fluide.

Energies reçues : - Un travail W de la part du milieu extérieur

- Un transfert thermique Q_c de la part d'une source chaude à la température T_C.
- Un transfert thermique QF de la part d'une source froide à la température TF.

Cycle moteur:

D'après le premier principe :

• <u>Le rendement</u> Définition : $r = \begin{vmatrix} \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie fournie}} \end{vmatrix}$

lci

D'après les calculs précédents, on obtient :

Théorème de Carnot:

Toutes les machines réversibles fonctionnant entre deux sources à températures données ont le même rendement : $r_C = 1 - \frac{T_F}{T_C}$.

Toutes machines irréversibles fonctionnant avec ces mêmes sources ont un rendement inférieur.

Le rendement de Carnot 1 - $\frac{T_F}{T_C}$ représente la limite théorique qu'il est impossible de dépasser.

Exemples

• Compte tenu des considérations de sécurité et des matériaux pour un réacteur nucléaire :

 $T_F = 300K$ (le fleuve) $T_C = 700K$ (le réacteur) $\Rightarrow r_C =$

Dans la pratique 36% < r < 46%

• Dans le cas d'un moteur de voiture.

 $T_F = 300K$ (l'air atmosphérique) $T_C = 3000K$ (combustion des gaz) \Rightarrow

Dans la pratique r = 35 % pour un moteur à essence, r = 45% pour un moteur Diesel

III.3. Etude de la machine frigorifique

Le but d'une machine frigorifique est de produire du froid.

On s'intéresse donc à la chaleur retirée à la source froide $Q_F > 0$.

La source froide : intérieur du réfrigérateur.

La source chaude : la pièce.

Comme toute machine commerciale on ne parle pas de rendement mais de coefficient d'efficacité: $e = \left| \frac{\text{\'e} nergie \ utile}{\text{\'e} nergie \ couteuse} \right|$

Remarque : alors que le rendement est toujours inférieur à 1, le coefficient d'efficacité est juste positif.

Système : Σ Le fluide.

Energies reçues : - Un travail W de la part du milieu extérieur

- Un transfert thermique Qc de la part d'une source chaude à la température Tc.

- Un transfert thermique Q_F de la part d'une source froide à la température T_F.

<u>Transformation</u>: cycle ditherme.

Efficacité:

<u>Premier principe</u> : Cycle ⇒ <u>Deuxième principe</u> : Cycle ⇒ Inégalité de Clausius Carnot :

L'efficacité maximale est appelée efficacité de Carnot, elle est obtenue dans le cas de machines

réversibles : $e_C = \frac{T_F}{T_C - T_F}$

Exemple

Un réfrigérateur destiné à obtenir un froid de -5°C placé dans une pièce où règne 20°C.

L'efficacité de Carnot : e_C =

Un réfrigérateur destiné à obtenir un froid de 2°C placé dans une pièce où règne 20°C.

L'efficacité de Carnot : e_C =

On remarque que plus la température de la source froide est élevée (elle se rapproche de celle de la source chaude) et plus l'efficacité est importante.

Dans la pratique l'efficacité des réfrigérateurs réels varient entre 3 et 5.

III.4. Etude de la pompe à chaleur

On s'intéresse à la chaleur rejetée à la source chaude $Q_{\mathbb{C}} < 0$.

La source froide : extérieur de la pièce.

La source chaude : la pièce.

Le coefficient d'efficacité est alors :

Les calculs sont identiques à ceux menés dans le cas de la machine frigorifique..

On obtient un coefficient d'efficacité :

L'efficacité maximale est appelée efficacité de Carnot, elle est obtenue dans le cas de machine

réversible : $e_C = \frac{T_C}{T_C - T_F}$

Exemple

Sur une documentation technique d'une pompe à chaleur, le fabriquant fournit le tableau suivant :

Température extérieure	-7°C	7°C
Puissance calorifique	9.1 kW	14kW
Puissance absorbée	3.3 kW	3.1 kW
Coefficient de performance	2.8	4.5

Cohérence des résultats?

Calculons l'efficacité à partir des énergies :

TABLEAU RECAPITULATIF

	Moteur ditherme	Réfrigérateur	Pompe à chaleur
W	< 0	> 0	> 0
Q_{C}	> 0	< 0	< 0
Q_F	< 0	> 0	> 0
Grandeur valorisable	W	Q_F	$Q_{\mathtt{C}}$
Grandeur coûteuse	Q_C	W	W
Efficacité ou	-W	Q_F	<u> Q</u> C
rendement	$\overline{Q_c}$	\overline{W}	W
r _C ou e _C	1 - ^T F	T _F	T _C
	· T _C	$\overline{T_{C}-T_{F}}$	$\overline{T_{C}-T_{F}}$

IV. Le cycle de Carnot

IV.1. Cycle de Carnot pour un gaz parfait

IV.1.1. Description du cycle

Un système décrit un cycle de Carnot lorsqu'il échange de la chaleur avec deux sources de chaleur seulement et lorsqu'il une transformation quasistatique.

Le cycle est constitué de deux isothermes et de deux adiabatiques.

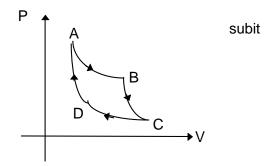
 $A \to B \quad \text{isotherme} \ T_C$

 $B \rightarrow C$ adiabatique

 $C \rightarrow D$ isotherme T_F

D → A adiabatique

Le sens de parcours du cycle indique



IV.1.2. Travail et chaleur reçus au cours du cycle

Système : n moles de Gaz parfait

Equation d'état : PV = nRT

$A \rightarrow B$ isotherme T_C

B → C adiabatique

$C \rightarrow D$ isotherme T_F

D → A adiabatique

IV.1.3. Relation entre Q₁ et Q₂

IV.2. Le cylcle de Carnot pour un système diphasé

Soit une machine frigorifique.

Système : Σ une unité de masse

 $A \rightarrow B$ adiabatique réversible

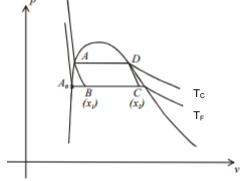
 $B \to C$ isotherme T_F : vaporisation partielle à pression constante $P_{sat}(T_F)$

 $C \rightarrow D$ adiabatique réversible

 $D \rightarrow A$ isotherme T_C : liquéfaction totale à pression constante $P_{sat}(T_C)$

Données : $\Delta_{\text{vap}}s(T_C)$; $\Delta_{\text{vap}}s(T_F)$ et c_L

Diagramme:



Le sens de parcours du cycle indique

• Cherchons les titres en vapeur en B et en C.

• Calculons les transferts thermiques

- Calculons le travail
- Efficacité de la machine

V. Système en écoulement permanent : systèmes ouverts

V.1. Modèle du système ouvert

La masse du système (S) varie au cours du temps.

A l'instant t (S) est caractérisé par :

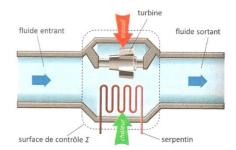
K_S(t) son énergie cinétique.

U_S(t) son énergie interne.

S_S(t) son entropie.

M_S(t) sa masse.

Ce modèle correspond au cas usuel en thermodynamique.



• Les échanges avec l'extérieur durant l'intervalle de temps:

- \rightarrow Q chaleur reçue par le système d'une source à la température T_0 : Evolution monotherme.
- \rightarrow W = W_{EXT} + W_{FAA} avec W_{EXT} travail des forces extérieures aux fluides (Poids, piston ...) et W_{FAA} travail reçu de la part du fluide situé en amont et en aval.

Caractérisation du fluide:

 \rightarrow Fluide à l'entrée : P₁, T₁, C₁ (vitesse), z₁ (Cote)

 $u_1 = dU_1 / dm_1 = U_1 / m_1$ énergie interne massique.

 $s_1 = dS_1 / dm_1 = S_1 / m_1$ entropie massique.

 $v_1 = V_1 / m_1$ volume massique.

 $D_{m1} = dm_1/dt$ débit massique (masse entrant dans (S) par unité de temps)

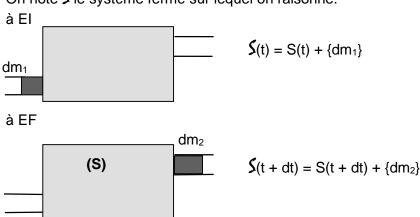
 \rightarrow Fluide à la sortie : P₂, T₂, C₂, z₂.

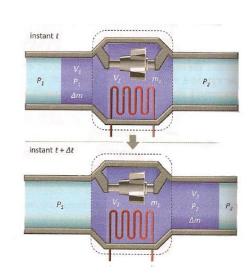
 $u_2, \; s_2, \; v_2, \; D_{m2}.$

V.2. Choix du système.

On s'intéresse à l'évolution du système entre t et t + dt.

On note **\$** le système fermé sur lequel on raisonne.





S(t) et S(t+dt): système fermé contenant les mêmes molécules. On peut donc lui appliquer les principes de la thermodynamique.

V.3. Equation de conservation de la masse.

S est fermé

En régime stationnaire ou en écoulement permanent

Le débit en entrée est égal au débit en sortie

V.4. Le premier principe.

- Système : \$
- Le premier principe :

En écoulement permanent

Pour simplifier l'étude, on suppose que l'écoulement est suffisamment lent pour pouvoir négliger les variations d'énergie cinétique :

- Calcul de W_{FAA}.
- Le premier principe :

Ainsi le premier principe pour un fluide en écoulement permanent, pour lequel on peut négliger la variation d'énergie cinétique, traversant un dispositif actif à l'intérieur duquel il reçoit, de la part de parties mobiles, un travail massique w_u, et dans lequel il reçoit le transfert thermique massique q :

$$\Delta h = w_u + q$$

VI. Les diagrammes des frigoristes

VI.1. Presentation du diagramme

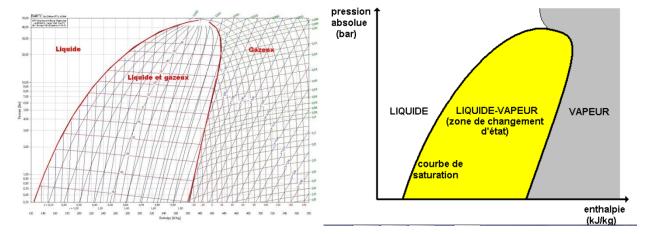
Dans l'univers des pompes à chaleur, on a souvent recours à des diagrammes enthalpiques. Dans ces diagrammes on porte en abscisse l'enthalpie massique et en ordonnée la pression. Pour pouvoir couvrir une plus grandes plage de pressions on utilise verticalement une échelle logarithmique. Ces diagrammes comportent de nombreuses informations. Généralement, ils donnent l'enthalpie d'un élément (par exemple d'un fluide frigorigène) en fonction de sa pression absolue, et de sa température.

On visualise également son état : liquide, liquide/gazeux, ou gazeux.

Chaque fluide frigorigène a son diagramme qui permet de suivre l'évolution de ce fluide dans son circuit au cours de son cycle. Il est l'outil indispensable du technicien en énergétique.

• Etat physique

Sur un diagramme enthalpique, on remarque 3 zones, sui correspondent aux différents états du fluide frigorigène.

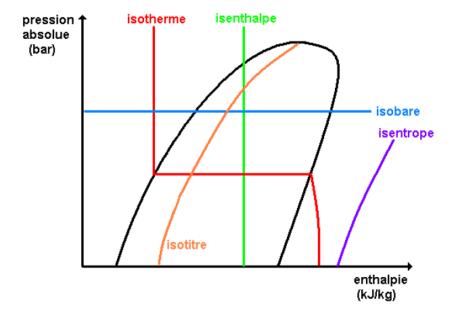


Les différentes transformations

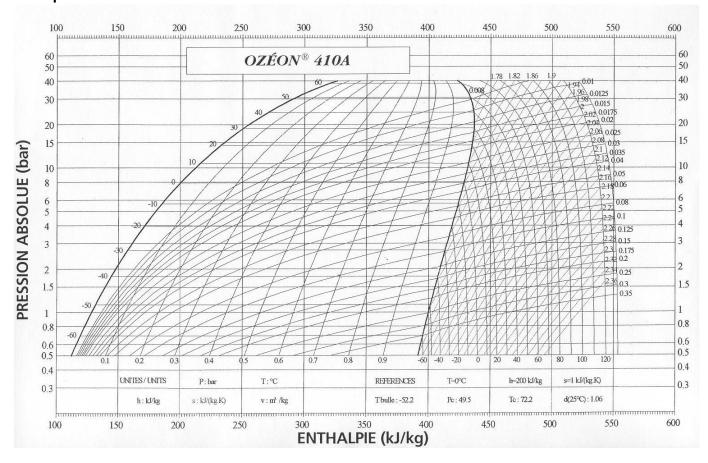
Le diagramme est constitué de différentes familles de courbe représentant les grandeurs physiques du fluide.

Les principales sont :

- → les **isenthalpiques** : ce sont les droites d'enthalpie massique constante, elles sont verticales.
- → les **isobares** : ce sont les droites de pression constante, elles sont horizontales
- \rightarrow les **isothermes** : ce sont les courbes de température constante. Dans la zone liquide-vapeur elles sont horizontales, dans la zone du liquide elles sont quasiment verticales, dans la zones du gaz elles sont courbées. Pour un gaz parfait $\Delta H=f(T)$ on a donc une droite verticale
- → les **isentropes** : ce sont les courbes où la transformation du fluide frigorigène s'effectue de façon réversible et sans échange de chaleur (avec l'extérieur)
- → les **isotitres** : ce sont les courbes de pourcentage de vapeur constant dans la zone liquide-vapeur

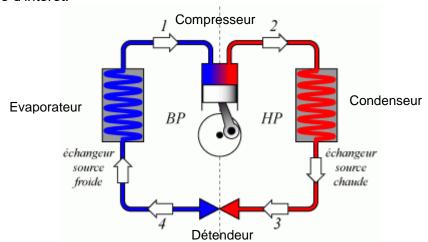


Exemple:



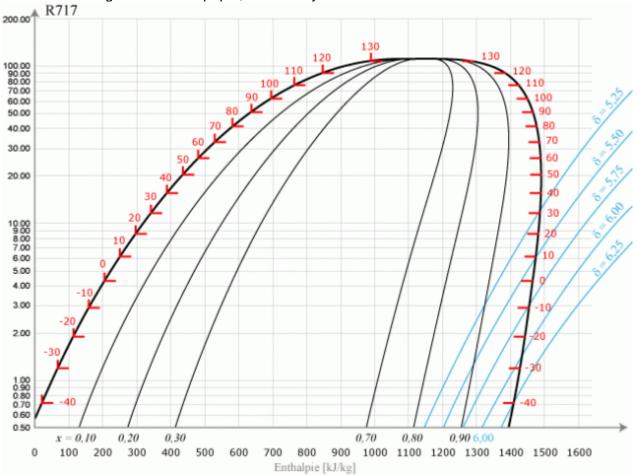
VI.2. Cycle d'une machine frigorifique

Les systèmes frigorifiques et les pompes à chaleur sont en général des systèmes à condensation dont le principe est représenté ci-dessous. On passe d'une machine frigorifique à une pompe à chaleur en changeant le centre d'intérêt.



- → Dans le compresseur : le fluide reçoit du travail, il n'y a pas d'échange thermique, la transformation est isentropique.
- → Dans le condenseur : le fluide est en contact avec la source chaude à laquelle il cède un transfert thermique, il est entièrement liquéfié.
- \rightarrow Dans le détendeur : Le fluide ne reçoit ni travail, ni transfert thermique, sa température s'abaisse de T_C à T_F de façon isenthalpique.
- → Dans l'évaporateur : le fluide est en contact avec la source froide où il reçoit un transfert thermique pour finir de se vaporiser.

On donne le diagramme enthalpique, tracer le cycle.



 Travail 	fourni :
-----------------------------	----------

- Transfert thermique retiré à la source froide
- Efficacité

TH4 MACHINES THERMIQUES

1. Inegalite de Clausius Carnot	I
I.1. Système en contact avec un thermostat.	<u>1</u>
I.2. Généralisation.	<u>1</u>
II. Machine monotherme	<u>1</u>
III. Machines dithermes	<u>2</u>
III.1. Notations et relations	<u>2</u>
III.2. Principe du moteur ditherme	<u>3</u>
III.3. Etude de la machine frigorifique	<u>3</u>
III.4. Etude de la pompe à chaleur	<u>4</u>
IV. Le cycle de Carnot	<u>5</u>
IV.1. Cycle de Carnot pour un gaz parfait	<u>5</u>
IV.1.1. Description du cycle	5
IV.1.2. Travail et chaleur reçus au cours du cycle	5
IV.1.3. Relation entre Q ₁ et Q ₂	6
IV.2. Le cylcle de Carnot pour un système diphasé	<u>6</u>
V. Système en écoulement permanent : systèmes ouverts	<u>7</u>
V.1. Modèle du système ouvert	<u>7</u>
V.2. Choix du système.	
V.3. Equation de conservation de la masse.	
V.4. Le premier principe.	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
VI. Les diagrammes des frigoristes	<u>8</u>
VI.1. Presentation du diagramme	<u>8</u>
VI.2. Cycle d'une machine frigorifique	<u>10</u>

ANNEXE: THERMODYNAMIQUE INDUSTRIELLE

I. Cycles de Carnot

Nous avons présenté en cours le cycle de Carnot et les machines thermiques associées : moteur, réfrigérateur, pompe à chaleur.

Ce cycle est caractérisé par les relations établies par les deux principes de la thermodynamique :

$$\begin{array}{c} W+Q_F+Q_C=0J\\ \\ \frac{Q_F}{T_F}+\frac{Q_C}{T_C}=-S_C\leq 0 \end{array}$$
 et

La création d'entropie est minimale (et les rendements ou les efficacités maxima) pour un cycle réversible. Ce cycle réversible permet de prévoir les possibilités des machines thermiques.

	Moteur ditherme	Réfrigérateur	Pompe à chaleur
W	< 0	> 0	> 0
Q_{C}	> 0	< 0	< 0
Q_{F}	< 0	> 0	> 0
Grandeur valorisable	W	Q_{F}	Q_{C}
Grandeur coûteuse	Q_C	W	W
Efficacité ou			
rendement	- W/Q _C	Q _F /W	-Q _C /W
r _C ou e _C	1- ^T F	T_F	T_C
	T_{C}	$\overline{T_C - T_F}$	$\overline{T_C - T_F}$

Dans la pratique, un tel cycle est irréalisable :

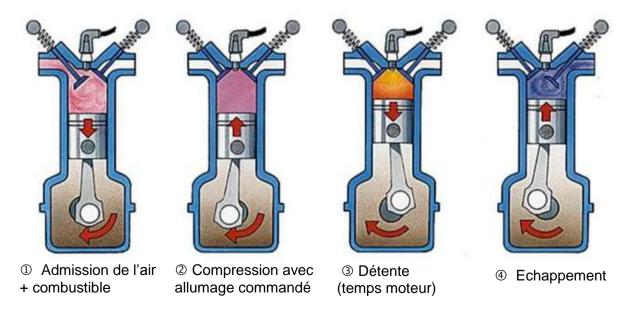
- →à cause des irréversibilités.
- →à cause des pressions très élevées qu'il impose.
- →à cause de la complexité de sa réalisation pratique.

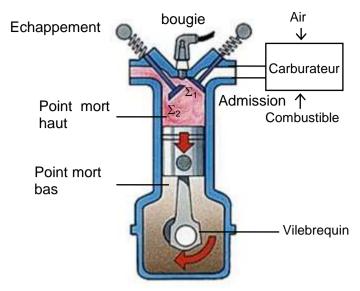
II. Cycle de Beau de Rochas

Brevet déposé en 1862, moteur réalisé par Otto en 1878.

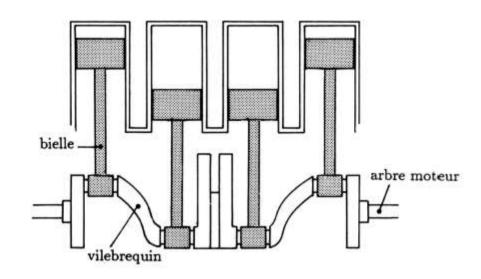
C'est le cycle théorique des moteurs à combustion interne à allumage commandé ou moteur à explosion.

Cylindre: la figure ci-dessous représente le schéma de principe d'un cylindre de moteur à explosion.

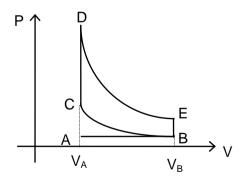




 Σ_1 : soupape d'admission, Σ_2 : soupape d'échappement



Cycle théorique



Le cycle est parcouru en 4 temps :

Etape AB: 1^{er} temps : Σ_1 ouverte, Σ_2 fermée; admission; le système est ouvert.

Etape BC/CD: 2^e temps : Σ_1 et Σ_2 fermées; compression adiabatique réversible pour le système fermé. En C, une étincelle électrique allume le mélange air + combustible et la pression passe brusquement de C à D, à volume considéré comme constant.

Etape DE: 3^e temps : Σ_1 et Σ_2 fermées; détente adiabatique réversible, pour le système fermé. C'est le temps moteur (un temps moteur sur 4 temps).

Etape EBA: 4^e temps: Σ_2 ouverte, Σ_1 fermée; échappement; le système est ouvert.

N.B. Au cours du cycle, la nature du fluide varie : de mélange combustible, il devient gaz de combustion, selon une réaction du type :

$$2 C_8H_{18} + 25 O_2 \rightarrow 16 CO_2 + 18 H_2O$$
 octane

Cependant compte tenu de la grande proportion d'azote, on peut considérer que le mélange combustible et le gaz de combustion ont les propriétés de l'air, équivalent à un gaz parfait ($\gamma = 1.4$) et que le système est fermé le long de BCDEB.

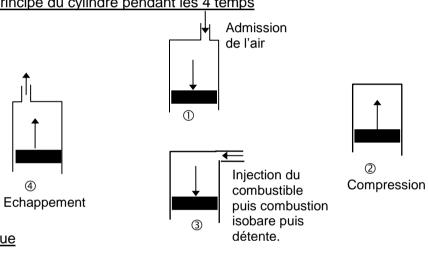
Rendement du cycle théorique

On pose α = V_B / V_A le rapport volumique. On établit r = 1 + $\frac{T_B - T_E}{T_D - T_C}$ = 1 - $\alpha^{1-\gamma}$

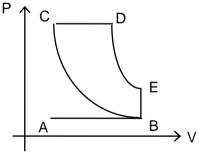
III. Cycle du moteur Diesel (cycle mixte)

Le moteur Diesel (moteur inventé par Diesel 1858-1913) est un moteur à combustion interne, à allumage par compression. On comprime l'air seul, puis, on introduit par un injecteur le combustible pulvérisé sous des pressions élevées (3^e temps ci-dessous) la température étant élevée, l'inflammation est spontanée.

Schéma de principe du cylindre pendant les 4 temps



Cycle théorique



Le cycle est en général parcouru en 4 temps :

Etape AB: 1^{er} temps : Σ_1 ouverte, Σ_2 fermée; admission de l'air seul; le système est ouvert. Etape BC: 2^{e} temps : Σ_1 et Σ_2 fermées; compression isentropique de l'air seul, le système fermé.

Etape CD/DE: 3^e temps : Σ_1 et Σ_2 fermées; combustion isobare CD, et détente adiabatique réversible DE. C'est le temps moteur (un temps moteur sur 4 temps).

Etape EBA: 4^e temps: Σ_2 ouverte, Σ_1 fermée; échappement; le système est ouvert.

On suppose que le fluide qui décrit le cycle est un gaz parfait ($\gamma = 1.4$) et que le système est fermé le long de BCDEB.

Rendement du cycle théorique

On pose $\alpha = V_B / V_A$ et $\beta = V_B / V_D$ les rapports volumiques.

On établit
$$r = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{T_B - T_E}{T_D - T_C} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{\beta}{\alpha^{\gamma}} \frac{1 - \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{\gamma}}{1 - \frac{\beta}{\alpha}}$$

Comparaison avec le moteur à explosion

La compression BC de l'air seul ne comporte pas de risque d'inflammation, on peut utiliser des taux de compressions α plus élevés qu'avec un moteur à explosion. Souvent plus lourd et plus encombrant, donnant de moins grandes vitesses de rotation, il a été amélioré en réduisant le délai d'inflammation (intervalle de temps séparant le début d'injection de l'inflammation).

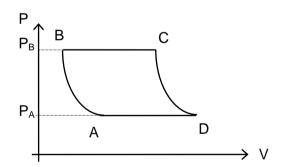
Le délai d'inflammation est caractérisé par l'indice de cétane (C₁₆H₃₄) dans un combustible constitué d'un mélangez cétane/alphaméthylnaphtaléne donnant le même délai d'inflammation que le combustible étudié.

IV. Cycle de Joule (ou Brayton) : turbine à gaz, turbomoteur.

C'est le cycle théorique des turbines à gaz et des moteurs utilisés pour la propulsion dite « à réaction » (avion, aéroglisseur, turbotrains ...)

- Il existe plusieurs sortes de propulseurs à réaction. Nous citerons des propulseurs :
- → sans compresseur : fusée,
- → avec compresseur : turbomoteur, c'est-à-dire compresseur + chambre à combustion + turbine où les gaz chauds issus de la chambre de combustion se détendent à grande vitesse.
- Une turbine à gaz n'est autre qu'un turbomoteur qui, suivi d'une machine réceptrice (par exemple un alternateur) sert à produire de l'énergie alors qu'un turbomoteur proprement dit sert à la propulsion. En pratique, la terminologie tend à confondre les mots turbine à gaz et turbomoteur. L'avantage du turbomoteur est dû à la simplicité d'une machine de révolution (pas de pistons ...), d'où la robustesse, et à l'encombrement réduit pour une puissance massique élevée.

Cycle théorique



AB: compression isentropique

BC: combustion isobare
CD: détente isentropique
DA: refroidissement isobare.

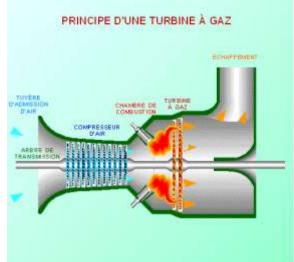
Le rendement théorique du cycle

On établit r = 1-
$$\left(\frac{P_A}{P_B}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

V. Echanges de chaleur avec l'extérieur

• <u>Moteurs à combustion interne</u> (moteur à explosion, moteur diese) : les gaz atteignent des températures élevées (3 000K), mais les transformations sont très rapides, et les parois de la chambre de combustion restent à des températures inférieures.

- <u>Turbines à gaz à cycle ouvert</u> : la chaleur est évacuée par les gaz qui s'écoulent, sans avoir besoin de traverser les parois.
- <u>Turbines à gaz à cycle fermé</u>: le fluide utilisé peut être autre que l'air; ceci évite l'effet oxydant, sur les aubes de turbine, des gaz chauds d'un cycle ouvert à l'air, mais la chaleur n'est plus évacuée par écoulement du fluide, d'où la nécessité d'un dispositif d'évacuation (et éventuellement de récupération) de la chaleur.



• Moteur Stirling (1816; premier système à récupération de la chaleur). Les isentropiques du cycle de Carnot sont remplacées par des isochores, mais la chaleur perdue pendant l'étape BC est récupérée par un régénérateur qui la rend au système pendant l'étape DA, ce qui améliore considérablement le rendement. Ainsi, des moteurs Stirling sont à l'étude dans le domaine automobile. Ils sont coûteux, mais peu polluant.



<u>Conclusion : puissances obtenues</u> (d'après l'Encyclopédie Internationale)

moteur à explosion < 3 000 kW

moteur Diesel de quelques kW à 30 000 kW turbine à gaz pouvant atteindre 60 000 kW turbine à vapeur pouvant atteindre 10⁶ kW.

VI. Centrale nucléaire

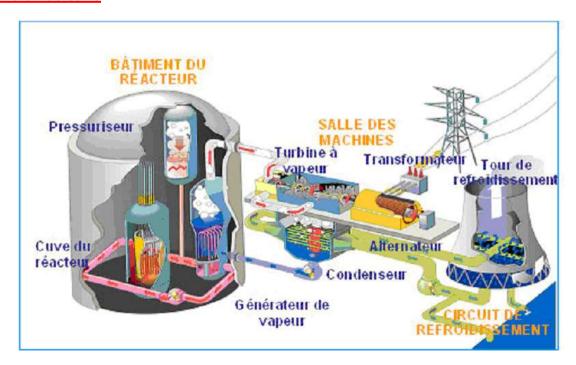


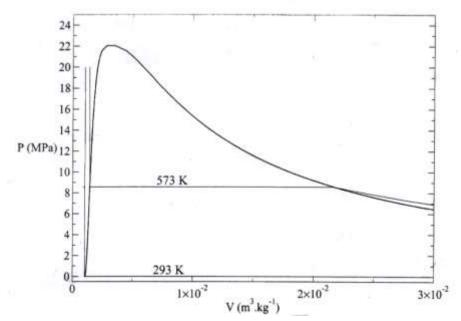
Schéma de principe d'une centrale nucléaire Turbine Alternateur Pressuriseur Réacteur Condenseur Générateur de vapeur 11111 Pompe primaire Aéroréfrigérant bumide Circuit primaire Premier principe: Circuit secondaire Circuit tertiaire Rendement global théorique :

Modélisation du circuit secondaire

L'installation fonctionne en régime permanent.

Chaque organe est considéré comme un système ouvert. L'eau y est admise, transformée et expulsée. Les variations d'énergie mécaniques peuvent être négligées.

- **En A** : l'eau qui sort du condenseur est liquide à la température T₁ = 293K. La pression P₁ est la pression de vapeur saturante à cette température.
- **La pompe** : l'eau est comprimée à la pression P_2 (état B). Sa température ne varie pas $T_2 = T_1$. L'évolution est quasiment réversible.
- **L'échangeur de chaleur** : l'eau est en contact thermique avec l'eau du circuit primaire. On peut décomposer la transformation subie en deux étapes :
 - \triangleright l'eau liquide s'échauffe de manière isobare jusqu'à la température $T_3 = 573$ K (état C)
 - ▶ l'eau se vaporise entièrement à la température T₃ (Etat D)
- **La turbine** : la vapeur d'eau se détend dans la turbine de manière réversible. La température de l'eau est T₁ à la sortie de la turbine (**Etat E**). On note x le titre en vapeur.
- Le condenseur : la vapeur d'eau restante se condense à la température T₁.



ANNEXE: THERMODYNAMIQUE INDUSTRIELLE

I. Cycles de Carnot	ď
II. Cycle de Beau de Rochas	
III. Cycle du moteur Diesel (cycle mixte)	_
IV. Cycle de Joule (ou Brayton) : turbine à gaz, turbomoteur	-
V. Echanges de chaleur avec l'extérieur	
VI. Centrale nucléaire	

Idées physique

Le chaud qui venait du froid

Mieux vaut récupérer la chaleur présente dans l'environnement que la produire. C'est ce que font les « échangeurs à contre-courant » et les « pompes à chaleur ».

ans l'eau glacée de l'Arctique, le corps du phoque se refroidirait très vite si sa physiologie particulière ne réduisait les pertes thermiques. Ainsi, l'évolution a pourvu l'animal d'échangeurs de chaleur vasculaires qui réchauffent le sang veineux revenant vers le cœur en refroidissant le sang artériel s'écou-

lant vers les nageoires. Un échangeur de chaleur fournit à un corps froid, la quasi-totalité de l'énergie calorifique excédentaire contenue dans un corps chaud. Alors qu'un contact thermique simple égalise les températures des deux corps, un échangeur à contre-courant bien conçu parvient à les échanger. Une pompe à chaleur réussit encore mieux : elle extrait de la chaleur d'un corps plus froid que celui qui la reçoit!

Échangeurs à contre-courant

Dans un échangeur à contre-courant, le transfert thermique se fait par contact entre deux fluides qui circulent dans des sens opposés, comme dans les grands échangeurs utilisés pour aérer les ensembles d'habitation. Ces dispositifs remplacent l'air intérieur vicié et chaud par de l'air pur...

Anerto Veine

Dessins de Bruno Vacaro

Les pattes d'oiseau et les nageoires des phoques contiennent des réseaux vasculaires structurés en échangeurs à contre-courant. La chaleur du sang artériel réchauffe le sang veineux revenant vers le cœur, ce qui évite un trop grand refroidissement de l'organisme.

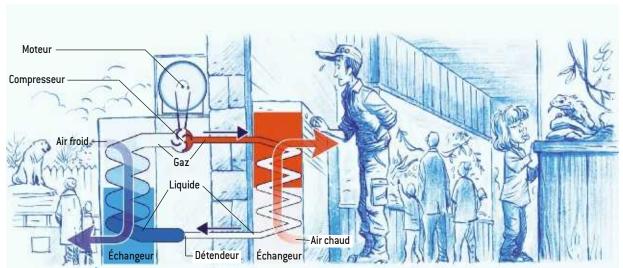
presque aussi chaud. Propulsées par des ventilateurs, les masses d'air circulent au sein de canalisations, où les tuyaux évacuant l'air chaud intérieur (par exemple à 20 °C) sont au contact de ceux aspirant l'air froid extérieur (par exemple à 0 °C). Entrant dans l'échangeur, l'air froid vient au contact thermique d'air vicié déjà refroidi, car en fin de parcours. À mesure qu'il progresse, l'air extérieur traverse des zones de plus en plus chaudes. Juste avant sa sortie, il achève de se réchauffer au contact thermique de l'air intérieur à 20 °C tout juste entré dans l'échangeur. Pour que la chaleur s'écoule, une différence de température suffisante (environ 1 °C) est maintenue tout au long du parcours, de sorte que l'air sort à 19 °C.

Illustrons les avantages d'un échangeur par le cas d'un appartement de 100 mètres carrés. Si l'on remplace toutes les heures, les 250 mètres cubes d'air à 20 °C par de l'air frais à 0 °C que l'on réchauffe ensuite, une puissance de chauffage de 1,7 kilowatt est nécessaire. En revanche, moins de 90 watts suffisent (la consommation d'une ampoule électrique) avec un échangeur de chaleur capable de réchauffer l'air entrant grâce à l'air expulsé.

Un échangeur dans les pattes

Les échangeurs à contre-courant sont très utilisés dans l'industrie, par exemple dans les centrales nucléaires où l'on veut récupérer l'énergie calorifique de l'eau du circuit primaire qui passe dans le cœur du réacteur et qui est radioactive. Il en existe aussi dans la nature, par exemple dans les systèmes vasculaires des phoques, des dauphins et des oiseaux des contrées froides. Que la nature ait sélectionné ce système à contre-courant illustre son efficacité : chez les oiseaux arctiques par exemple, les artères qui conduisent le sang vers les pattes sont en contact intime avec les veines qui en reviennent. Cela évite que du sang veineux glacé ne remonte dans le corps.

Chez les mammifères aquatiques et chez l'homme, les artères des membres n'affleurent en surface qu'aux articulations, seuls endroits où l'on peut « prendre le pouls » ; ces artères sont entourées des veines profondes à partir desquelles le sang retourne vers le cœur quand il fait froid (quand il fait chaud, le sang passe par des veines superficielles).



Dans une pompe à chaleur, la détente d'un fluide « pompe » la chaleur d'un milieu froid (ici l'atmosphère hivernale) qui est ensuite transportée vers le milieu à chauffer (ici le vivarium). D'abord liquide, un fluide s'évapore dans un échangeur situé dans la zone froide (à gauche) en absor-

bant de la chaleur. Aspirée par un compresseur, la vapeur est introduite dans un second échangeur situé dans la zone chaude, où elle se liquéfie en restituant la chaleur absorbée. Le liquide produit retourne dans la zone froide par l'intermédiaire d'un détendeur.

Quand le sang qui circule dans nos mains se refroidit à 20 °C, lorsqu'il revient par les veines, il est progressivement réchauffé par le contact avec les artères jusqu'aux 37 °C habituels.

L'exploit de la pompe à chaleur

La pompe à chaleur accomplit un exploit : elle extrait la chaleur non pas d'une source plus chaude, mais d'une source plus froide. Ce dispositif, fonctionne selon le même principe que le réfrigérateur. Dans la zone où l'on veut prélever la chaleur (l'atmosphère par exemple), on force un liquide à s'évaporer en le pompant à basse pression. Pour ce faire, il absorbe une quantité importante de chaleur : la chaleur latente de vaporisation. Celle-ci est prélevée par l'intermédiaire d'un échangeur dans le milieu froid (qui se refroidit encore), l'air extérieur par exemple. Aspiré par le compresseur, le gaz est injecté dans la partie du circuit sous pression. Cette compression le liquéfie dans un second échangeur, où cette liquéfaction libère la chaleur latente précédemment absorbée. Le liquide ainsi formé est admis par un détendeur dans la zone de basse pression et le cycle recommence.

Ainsi le transfert de chaleur s'effectue cette fois du froid vers le chaud. À quel coût ? La seule dépense énergétique est l'énergie d'alimentation du compresseur. Le second principe de la thermodynamique impose l'énergie minimale à fournir : le rapport entre la chaleur reçue par la maison et l'énergie fournie (électrique) est inférieur au quotient de la température absolue (donc mesurée en kelvins) de la source chaude (maison) par la différence des températures entre les sources chaude et froide.

Pour une source chaude à 20 °C et une source froide à 0 °C, le rendement énergétique est donc au mieux égal à 293 kelvins (20 °C) que divisent 20, soit presque 15 joules d'énergie thermique reçue pour chaque joule d'énergie électrique fournie. En pratique, les imperfections des dispositifs ne permettent pas d'atteindre le rendement énergétique maximal : la chaleur apportée par une pompe à chaleur est seulement quatre fois plus grande que l'énergie consommée. À titre de comparaison cependant, rappelons qu'un joule dissipé par la résistance d'un chauffage électrique n'apporte qu'un unique joule de chauffage...

Puisque l'efficacité d'une pompe à chaleur est d'autant plus grande que la différence de température entre source froide et chaude est minime, il semble préférable de prélever la chaleur dans le sol plutôt que dans l'atmosphère. À quelques mètres de profondeur en effet, la température du sol varie entre 10 °C et 16 °C, valeurs proches des quelque 20 °C souhaités dans une maison. Les échanges entre la pompe à chaleur et le sol se font par l'intermédiaire d'un réseau souterrain de conduits qui transportent un fluide caloporteur, un mélange eau/glycol par exemple. Puisque la pompe à chaleur est une sorte de réfrigérateur qui refroidit l'extérieur, on peut aussi construire des pompes fonctionnant dans les deux sens, donc capables de refroidir l'intérieur. Durant l'été, une telle pompe extrait alors de l'énergie calorifique de la maison pour la céder au sous-sol, et l'échauffe de quelques degrés (environ 5 °C). Cette chaleur diffuse si lentement autour de la tuyauterie qu'elle reste à proximité pendant des mois. Pourvu que l'on prenne la précaution d'espacer assez les tuyaux enterrés pour ne pas perturber l'équilibre thermique du sous-sol, on stocke ainsi la chaleur de l'été pour la réutiliser en hiver.

J. TAINE et J.-P. PETIT, Transferts thermiques, Dunod, 1993.

□ IDÉES DE PHYSIQUE

L'air comprimé revient

Après des décennies d'oubli, l'utilisation de l'air comprimé redevient d'actualité pour stocker de l'énergie.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

tocker de l'énergie en comprimant de l'air, pourquoi pas ? Des jeux d'enfants, tels que fusées ou carabines à eau, utilisent ce moyen. Mais est-ce bien sérieux ? Après une période florissante au XIX^e siècle, ce mode de stockage est tombé en désuétude en raison d'un mauvais rendement. Il revient pourtant à l'actualité et les projets foisonnent. Comment adapter la compression de l'air à une utilisation moderne ?

L'idée d'utiliser l'énergie de l'air comprimé est ancienne et brille par sa simplicité. D'abord, on comprime l'air contenu dans une enceinte à des pressions élevées. Ensuite, on le détend selon les besoins, la différence de pression entre l'intérieur de l'enceinte et l'extérieur étant mise à profit pour faire fonctionner une turbine, un moteur, etc.

Premier problème: le volume requis pour stocker une quantité donnée d'énergie est bien plus important avec l'air comprimé que pour d'autres formes d'énergie. On calcule qu'au voisinage de la température ambiante et avec des rapports de compression de dix (en volume), la détente de un mètre cube d'air à 100 atmosphères peut libérer 25 mégajoules, soit l'équivalent d'à peine

un litre d'essence! Un trajet urbain de quelques dizaines de kilomètres nécessiterait donc un réservoir de plusieurs mètres cubes. C'est pourquoi les tramways *Mekarski*, qui ont roulé à Nantes et à Paris dans les années 1880, avaient une faible autonomie (15 kilomètres) et devaient être fréquemment ravitaillés en air comprimé.

Encombrement et échauffements

Le second problème est bien connu de tous, grâce à la pompe à vélo. Un gaz que l'on comprime s'échauffe. Pourquoi? Lorsqu'un piston se déplace dans un cylindre pour comprimer le gaz, il a le même effet sur les molécules de l'air qu'une raquette sur une balle de tennis: puisqu'il vient au-devant des molécules, les collisions avec elles leur fait gagner de la vitesse (voir la figure 1). Les molécules étant beaucoup plus rapides que le piston, l'énergie transférée à chaque choc est faible, mais, les collisions étant très nombreuses, le gain total d'énergie peut être important. Puis, au gré des collisions intermoléculaires, la vitesse moyenne des molécules du gaz s'élève, et avec elle la température, qui mesure l'agitation thermique.

Inversement, lors d'une détente, le gaz cède son énergie au piston et se refroidit. Prenons de l'air à pression atmosphérique et à 15 °C, et appliquons une compression adiabatique (c'est-à-dire sans aucun échange de chaleur) qui diminue le volume par un facteur dix: on obtiendra de l'air à une pression de 25 atmosphères et à une température de l'ordre de 450 °C.



1. L'AIR QUE L'ON COMPRIME S'ÉCHAUFFE. Une molécule d'air qui vient frapper le piston acquiert en rebondissant un supplément de vitesse égal à deux fois le vecteur vitesse du piston. Cumulé sur un grand nombre de collisions, ce processus augmente la température du gaz.

Regards

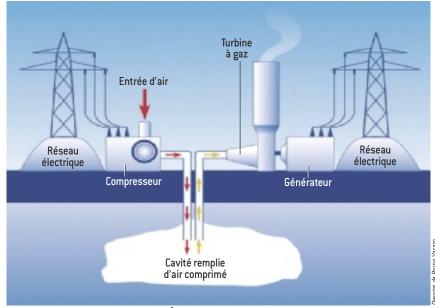
Ces échauffements (ou refroidissements) peuvent atteindre des centaines de degrés pour des taux de compression importants, ce qui pose des difficultés techniques. Le stockage de l'air sous pression nécessite donc de le refroidir à la compression et de le réchauffer à la détente. Pour un même volume, le gaz sera plus froid à la détente que lors de la compression; la pression exercée sur le piston sera plus faible et le travail mécanique récupéré sera inférieur à celui qui avait été fourni. Dans ces conditions, on montre que l'on récupérera moins de la moitié de l'énergie investie.

Puissance et propreté

Si les efforts de recherche ont redoublé ces dernières années pour cette forme de stockage d'énergie, c'est que ses avantages répondent aux préoccupations modernes: simplicité des mécanismes souvent associée à un faible coût, sécurité (l'air n'explose pas!), propreté (pas d'émissions nocives) et une puissance délivrée pouvant être très élevée (il suffit de régler le débit d'air).

Ainsi, la centrale allemande de Huntorf, en service depuis 1978, délivre une puissance de près de 300 mégawatts pendant trois heures. Sa mise en route rapide (quelques minutes) lui permet de suppléer aux pics de consommation en attendant que les centrales thermiques prennent le relais. La compression est effectuée aux heures où il y a surproduction d'électricité ou quand celle-ci est peu chère. Deux anciennes mines de sel ont été converties en réservoirs souterrains de 310 000 mètres cubes, où l'air est comprimé jusqu'à 60 atmosphères. Cet air comprimé alimente une turbine à gaz. Préchauffé dans un récupérateur de chaleur qui utilise les gaz chauds de combustion de la turbine en fonctionnement, l'air sous pression est mélangé ensuite avec du fuel ou du gaz pour être brûlé et alimenter la turbine.

Ce procédé (voir la figure 2) multiplie par près de trois la puissance produite par rapport à une turbine à gaz classique, qui utilise les deux tiers de sa puissance pour précomprimer l'air de combustion. De nouveaux réservoirs, où la chaleur dégagée



2. LE RENDEMENT D'UNE TURBINE À GAZ peut être amélioré grâce à l'utilisation d'air comprimé. Durant les phases de surproduction d'électricité, un compresseur comprime de l'air puisé à l'extérieur et le stocke (flèches rouges) dans une cavité souterraine. Une partie de cet air sous pression en est extraite (flèches jaunes) et mélangée au gaz qui brûle dans la turbine. Pour une même consommation, la puissance électrique produite est le triple de celle d'une turbine à gaz classique.

au moment de la compression est stockée dans de la céramique, du béton ou de la fonte pour être récupérée au moment de la détente, sont à l'étude. Des rendements de 70 pour cent sont promis...

Une autre possibilité est de stocker la chaleur... dans l'atmosphère! Si l'on favorise les échanges thermiques du gaz comprimé avec le milieu extérieur, la température du gaz, et donc l'énergie cinétique des molécules, reste constante. À mesure que l'on comprime, la chaleur produite est intégralement cédée au milieu extérieur. L'énergie semble perdue? Il n'en est rien. Car lors de la détente, le mécanisme inverse opère : le gaz absorbe de la chaleur en provenance du milieu extérieur et récupère ainsi toute la chaleur cédée lors de la compression, qui est ensuite convertie en travail. Avec une compression lente et des échangeurs de chaleur présentant une grande surface, les rendements deviennent satisfaisants.

Comme un gaz change trop facilement de volume, on préfère des solutions hydropneumatiques où la pression de l'air est transmise par l'intermédiaire d'un fluide

LES AUTEURS





Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris.

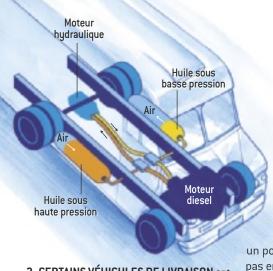
✓ BIBLIOGRAPHIE

H. Ibrahim et al., Energy storage systems – Characteristics and comparisons, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 12, pp. 1221-1250, 2008.

S. Lemofouet-Gatsi, Investigation and optimisation of hybrid electricity storage systems based on compressed air and supercapacitors, Thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne, 2006.



Regards



3. CERTAINS VÉHICULES DE LIVRAISON ont des systèmes de motorisation hybrides utilisant l'air comprimé. Un moteur diesel met sous pression l'huile dans un circuit, qui actionne un moteur hydraulique. Lors d'un freinage, le circuit hydropneumatique emmagasine l'énergie en comprimant l'air de l'un des réservoirs. Dans une phase d'accélération (ici représentée), le système laisse cet air se détendre, ce qui actionne le moteur hydraulique.

hydraulique (de l'huile). Selon des études récentes, on pourrait atteindre l'optimum du rendement, près de 70 pour cent, avec des réservoirs en acier standard et une pression de l'ordre de 200-300 atmosphères. Le problème est qu'il faut des réservoirs pour

conserver l'huile, d'où un volume et un poids élevés. C'est pourquoi il n'existe pas encore de véhicules mus uniquement par ce procédé.

Cependant, de tels systèmes conviennent bien à des applications exigeant des puissances élevées et des cycles de compression-détente nombreux et rapides. Tel est le cas des véhicules de livraison. Ainsi, la Société UPS s'est récemment équipée de camions à moteurs hybrides (voir la figure 3). La propulsion est assurée par un moteur hydraulique alimenté en huile sous pression. En régime de croisière, la mise sous pression de l'huile est assurée par un moteur thermique (diesel).

Lors du freinage, le moteur hydraulique fonctionne en mode inverse et comprime le gaz contenu dans un réservoir. L'énergie ainsi stockée est récupérée lors du démarrage. L'avantage est double : l'énergie n'est pas perdue lors du freinage et le moteur thermique n'est sollicité que dans les régimes où son efficacité est maximale. On réduit ainsi la consommation de carburant de 30 à 50 pour cent. Et de nombreux ingénieurs (Guy Nègre en France, Angelo Di Pietro en Australie, etc.) affirment avoir conçu des moteurs pneumatiques encore plus efficaces...

