

### III – NOTIONS FONDAMENTALES SUCCINTES D'ANALYSE (ETAT, TRANSFORMATION ET CYCLE).

**L'état** : C'est la première notion à connaître en thermodynamique et dans ses applications. En fait un système thermodynamique est composé en général du dispositif lui-même et d'un fluide de travail (exemple pour un système de pompe à eau : le dispositif sera la pompe elle-même et le fluide de travail sera l'eau).

On a besoin pour faire une analyse thermodynamique de connaître l'état à un certain moment et place dans le dispositif du fluide de travail. Pour des raisons pratiques on suppose que ce fluide se trouve dans un état d'équilibre thermodynamique général (thermique « T reste la même », mécanique « P reste la même », chimique « pas de réactions chimiques » et de phase « pas de changement de phase »).

Cet état d'équilibre communément appelé « état » est caractérisé par des variables dites variables d'état. Ce sont T : la température, P : la pression, v : le volume spécifique, u : l'énergie interne, h : l'enthalpie et s : l'entropie. Il n'est pas nécessaire de les connaître toutes pour définir complètement un état (avoir la possibilité de trouver n'importe lequel).

Dans notre cas où les fluides sont purs, la connaissance de deux paramètres indépendants suffit. Pour un état on a parfois besoin de déterminer un paramètre non spécifié dans l'état défini initialement à l'aide de deux paramètres. Dans ce cas on utilise des tables trouvées dans la littérature ou un diagramme ou encore une expression analytique pour trouver la valeur de n'importe quel autre paramètre.

**La transformation** : Le passage d'un système thermodynamique d'un état vers un autre est appelé transformation. Nous ne nous étalerons pas plus sur cette notion sauf à dire qu'il suffit du changement d'un seul paramètre d'un état pour qu'il change et qu'apparaît une transformation dans le système.

C'est pour une transformation qu'existe les deux principales équations fondamentales de la thermodynamique : le premier et le second principe de la thermodynamique.

Le **premier principe** est une équation qui résume l'aspect quantitatif de l'énergie et sa pérennité (n'apparaît ni ne disparaît de ou vers nulle part = ne fait que se transformer d'une forme vers une autre).

En fonction de la nature fermée ou ouvert du système à analyser, il s'écrit :

$$Q - W = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p \quad (\text{système fermé})$$

Avec Q = chaleur échangée entre le système et son milieu extérieur. [kJ].

W = travail échangée entre le système et son milieu extérieur. [kJ].

$\Delta E_c$  = Variation de l'énergie cinétique du fluide de travail. [kJ].

$\Delta E_p$  = Variation de l'énergie potentielle du fluide de travail. En [kJ].

$\Delta U$  = Variation de l'énergie interne du fluide de travail. En [kJ].

$$Q - W = \Delta H + \Delta E_c + \Delta E_p \quad (\text{système ouvert à écoulement continu})$$

$\Delta H$  = Variation de l'enthalpie du fluide de travail. En [kJ].

On notera que la variation  $\Delta$  pour un système fermé se fait entre un état initial et un état final, tandis que pour un système ouvert simple (une entrée et une sortie) elle se fait entre la sortie et l'entrée. En cryogénie nous ne rencontrerons que des systèmes ouverts.

Dans les systèmes thermodynamiques ouverts simples la transformation est faite dans un dispositif à une entrée et une sortie fonctionnant à régime continu pour lequel s'applique les expressions précédentes).

**Le second principe :** Ce principe introduit en général l'aspect qualitatif de l'énergie (comme le premier exprime son aspect quantitatif). En fonction du domaine il peut être formulé de diverses façons : pour les moteurs par exemple par l'expression d'un rendement thermique ou un coefficient de performance (COP) pour une machine frigorifique ...etc.

Notons que c'est ce principe qui introduit la variable d'état «entropie S ([kJ/kg.K]).

On rencontre une variété de systèmes ouverts que nous exposerons très simplement avec leurs caractéristiques thermodynamiques.

**Second principe :** Pour une transformation quelconque le second principe de la thermodynamique exprime de diverses façons sa non idéalité. Les causes de la non idéalité sont entre autres l'irréversibilité, le transfert de chaleur ...etc. L'expression du 2<sup>nd</sup> principe se fera donc par rapport à la transformation idéale. Chaque dispositif dans un domaine donné à son dispositif idéal.

Ci-après les caractéristiques des dispositifs utilisés dans la cryogénie.

### Nom : **Compresseur**

Fonction : Augmente la pression d'un gaz (ou d'une vapeur).  $P_2 > P_1$

Premier principe :  $Q - W = \Delta H + \Delta E_c + \Delta E_p$        $\Delta E_c \approx 0$  ;  $\Delta E_p \approx 0$  (si rien n'est mentionné)

Signes conventionnels des paramètres du 1<sup>er</sup> principe :  $Q < \text{ou} \approx 0$ ,  $W < 0$ ,  $\Delta H > 0$

Second principe : Le compresseur idéal est en général le compresseur isentropique sauf dans le cas de la cryogénie où il est isothermique, et pour lequel

$$Q = m_1 T_1 (s_2 - s_1) \quad \text{et} \quad W = m_1 T_1 (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)$$

### Nom : **L'échangeur de chaleur**

Fonction : Comme son nom l'indique il échange de la chaleur entre deux ou plusieurs écoulements.

Premier principe : Pour l'ensemble de l'échangeur comme système et en première approximation :  $Q = 0$ .

Second principe : L'échangeur de chaleur idéal serait l'échangeur isobare et adiabatique. Le paramètre énergétique caractérisant le second principe est son « efficacité » é qui est le rapport entre

la quantité de chaleur échangée réellement, et celle échangée idéalement. Toutes ces quantités de chaleur échangées s'expriment en différences d'enthalpies.

**Nom : La vanne de détente (ou de Joule-Thomson)**

**Fonction :** Dispositif de détente simple. Il diminue la pression d'un écoulement pour baisser sa température :  $P_2 < P_1 \longrightarrow T_2 < T_1$ ; (sous certaines conditions).

**Premier principe :**  $Q - W = \Delta H + \Delta E_c + \Delta E_p$  ;  ~~$Q - W = \Delta H + \Delta E_c + \Delta E_p$~~  ;

$Q, \Delta E_c, \Delta E_p \approx 0$ .  $W = 0$ , Soit :  $\Delta H = 0$  (transformation isenthalpique).

Donc la transformation à travers une vanne de détente est globalement isenthalpique.

L'expression du second principe est minime.

**Nom : Turbine, moteur de détente ou expandeur.**

**Fonction :** Dispositif de détente, plus compliqué, réduit donc la pression comme la vanne de détente sauf que dans ce cas il y a production de travail W.

**Premier principe :**  $Q - W = \Delta H + \Delta E_c + \Delta E_p$  avec  $Q \approx 0$  ;  $W > 0$  ;  $\Delta H < 0$  ;  $\Delta E_c \approx \Delta E_p \approx 0$ .

**Second principe :** La turbine idéale est une turbine isentropique. Le second principe s'exprime donc à travers un rendement isentropique (rapport de travail réel / travail idéal).

**Nom : Conduites (tuyauterie)**

Conduites joignant les divers dispositifs. Peuvent en premières approximations être considérées comme dispositifs isobares.

**Le cycle :** Suite de transformations dont l'état de la dernière correspond à l'état initial de la première transformation. Toutes les machines thermodynamiques fonctionnent suivant des cycles, afin d'assurer leur continuité de fonctionnement. Ce sont des cycles de quatre transformations.

**Premier principe :** Comme l'état final correspond à l'état initial et que H, Ec et Ep sont des fonctions d'état (dépendent des états initial et final)  $\Delta H = 0$  ;  $\Delta E_c = 0$  ;  $\Delta E_p = 0$  (ce que Q et W ne sont pas). Le premier principe pour un cycle s'écrit :

$$Q - W = \Delta H + \Delta E_c + \Delta E_p = 0 \text{ soit } Q - W = 0 \text{ ou encore } Q = W$$

**Second principe :** Il s'écrit de différentes façons en fonction de la classe du cycle. Ce sera un rendement thermique pour les moteurs, un coefficient de performance (COP) pour les cycles de réfrigération et les pompes à chaleur et un FOM pour un cycle cryogénique.