

---

## Semaine 2 : Energies mises en jeu dans les transformations

### Objectifs pédagogiques

La deuxième semaine introduit des notions de thermodynamique essentielles pour pouvoir modéliser les systèmes énergétiques.

Après avoir commencé par effectuer une première découverte des performances des compresseurs et des turbines utilisées dans une turbine à gaz, nous présenterons les notions de système thermodynamique et d'état.

Les échanges d'énergie entre un système thermodynamique et son environnement seront ensuite étudiés, ce qui permettra d'énoncer le premier principe de la thermodynamique en système fermé puis ouvert.

Nous montrerons alors que les quatre grandes fonctions élémentaires identifiées la semaine précédente correspondent à trois évolutions de référence subies par les fluides qui traversent les machines, déclinant chacune un cas particulier d'application du premier principe.

A la fin de la semaine :

- vous saurez différencier les systèmes fermés et les systèmes ouverts
- vous serez capables de distinguer les fonctionnalités et les évolutions de référence
- vous saurez écrire le premier principe de la thermodynamique et utiliser les fonctions  $h$ ,  $Q$ ,  $\tau$
- vous serez capables de décrire les trois évolutions de référence mises en jeu
- et enfin vous saurez les repérer sur les schémas des systèmes énergétiques étudiés

### Support de cours

#### 2.1 Compléments sur le fonctionnement des compresseurs et turbines

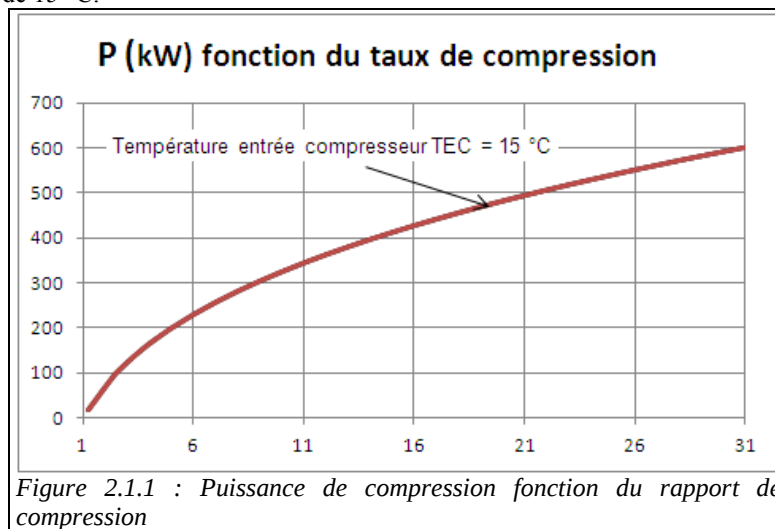
Compte tenu de l'importance des opérations de compression et détente dans toutes les machines thermiques, nous analyserons sommairement l'influence des principaux paramètres de fonctionnement d'une turbine à gaz sur les performances de la machine, à savoir le rapport de compression/détente et les températures d'aspiration compresseur et d'entrée turbine.

Je précise qu'on appelle rapport de compression le rapport de la pression de refoulement à la pression d'aspiration, et rapport de détente le rapport inverse.

### 2.1.1 Etude de la compression

Quand on comprime un gaz, il s'échauffe, comme chacun peut le constater en gonflant un pneu de vélo. La compression d'un gaz s'accompagne donc d'une augmentation simultanée de sa température et de sa pression. Cet échauffement du gaz, inéluctable, se traduit malheureusement par un surcroît de travail de compression, plus ou moins important selon la qualité du compresseur.

Pour fixer les idées, regardons quel est le travail mis en jeu dans le compresseur d'une turbine à gaz. La figure 2.1.1 présente, pour une turbine à gaz de caractéristiques courantes traversée par un débit de 1 kg/s, la variation de la puissance de compression en fonction du rapport de compression, pour une température d'entrée compresseur TEC de 15 °C.



Par exemple, pour un rapport de compression de 6, la puissance requise est de près de 220 kW, et pour un rapport de compression de 21, elle vaut 500 kW.

Comme on le voit, plus le taux de compression est élevé, plus le travail à fournir au compresseur est important.

Il est d'ailleurs remarquable que l'accroissement de température dans le compresseur est à peu près égal au travail de compression exprimé en kW, et est donc directement lisible sur la figure 2.6.1, en graduant en °C l'échelle de l'ordonnée. Cette particularité vient d'une part de ce que le débit mis en jeu est égal à 1 kg/s, et d'autre part de ce que la chaleur massique de l'air est proche de 1 kJ/kg/K à la température ambiante.

Les performances d'un compresseur de turbine à gaz sont très sensibles à la valeur de la **température d'aspiration du fluide**, ici la température extérieure. Cette dernière évoluant entre l'hiver et l'été de - 5 °C à 35 °C environ, elle fait varier la puissance de compression de plus ou moins 7 % autour de sa valeur moyenne, pour un taux de

compression de 16, le minimum de puissance à fournir correspondant à l'hiver, comme le montre la figure 2.1.2.

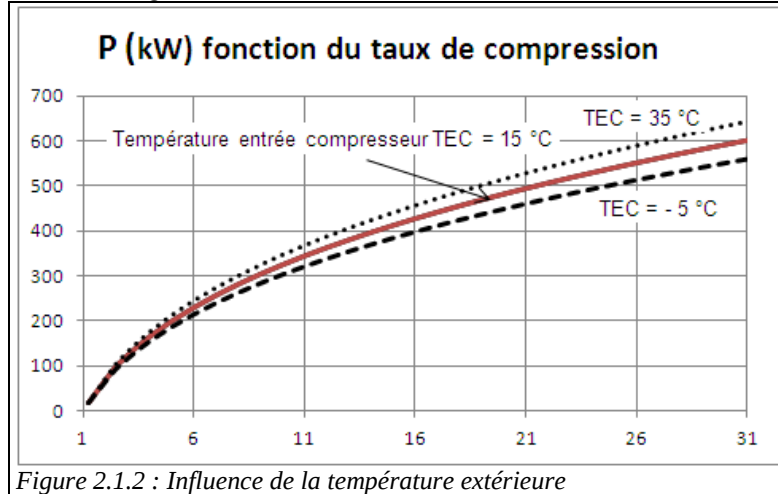


Figure 2.1.2 : Influence de la température extérieure

L'influence de la température d'aspiration sur la puissance de compression explique pourquoi il est toujours préférable de comprimer un gaz à la température la plus basse possible, ce qui conduit à le refroidir si c'est techniquement possible.

Dans les compresseurs axiaux, ce serait très difficile de le faire, mais dans certaines turbines à gaz de petite puissance équipant des hélicoptères, où la compression est réalisée par plusieurs compresseurs centrifuges en série, il arrive que l'air soit refroidi entre deux corps de compression dans un échangeur air-air ressemblant à un radiateur automobile ou de moto. Le même phénomène explique pourquoi on installe un « intercooler » entre un turbocompresseur et l'aspiration d'un moteur diesel.

On peut démontrer que le travail de compression d'un gaz idéal est d'une part proportionnel à la température du fluide à l'aspiration (exprimée en Kelvin), et d'autre part une fonction croissante du rapport de compression. Si  $P_a$  et  $P_r$  désignent les pressions à l'aspiration et au refoulement du compresseur :

$$\tau = (TEC + 273,15) f_c(P_r/P_a).$$

Lorsque le fluide ne peut pas être assimilé à un gaz idéal, cette relation reste cependant valable en première approximation.

### 2.1.2 Etude de la détente

Chacun sait, pour les avoir entendus fonctionner dans la rue ou dans un atelier comme un garage, que les **outils à air comprimé** permettent de convertir la pression d'un gaz en puissance mécanique. Ce que l'on sait moins, c'est que le travail produit par un gaz comprimé est d'autant plus important que sa température est élevée : il est donné en première approximation par une relation analogue à celle d'un compresseur :

$$\tau = (TET + 273,15) \text{ fd}(\text{Pr}/\text{Pa}).$$

Illustrons ce point en étudiant la détente qui prend place dans la turbine d'une turbine à gaz. Plus la température d'entrée turbine TET (égale à la température en sortie de chambre de combustion) est élevée, plus le travail fourni est important. L'influence de cette grandeur est significative : pour un taux de détente de 16, une variation de 100 °C de la température atteinte en sortie de chambre de combustion fait varier la puissance de la turbine de plus ou moins 8 % autour de sa valeur moyenne (figure 2.1.3).

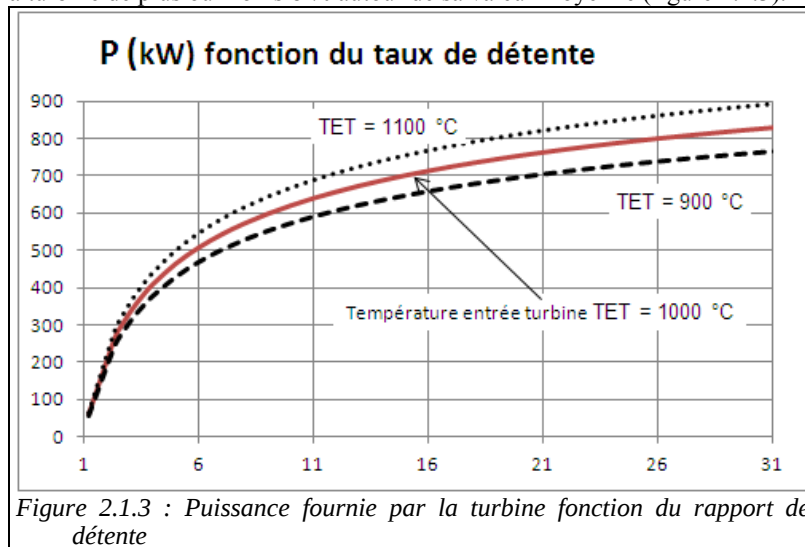


Figure 2.1.3 : Puissance fournie par la turbine fonction du rapport de détente

### 2.1.3 Etude de la turbine à gaz complète

Intéressons-nous maintenant à ce qui se passe dans la machine complète, assemblage d'un compresseur, d'une chambre de combustion et d'une turbine.

Dans la chambre de combustion, l'énergie chimique apportée au cycle sous forme de combustible est convertie en énergie thermique qui sert à porter les gaz chauds à la haute température TET.

La chambre de combustion étant à peu près isobare, les pressions en amont et en aval sont les mêmes. Etant donné que la pression atmosphérique règne à l'aspiration du compresseur et à l'échappement de la turbine, les rapports de compression et de détente sont égaux. Nous ne considérerons donc plus dans ce qui suit que le premier de ces paramètres.

La figure 2.1.4 présente, pour une turbine à gaz de caractéristiques courantes (températures d'entrée compresseur TEC de 15 °C et d'entrée turbine TET de 1000 °C), traversée par un débit de 1 kg/s, la variation de la puissance de compression (trait plein), de la puissance délivrée par la détente (en tiretés), et de la puissance nette produite par la machine (en pointillés), en fonction du rapport de compression.

Par exemple, pour un taux de compression de 6, la puissance de compression est de l'ordre de 220 kW, et la puissance utile de 270 kW.

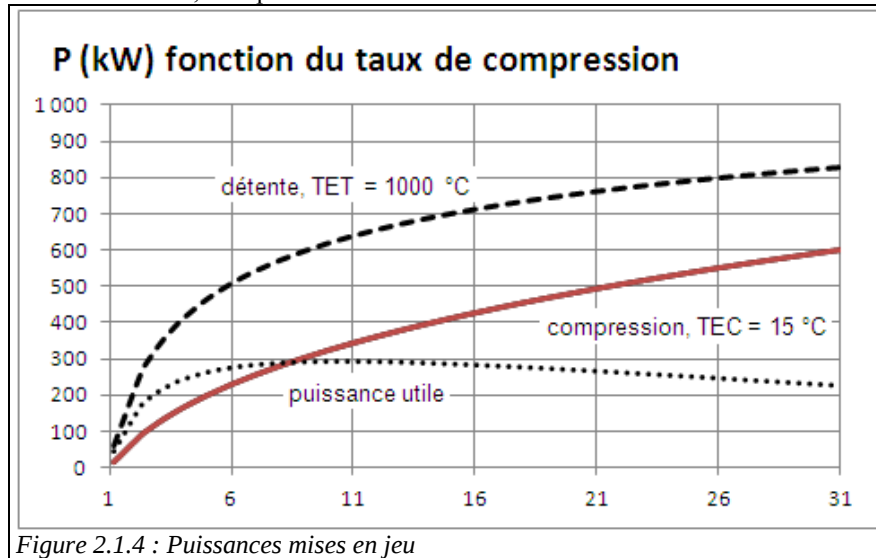


Figure 2.1.4 : Puissances mises en jeu

Si l'on détendait l'air comprimé à la température atteinte en fin compression, sans apport de chaleur complémentaire, le bilan serait négatif à cause des pertes qui prennent place dans le compresseur et la turbine.

Ce n'est que parce que l'on réalise la réaction de combustion à pression constante, qui porte les gaz à haute température, que le travail fourni par la turbine est supérieur à celui absorbé par le compresseur.

Le maximum de puissance nette est ici obtenu pour un taux de compression de l'ordre de 10, mais l'optimum est assez plat.

L'influence des températures d'entrée dans le compresseur et dans la turbine est encore plus sensible sur les performances globales de la machine que sur les composants seuls, car la puissance utile est égale à la différence entre les puissances mises en jeu. A titre d'exemple, la puissance utile baisse de 31,5 % lorsque la température extérieure passe de  $-20\text{ °C}$  à  $+20\text{ °C}$ .

#### 2.1.4 Conclusions

Cette étude nous a permis de mettre en évidence l'influence des principales caractéristiques de la machine (rapport de compression, températures d'entrée dans le compresseur et dans la turbine) sur les performances d'une turbine à gaz.

Polycopié : MOOC Conversion Thermodynamique de la Chaleur / MS

Elle a montré qu'il est préférable de refroidir le plus possible un gaz avant de le comprimer, et de le chauffer le plus possible avant de le détendre, les puissances mises en jeu étant proportionnelles à la température absolue à l'entrée du composant.

Elle a aussi montré le rôle joué par le rapport de compression ou de détente sur les performances de la machine.

Ce sont des points sur lesquels nous reviendrons ultérieurement.

Une erreur courante est de considérer que la pression devrait augmenter dans la chambre de combustion, comme dans celles qui constituent des systèmes fermés.

Pourtant, le phénomène est analogue à celui qui prend place dans une chaudière à gaz murale, dont la combustion se déroule bien à la pression atmosphérique, le système étant ouvert, ou bien dans les dispositifs que tout le monde connaît, utilisés pour la cuisson ou le chauffage, qu'il s'agisse de gazinières, réchauds à gaz, cheminées ou autres. Ils ne comportent aucun élément faisant varier la pression, qui reste donc constante.

## 2.2 Energies mises en jeu dans les transformations

Pour pouvoir modéliser les systèmes énergétiques qui nous intéressent, il est nécessaire d'introduire un certain nombre de notions de thermodynamique.

Notre objectif étant d'adopter une approche aussi simplifiée que possible, nous limiterons au maximum les développements théoriques.

Etudiez bien ces notions, même si elles vous paraissent un peu vagues au début. Leur signification vous apparaîtra de plus en plus limpide au fur et à mesure que vous aurez l'occasion de les mettre en pratique pendant ce cours.

### 2.2.1 Notions de système thermodynamique et d'état

Il est à ce stade nécessaire d'introduire la notion de **système thermodynamique**, qui représente une quantité de matière isolée de ce que l'on appelle **l'environnement** par une **frontière** réelle ou fictive (on parle aussi de paroi). Cette notion de système est très générale en physique et se retrouve notamment en mécanique.

Commençons par introduire la notion de **système thermodynamique**, qui représente une quantité de matière isolée de ce que l'on appelle **son environnement** par une **frontière** réelle ou fictive (on parle aussi de paroi). Cette notion de système est très générale en physique et se retrouve notamment en mécanique.

Ces trois notions sont fondamentales et seront très utilisées dans la suite du cours.

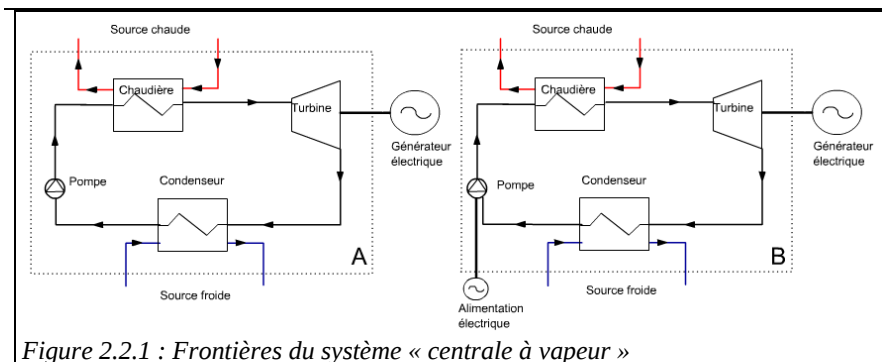


Figure 2.2.1 : Frontières du système « centrale à vapeur »

A titre d'illustration, la figure 2.2.1 montre qu'il est possible de définir de plusieurs manières la frontière du système « centrale à vapeur », représentée par un rectangle tracé en pointillé.

La définition habituelle, identifiée par la lettre A, est illustrée par la partie gauche de la figure. Les flux traversant la frontière sont alors les gaz chauds provenant de la source chaude et le fluide de refroidissement émanant de la source froide. La puissance mécanique sortant du système est celle qui entraîne le générateur électrique. Elle suppose implicitement que le travail de compression de la pompe est prélevé sur celui fourni par la turbine.

La seconde définition du système, identifiée par la lettre B, est illustrée par la partie droite de la figure. Elle suppose que le travail de compression de la pompe n'est pas prélevé sur le travail fourni par la turbine, mais apporté sous forme d'électricité par l'environnement. Nous verrons plus loin les implications de ce changement de frontière sur le calcul du bilan énergétique du système.

Retenez qu'il faut toujours bien spécifier la frontière du système considéré.

Une seconde notion très importante en pratique est celle **d'état**. Elle permet de caractériser de manière concise un système. Par exemple en mécanique, la connaissance de la position et de la vitesse d'un objet matériel placé dans un champ de forces donné permet de déterminer sa trajectoire future.

La notion **d'état d'un système** peut ainsi être définie comme "l'information minimale nécessaire à la détermination de son comportement futur en l'absence de perturbation extérieure".

### 2.2.2 Variables et fonctions d'état

Cet état est caractérisé par ce que l'on appelle un jeu de **variables d'état** permettant de complètement caractériser un système à un instant donné.

En mécanique, les grandeurs de position et la vitesse sont des variables d'état.

Pour un système thermodynamique **simple** comme une particule de matière d'un fluide pur, il existe plusieurs ensembles de variables d'état répondant à cette définition. Les

plus utilisés dans la littérature sont les couples suivants : (pression, température), (pression, volume), (température, volume).

Pour des systèmes plus complexes, il peut être nécessaire d'ajouter à ces variables d'état deux autres grandes catégories :

- les variables chimiques ;
- les variables électriques.

Une **fonction d'état** est une grandeur dont la valeur ne dépend que de l'état du système, et non pas de son histoire.

Nous noterons avec un  $d$  une évolution infinitésimale d'une fonction d'état : par exemple  $dP$  pour une petite variation de pression

Cependant, lors de l'évolution d'un système thermodynamique, de nombreuses grandeurs dépendent non seulement des états initial et final du système, mais aussi de la manière dont l'évolution prend place.

Ces grandeurs sont souvent appelées des **fonctions de parcours**, pour indiquer cette dépendance<sup>1</sup>. C'est le cas du travail mis en jeu ou bien de la chaleur échangée aux frontières du système. Nous noterons avec un  $\delta$  une évolution infinitésimale d'une fonction de parcours : par exemple  $\delta W$  pour une petite variation de travail

Dans le cas général, le calcul de ces fonctions de parcours est plus complexe que celui des fonctions d'état.

### 2.2.3 Systèmes ouverts et fermés

En thermodynamique, on est couramment amené à distinguer deux types de systèmes : les **systèmes fermés**, qui n'échangent pas de matière avec l'environnement, et les **systèmes ouverts** qui en échangent.

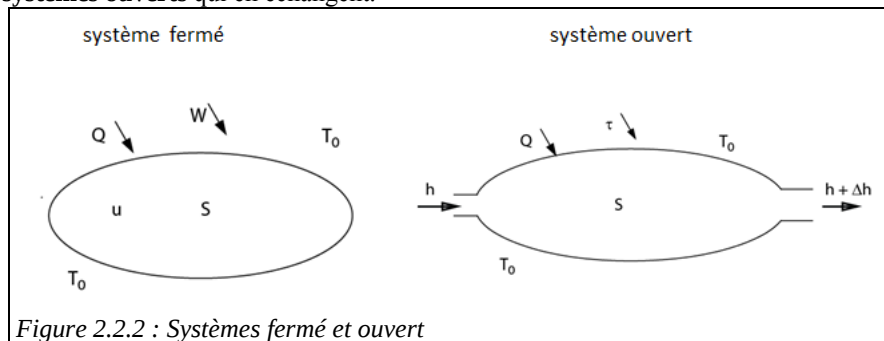


Figure 2.2.2 : Systèmes fermé et ouvert

<sup>1</sup> Une analogie peut être faite avec des déplacements en montagne : pour une différence d'altitude donnée, la variation d'énergie potentielle d'un mobile effectuant le parcours est toujours la même car c'est une fonction d'état, tandis que la distance parcourue varie selon le chemin suivi car c'est une fonction de parcours. Une activité illustre ce point. <http://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/eval/etatParcours.html>

Cette distinction est importante car les propriétés thermodynamiques ne s'expriment pas de la même manière en système fermé et en système ouvert. Paradoxalement même, elles sont généralement plus faciles à calculer pour les systèmes ouverts, bien qu'ils mettent en jeu un transfert de matière.

A ce stade de notre présentation, il importe de bien noter que le caractère ouvert ou fermé d'un système **dépend des frontières** que l'on choisit pour le définir, ce qui peut induire de petites difficultés sémantiques.

La présentation qui a été faite précédemment du fonctionnement des **composants** qui interviennent dans les machines que nous désirons étudier a montré qu'ils opèrent en système ouvert, étant tous traversés par des fluides.

Toutefois, si nous nous intéressons à l'ensemble du circuit du fluide de travail d'une centrale à vapeur ou d'une machine de réfrigération, on peut considérer qu'il s'agit d'un système fermé.

La détermination des performances de ces installations nécessitant comme nous le verrons plus loin de distinguer les différents composants, ceux-ci seront calculés individuellement comme des systèmes ouverts, bien que le cycle global soit fermé.

De manière analogue, si l'on s'intéresse au **fonctionnement interne d'une machine alternative** comme un compresseur volumétrique ou un moteur essence ou diesel, on est amené à distinguer des phases en système ouvert (admission et refoulement) et des phases en système fermé lorsque les soupapes sont fermées (compression, combustion, début de détente).

### *2.2.5 Echanges d'énergie entre un système thermodynamique et l'environnement*

Nous allons maintenant étudier les énergies qu'échangent avec leur environnement les composants des systèmes énergétiques qui nous intéressent, et énoncer le premier principe de la thermodynamique, fondamental en pratique.

Dans ce qui suit, sauf indication contraire, nous raisonnerons en système fermé sur une quantité de matière de 1 kg, et, en système ouvert sur un débit de fluide de travail de 1 kg/s. Ceci nous permettra d'alléger les notations en ne faisant pas apparaître les quantités mises en jeu.

Il est fondamental de bien noter que les systèmes thermodynamiques mis en jeu dans les composants qui nous intéressent n'échangent de l'énergie avec l'environnement que sous **deux** formes bien distinctes :

- de la chaleur, par échange thermique aux frontières du système. Elle est généralement notée  $Q$  ;
- du travail, par action des forces de pression sur ces frontières, le travail des forces de pesanteur à l'intérieur du système pouvant être négligé du fait que les différences d'altitude sont très faibles. Ce travail est généralement noté  $W$  en système fermé, et

$\tau$  en système ouvert, où on le qualifie de travail utile<sup>2</sup> comme cela sera précisé plus loin.

Nous avons indiqué précédemment que, pour calculer ces deux formes d'énergie mises en jeu dans une évolution, il ne suffit pas de connaître les états initial et final du système, mais il faut de plus connaître le chemin parcouru pendant la transformation.

Il s'agit d'un problème classique : comment peut-on calculer le changement global d'une variable au cours d'une évolution ?

La solution, si elle existe, relève du calcul différentiel. Elle consiste à décomposer l'évolution en ce qu'on appelle des **évolutions élémentaires**, pour lesquelles on peut écrire les équations de la physique en considérant que les grandeurs restent constantes. La prise en compte de la variation des propriétés se fait ensuite en « intégrant » les équations différentielles ainsi écrites, ce qui permet d'exprimer les lois suivies par l'évolution complète. Dans le cadre de cette présentation allégée, nous nous limitons à indiquer comment il faut procéder, mais il est inutile d'aller plus loin.

Pour les systèmes thermodynamiques simples, on peut ainsi assez facilement montrer que, pour une évolution élémentaire en système ouvert,  $\tau$  et  $Q$  sont donnés par les expressions suivantes :

$$\delta\tau = v \, dP \text{ ou } dP = \rho \, \delta\tau$$

Le travail utile reçu par les parois mobiles du système est égal au produit du volume massique du fluide par la variation élémentaire de la pression en son sein. Appliquée à un étage de compresseur, cette expression indique que le taux de compression réalisé est égal au produit de la densité  $\rho$  du fluide par le travail communiqué à l'arbre de la machine.

La seconde équation est :

$$\delta Q = C_p \, dT - v \, dP$$

Cette dernière relation exprime simplement un fait expérimental essentiel, base de la thermodynamique des fluides compressibles : la chaleur  $\delta Q$  échangée avec l'extérieur se traduit par une modification linéaire de l'état thermodynamique du système, ici caractérisé par deux variables d'état, la température  $T$  et la pression  $P$ .

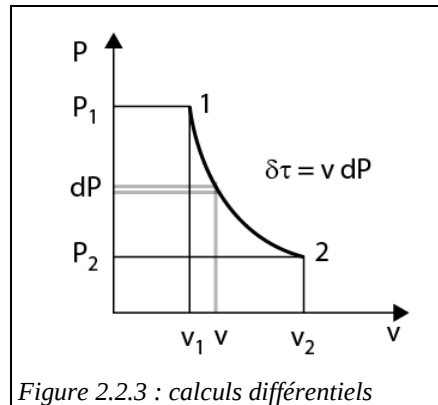


Figure 2.2.3 : calculs différentiels

---

<sup>2</sup> Il faut faire attention à ce que l'adjectif « utile » est utilisé dans cette présentation avec des sens légèrement différents, consacrés par l'usage. Le sens pertinent sera à chaque fois précisé en fonction du contexte.

Si la pression reste à peu près constante, ce qui est le cas dans la plupart des échangeurs comme nous l'avons vu,  $dP = 0$  et la variation de température du fluide est proportionnelle à la chaleur fournie au système.

Dans le cadre de cette présentation, nous ne chercherons pas à résoudre ces équations : nous déterminerons les énergies mises en jeu en utilisant des fonctions d'état bien choisies.

Insistons sur un point important : il ne faut pas confondre la chaleur  $Q$  et la température  $T$ , même si des relations existent entre les deux notions :

- la température est une mesure du degré d'agitation des molécules du fluide de travail : plus elles sont agitées, plus sa température est élevée ;
- la chaleur est un transfert d'énergie thermique d'un système à un autre lorsqu'il y a une différence de température entre eux.

Lors du changement d'état d'un fluide pur, sa température reste constante, alors qu'il échange de la chaleur avec l'extérieur.

#### 2.2.6 Conservation de l'énergie : premier principe de la thermodynamique

Venons-en maintenant au premier principe de la thermodynamique.

On définit **l'énergie interne  $u$**  d'un système comme la somme des énergies cinétiques microscopiques (assimilables à l'agitation thermique des particules) et des énergies potentielles d'interactions microscopiques (liaisons chimiques, interactions nucléaires) des particules constituant ce système. L'énergie interne correspond à l'énergie intrinsèque du système, définie à l'échelle microscopique, à l'exclusion de l'énergie cinétique ou potentielle d'interaction du système avec son environnement, à l'échelle macroscopique, celle qu'acquiert un corps du fait de sa masse et de sa vitesse.

L'énergie interne est définie à une constante arbitraire près  $u_0$ , souvent choisie telle que  $u = 0$  pour  $T = 25\text{ °C}$  et  $P = 1$  atmosphère. Son unité dans le Système International (SI) est le Joule, mais on l'exprime aussi fréquemment en kWh, sachant que  $1\text{ Wh} = 1\text{ Watt}$  pendant  $1\text{ h} = 1\text{ J/s} \times 3600\text{ s} = 3\,600\text{ J}$ .

La loi fondamentale qui gouverne le comportement des systèmes thermodynamiques est celle de la conservation de l'énergie, connue sous le nom **de premier principe de la thermodynamique**.

Il postule que la variation d'énergie interne  $\Delta u$  d'un système non isolé, interagissant avec son environnement et subissant une évolution, ne dépend que de l'état initial et de l'état final, ce qui signifie que  $u$  est une fonction d'état.

Le premier principe indique que, si l'énergie interne  $u$  du système varie, c'est qu'il y a échange d'énergie avec l'extérieur sous forme de travail et/ou de chaleur, et que la somme de  $W$  et de  $Q$  est égale à la variation d'énergie interne du système. Il peut ainsi s'écrire pour un système fermé sous la forme :

$$\Delta u = W + Q$$

Ce qui est remarquable, c'est que  $u$  est une fonction d'état, alors que les deux fonctions  $W$  et  $Q$  ne sont que des fonctions de parcours.

Précisons un point important en pratique : par convention, l'énergie reçue par un système est comptée positivement (son énergie interne croît), et celle cédée à l'extérieur est comptée négativement.

Pour un système fermé, le premier principe peut aussi s'exprimer sous la forme suivante : l'énergie contenue dans un système isolé ou qui évolue selon un cycle fermé reste constante, quelles que soient les transformations qu'il subit. Les différentes formes que peut prendre l'énergie d'un système : énergie mécanique, énergie calorifique, énergie potentielle, énergie cinétique... sont ainsi toutes équivalentes entre elles au sens du premier principe. Dans notre cas rappelons-le, seuls la chaleur et le travail seront pris en compte.

Ainsi exprimée, cette loi est très intuitive et facilement comprise : c'est une loi de conservation qui stipule que l'énergie ne se perd ni se crée, tout comme la masse.

Considérons par exemple l'équilibre thermique en hiver d'une maison chauffée à température constante 18 °C. Pour simplifier le problème, nous négligeons le renouvellement d'air, et supposons qu'elle est chauffée par électricité, de telle sorte qu'aucun fluide n'y entre ou n'en sort.

L'ensemble constitue un système fermé. La maison a des déperditions thermiques vers l'extérieur à travers ses parois, l'environnement étant plus froid, ainsi que, vers le sol. Elle dispose éventuellement de gains dus à l'ensoleillement.

Le premier principe indique que la puissance de chauffage est égale à la puissance thermique due à ces déperditions moins les gains dus au soleil.



Figure 2.2.4 : Maison en hiver

Pour être exact, il faut tenir compte des effets dus à l'inertie thermique de la maison, qui font qu'à certains moments de l'énergie est stockée dans ses murs et à d'autres elle est déstockée et participe au chauffage, mais ce raisonnement est tout à fait juste en moyenne : La température de la maison restant constante, son énergie interne ne varie pas, et toute l'énergie de chauffage qui entre dans la maison est égale à celle qui en sort du fait des déperditions thermiques.

Pour un système constitué d'une phase de masse  $m$ ,  $U = m u$ ,  $u$  étant l'énergie interne massique

L'unité de  $u$  est le Joule/kg, mais on l'exprime aussi fréquemment en kJ/kg.

L'énergie interne n'a cependant de sens que si le système est fermé, et demande à être généralisée lorsqu'on s'intéresse à un système ouvert dans lequel entre et/ou d'où sort de la matière.

Le principe du raisonnement consiste à suivre l'évolution d'un volume de contrôle fermé dans une machine périodique, et à calculer le travail des forces externes qui s'exerce pendant un cycle<sup>3</sup> sur l'ensemble de ses frontières, en distinguant les sections de passage des fluides ( $A_1$  et  $A_2$  au temps  $t_0$ , devenant  $B_1$  et  $B_2$  au temps  $t_0 + \Delta t$  dans la figure 2.2.5), les parois fixes, qui bien évidemment ne produisent ni ne reçoivent aucun travail, et les parois mobiles, au niveau desquelles s'exerce un certain travail  $\tau$ , que l'on appelle "**travail utile**", c'est-à-dire vu par l'utilisateur.

On peut montrer que, pour des machines cycliques, ce qui est bien le cas de celles que nous étudions, ce travail est algébriquement égal au travail  $W$  des forces de pression calculées en système fermé, augmenté de ce que l'on appelle le travail de transvasement, et qui est égal à  $-\Delta(Pv)$ , c'est-à-dire à la variation du produit de la pression et du volume massique entre l'aspiration et le refoulement de la machine.

On a donc  $W = \tau - \Delta(Pv)$

En faisant apparaître une grandeur  $h$  appelée **enthalpie** telle que  $\Delta h = \Delta u + \Delta(Pv)$ , le **premier principe en système ouvert** s'écrit :

$$\Delta h = \tau + Q$$

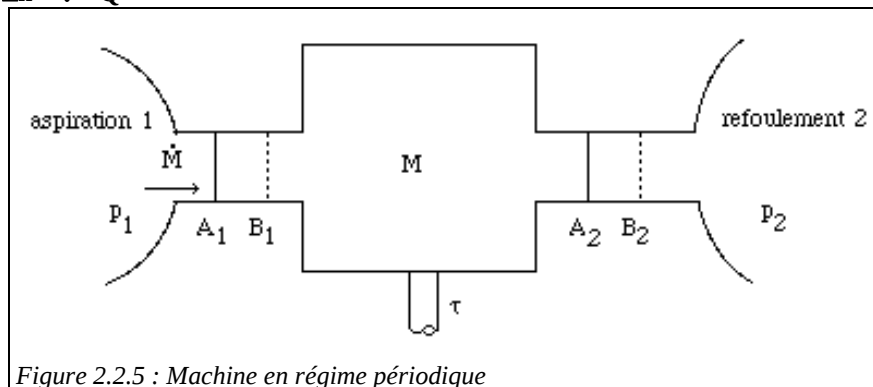


Figure 2.2.5 : Machine en régime périodique

Tout comme l'énergie interne  $u$ ,  $h$  est définie à une constante arbitraire près, et  $h$  se mesure en Joule (ou en kWh). C'est aussi une fonction d'état.

La généralisation du premier principe aux systèmes ouverts s'exprime sous la forme suivante : la variation d'enthalpie d'un système ouvert est égale à la somme du travail utile s'exerçant sur les parois mobiles et de la chaleur échangée avec l'extérieur.

<sup>3</sup> Nous nous limitons à cette hypothèse, moins restrictive que celle de l'existence d'un régime permanent, parce qu'elle suffit à notre propos.

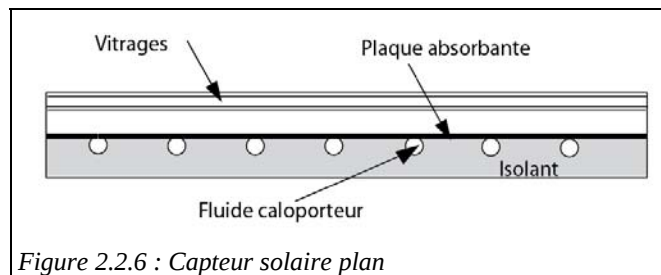
L'enthalpie apparaît ainsi simplement comme la généralisation aux systèmes ouverts de l'énergie interne pour les systèmes fermés. Sur le plan pratique, c'est bien ainsi qu'il suffit de considérer cette fonction d'état : **il s'agit de l'énergie associée au système considéré**, ni plus ni moins.

Comme nous le verrons dans la suite de ce cours, cette notion est fondamentale en pratique.

Pour illustrer le premier principe en système ouvert, prenons deux exemples.

Considérons pour commencer un capteur solaire thermique plan. Cette figure montre la vue en coupe d'un tel capteur. L'absorbeur est composé d'une plaque métallique sur laquelle sont soudées des canalisations dans lesquelles circule le fluide caloporteur. Les déperditions thermiques vers l'avant du capteur sont réduites par un ou plusieurs vitrages (2 sur la figure) et celles vers l'arrière par un isolant.

Le flux solaire incident est absorbé par la plaque métallique qui est refroidie d'une part par le fluide caloporteur qui s'échauffe, et d'autre part par les pertes thermiques du capteur vers l'extérieur.



Le premier principe indique que l'énergie solaire reçue par le capteur est égale à la somme des déperditions thermiques du capteur et de la variation d'enthalpie du fluide caloporteur.

Considérons comme deuxième exemple un sèche-cheveux électrique.

Il est constitué d'un ventilateur placé en amont d'une résistance électrique. Lorsque le sèche-cheveux fonctionne, le ventilateur aspire de l'air qui est légèrement comprimé et passe à travers la résistance électrique qui l'échauffe. Le jet d'air chaud sert ensuite à sécher les cheveux.

Le premier principe indique que l'énergie électrique consommée par l'appareil est égale à la variation d'enthalpie de l'air qui le traverse.

Pour un système constitué d'une phase de masse  $m$ ,  $H = m h$ ,  $h$  étant enthalpie massique

L'unité de  $h$  est le Joule/kg, mais on l'exprime aussi fréquemment en kJ/kg.

Le passage des énergies aux puissances se fait en multipliant simplement les énergies massiques par le débit-masse du fluide qui traverse le système considéré.

L'unité des puissances est le Watt, mais on les exprime aussi fréquemment en kW

Un Watt = 1 Joule/s

On a coutume en physique de noter un débit par un point au-dessus de la grandeur considérée, pour indiquer qu'il s'agit de cette grandeur par unité de temps.

---

Ainsi un débit-masse s'écrit  $\dot{m}$ , et une puissance enthalpique  $\dot{H}$  :

$$\dot{H} = \dot{m} h$$

Comme nous l'avons dit, pour des raisons de commodité et pour alléger les notations, nous nous ramènerons, chaque fois que possible, à l'unité de masse du fluide considéré.

### 2.3 Application aux quatre fonctions élémentaires identifiées précédemment

Nous allons montrer dans cette section que la variation d'enthalpie du fluide qui les traverse suffit pour déterminer l'énergie mise en jeu dans les quatre transformations élémentaires que nous avons identifiées précédemment. Les résultats présentés ici correspondent à la réalité industrielle : pour des raisons technologiques diverses, on ne sait pas fabriquer, dans la plupart des cas, des composants capables à la fois de transférer de la chaleur et de réaliser une compression ou une détente performante. On sépare donc les différentes fonctions à assurer.

#### 2.3.1 Compressions et détentes avec travail

Comme nous l'avons vu précédemment, les détentes peuvent être effectuées avec ou sans travail. Dans le premier cas, la machine la plus généralement utilisée est la turbine. Dans le second cas, il s'agit d'une simple vanne ou d'un filtre.

Les machines réalisant la compression ou la détente d'un fluide ont une conception très compacte pour des raisons de poids, d'encombrement et de coût. Pour les mêmes raisons, elles tournent très vite (plusieurs milliers de tours par minute). Chaque parcelle de fluide y séjourne très peu de temps.

Par ailleurs, les fluides mis en jeu dans les compresseurs et turbines sont très souvent des gaz dont les coefficients d'échange thermique  $K$  ont des valeurs faibles.

Les courts temps de séjour dans la machine, les petites surfaces de contact fluide-paroi, et les faibles coefficients d'échange font que l'échange de chaleur aux parois de la machine est minime et qu'on peut modéliser avec une très bonne approximation la transformation par une évolution où  $Q = 0$ . On dit que **le fonctionnement de ces machines est adiabatique**. Cet adjectif vient du grec *adiabatos*, qui signifie « qui ne peut être traversé » (par la chaleur).

Dans une machine adiabatique de compression ou détente, l'écriture du premier principe en système ouvert montre que le travail utile  $\tau$  est égal à la variation d'enthalpie du fluide  $\Delta h$  : le travail à fournir sur l'arbre d'un compresseur ou celui fourni par une turbine est égal à la variation d'enthalpie du fluide qui traverse la machine.

#### 2.3.2 Détentes sans travail : vannes, filtres

Comme indiqué précédemment, les détendeurs statiques tels que vannes, filtres comme le détendeur d'une machine de réfrigération constituent une classe d'appareils qui ne produisent pas de travail utile, du fait de l'absence de parois mobiles, et n'échangent pas de chaleur avec l'extérieur.  $\tau$  et  $Q$  sont donc nuls tous les deux, ainsi que  $\Delta h$ . L'enthalpie

Polycopié : MOOC Conversion Thermodynamique de la Chaleur / MS

est donc constante. La transformation correspondante est quelquefois appelée un **laminage isenthalpique**.

### 2.3.3 Echanges de chaleur

Nous avons vu que les composants appelés à transférer de la chaleur d'un fluide à un autre nécessitent de grandes surfaces d'échange, les flux thermiques leur étant proportionnels. Des considérations techniques et économiques amènent à adopter des dispositifs purement statiques. Par exemple, de grands faisceaux de tubes en parallèle, parcourus intérieurement par un fluide pendant que l'autre circule à l'extérieur.

**$\tau$  est alors nul en raison de l'absence de parois mobiles.**

Lors d'un échange de chaleur, la chaleur  $Q$  cédée ou fournie par un fluide à l'autre est donc égale à sa variation d'enthalpie  $\Delta h$ .

Nous réintroduisons ici le débit dans l'équation étant donné qu'il y en a un pour chacun des fluides et qu'il importe de ne pas les confondre.

Notez bien par ailleurs que, si l'on cherche à augmenter l'échange thermique entre les deux fluides, on s'efforce aussi de limiter le transfert de chaleur vers l'extérieur de l'échangeur. On peut ainsi considérer que l'échangeur est globalement adiabatique.

Si on note  $\Delta h_c$  la variation d'enthalpie du fluide chaud (qui se refroidit), et  $\Delta h_f$  celle du fluide froid (qui se réchauffe), l'écriture du premier principe pour l'ensemble de l'échangeur s'écrit :

$$\dot{m}_c \Delta h_c + \dot{m}_f \Delta h_f = 0$$

$$\text{ou encore : } \dot{m}_f \Delta h_f (>0) = - \dot{m}_c \Delta h_c (<0)$$

### 2.3.4 Chambres de combustion, chaudières

Dans une chambre de combustion ou une chaudière, il n'y a pas non plus de parois mobiles, et  $\tau = 0$ .

La chaleur  $Q$  cédée au fluide qui la traverse est égale à sa variation d'enthalpie  $\Delta h$ .

Vis-à-vis du fluide de travail, une chaudière peut d'ailleurs être considérée comme un échangeur.

### 2.3.5 Activités

Appliquer le premier principe à différents composants

## 2.4 Evolutions de référence

Nous avons montré que la détermination de la variation d'enthalpie du fluide qui les traverse suffit pour calculer l'énergie mise en jeu dans ces quatre transformations élémentaires.

Mais cette information n'est pas suffisante pour les caractériser complètement. L'analyse physique de leur comportement, qui dépend intimement de la technologie retenue, permet de mettre en évidence les évolutions de référence correspondant au

fonctionnement de composants qui seraient parfaits, pour lesquels une variable ou une fonction d'état bien choisie reste constante et à laquelle on sait associer une équation simple d'évolution.

Il est ensuite possible de caractériser la transformation réelle en introduisant un facteur d'imperfection, souvent appelé rendement ou efficacité, qui exprime ses performances par rapport à celle de l'évolution de référence. Cette manière de faire facilite grandement la compréhension des transformations subies par les fluides.

Le choix des évolutions de référence est basé sur l'analyse physique des phénomènes qui prennent place dans les composants. Comme nous le verrons, elles se révèlent très utiles lorsque l'on cherche à représenter graphiquement le cycle étudié dans un diagramme thermodynamique et à en déterminer les performances à partir des fonctions d'état.

#### *2.4.1 Compressions et détente avec travail*

Nous avons vu que les compresseurs et turbines sont des machines dont les échanges de chaleur avec l'extérieur sont généralement négligeables, que l'on qualifie **d'adiabatiques**. Rappelons que les analyses de ces composants ont montré que, dans une telle évolution, la température et la pression du fluide varient simultanément.

Dans un compresseur parfait, c'est-à-dire dont le fluide de travail ne subirait ni frottements ni chocs, l'échauffement du fluide et le travail à fournir pour obtenir un rapport de compression donné seraient minimaux. Dans une turbine parfaite, le refroidissement du fluide et le travail produit pour un rapport de détente donné seraient maximaux.

L'évolution de référence pour une compression ou détente avec travail est donc **l'adiabatique parfaite ou réversible**<sup>4</sup>.

#### *2.4.2 Echanges de chaleur*

Comme nous l'avons expliqué plus haut, on cherche dans les échangeurs à réduire autant que possible les pertes de charge. En effet, toute baisse de pression dans les échangeurs doit être compensée par un surcroît de travail de compression et/ou se traduit par un travail de détente plus faible. La pénalité induite par les pertes de charge s'exprimant sous forme de travail mécanique, on cherche toujours à la minimiser.

Si les pertes de charge sont faibles, la pression restera à peu près constante et les échanges thermiques peuvent en première approximation être supposés isobares. L'évolution de référence est donc **l'isobare**.

#### *2.4.3 Chambres de combustion, chaudières*

De la même manière, les chambres de combustion fonctionnant en système ouvert et les chaudières sont généralement considérées comme isobares. La combustion a donc lieu à

---

<sup>4</sup> Nous qualifierons pour le moment de réversible une transformation sans échange de chaleur avec l'extérieur et sans pertes par frottement.

Figure 2.4.1 : Des composants aux évolutions de référence