Bilans macroscopiques Chap.3 – Bilans d'énergie

1. Expression des deux principes de la thermo pour un écoulement stationnaire

1.1. Présentation du dispositif

1.2. Bilan d'énergie : expression du premier principe pour un écoulement stationnaire

1.3. Bilan d'entropie : expression du deuxième principe pour un écoulement stationnaire

1.4. Exemple de la détente de Joule-Thomson

2. Bilan d'énergie mécanique

2.1. Quand réaliser un bilan d'énergie mécanique plutôt qu'un bilan thermodynamique ?

2.2. TEM pour un système ouvert dans le cas d'un écoulement PSHI avec puissance utile Pu

2.3. Résolution de problème : hauteur du jet d'eau de Genève

2.4. Moyens concrets pour convertir chaque type d'énergie d'un écoulement PSHI dans une conduite

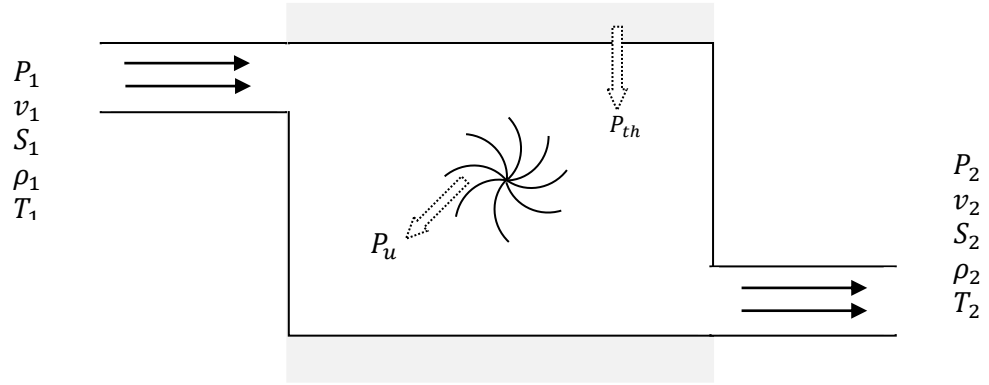
2.5. (Compléments) Cas avec plusieurs entrées et plusieurs sorties

Intro : On présente ici les ***deux principes de la thermodynamique*** énoncés pour des ***systèmes ouverts en régime stationnaires***. Enoncés ainsi, ils sont particulièrement adaptés à l'étude des machines thermiques. On profite de l'occasion pour énoncer le TEM pour des systèmes ouverts en régime stationnaire. L'expression est très similaire à celle du premier principe, sans les termes thermiques.

1. Expression des deux principes de la thermo pour un écoulement stationnaire

1.1. Présentation du dispositif

Le schéma-modèle pour établir l'expression des principes de la thermodynamique en écoulement stationnaire est une cavité dans laquelle pénètre le fluide à l'entrée et en sort à la sortie. Dans le cas général, il peut y avoir plusieurs entrées et plusieurs sorties, mais nous pouvons les regrouper ici en une seule entrée et une seule sortie. En amont et en aval de la cavité, les grandeurs intensives (les champs) sont considérés uniformes : l'écoulement est « simple ». A l'intérieur de la cavité, l'écoulement est en général « complexe » (turbulences etc.).



Dans cette cavité, il peut y avoir :

- l'hélice d'une pompe, elle donne de l'énergie au fluide
- ou une turbine, elle prélève de l'énergie au fluide

Cette hélice apporte *algébriquement* un travail mécanique nommé ***travail utile*** ou ***travail indiqué***.

- par unité de temps, on parle de ***puissance utile*** P_u (ou *puissance indiquée*)
- par unité de masse, on parle de ***travail massique utile*** w_u (ou *travail massique indiqué*)

Cette cavité peut aussi être en contact avec une source de chaleur, qui lui apporte *algébriquement* un transfert thermique. Comme pour le travail utile, ce transfert thermique peut être exprimé :

- par unité de temps P_{th} (puissance thermique)
- ou par unité de masse q (transfert thermique massique)

Remarque : En écoulement stationnaire, on rappelle que le débit de masse est conservatif le long d'un tube de courant. Il est alors intéressant d'exprimer les grandeurs physiques par unité de masse car il suffit de les multiplier par le débit de masse pour obtenir des grandeurs homogènes à une puissance :

$$P_u = D_m w_u \quad \text{et} \quad P_{th} = D_m q$$

Une fois le débit désiré fixé, on sait quelle puissance est consommée (cas d'une pompe) ou fournie (cas d'une turbine) à l'hélice située dans la cavité.

1.2. Bilan d'énergie : expression du premier principe pour un écoulement stationnaire

➢ **Activité 1 (ci-dessous) : Démonstration canonique ✪**

En appliquant le premier principe à un système fermé bien choisi, déterminer l'expression du premier principe pour les écoulements stationnaires, donnée ci-dessous
NB : on justifiera également l'absence de travail exercé par les parois internes (rigides) de la cavité

Premier principe pour les écoulements stationnaires
(par unité de masse circulante δm)

$$\Delta\left(\boldsymbol{h + e_c + e_{pp}}\right) = \boldsymbol{w_u + q}$$

- $h \overset{\text{def}}{=} u + \frac{P}{\rho}$ $\qquad e_c \overset{\text{def}}{=} \frac{1}{2}v^2$ $\qquad e_{pp} = gz$
- Δ *signifie « **variation entre l'entrée et la sortie** », exemple* $\Delta h \overset{\text{def}}{=} h_s - h_e$
- $\boldsymbol{w_u}$ *est le **travail massique utile** fourni par une pièce mobile à l'intérieur de la cavité (hélice p. ex.)*
- $\boldsymbol{q}$ *est le **transfert thermique massique** reçu par le fluide de la cavité depuis un thermostat extérieur*

Version par unité de teps

$$\boldsymbol{D_m} \times \Delta\left(\boldsymbol{h + e_c + e_{pp}}\right) = \boldsymbol{P_u + P_{th}}$$

Remarques :

- il suffit que *l'écoulement soit simple en amont et en aval* de la « zone d'écoulement complexe » pour appliquer cette formule, c'est ce qui en fait tout l'intérêt
- les travaux des forces de pression en amont et en aval sont inclus dans l'enthalpie. On les nomme « travaux de transvasement ». Dans un circuit fermé (machine thermique par exemple), *le travail de transvasement total reçu par le fluide circulant est nécessairement nul*, puisque c'est toujours une partie du fluide circulant dans la machine qui fournit ce travail… à une autre partie du *même* fluide circulant
- le travail utile est un travail exercé par *l'extérieur du système*, l'hélice ne faisant pas partie de la définition du système. C'est pourquoi ce travail apparaît dans le premier principe

1.3. Bilan d'entropie : expression du deuxième principe pour un écoulement stationnaire

Deuxième principe** (par unité de masse) **pour les écoulements stationnaires
(par unité de masse circulante δm)

$$\Delta \boldsymbol{s} = \boldsymbol{s_{ech}} + \boldsymbol{s_c}$$
$$\boldsymbol{s_{ech}} = \frac{\boldsymbol{q}}{\boldsymbol{T_{ext}}}$$

- $\Delta s \overset{\text{def}}{=} s_s - s_e$ *est la variation entre l'entrée et la sortie*
- q *est le transfert thermique massique reçu de la part du thermostat à température* T_{ext}

1.4. Exemple de la détente de Joule-Thomson

Les machines thermiques, les bouteilles de stockage de gaz (bouteilles de plongée par exemple) et de nombreux dispositifs utilisent des *détendeurs*. Le rôle d'un détendeur est de *diminuer la pression du fluide* entre l'entrée et la sortie du détendeur.

Par exemple, dans le cas d'une machine frigorifique, le détendeur provoque mécaniquement la vaporisation partielle du liquide circulant. Cette vaporisation nécessite de l'énergie, qui est soutirée au fluide sous forme thermique : sa température diminue donc au cours de la vaporisation. Devenue inférieure à celle de la source froide, le fluide circulant peut alors absorber de la chaleur à la source froide lors de son parcours dans l'évaporateur.

Il y a plusieurs façons de réaliser une détente de Joule-Thomson (ou détente de *Joule-Kelvin* : Kelvin est le nom de Thomson après avoir été anobli) :

- on crée une *zone d'étranglement* dans la conduite
- on interpose dans la conduite une *paroi poreuse* qui freine le passage du fluide

Ces deux méthodes ont en commun d'amplifier les effets de la viscosité. L'énergie stockée par le fluide baisse, et si la conduite ne change pas de section ni d'altitude après la zone d'étranglement, c'est forcément le stock associé à la pression qui baisse : d'où la détente. Sous certaines hypothèses (vérifiées expérimentalement avec une bonne approximation), cette détente est ***isenthalpique***.

Ces hypothèses sont :

- on néglige la variation d'énergie cinétique massique du fluide entre l'amont et l'aval du détendeur. Cette variation est généralement de l'ordre de qq $J.kg^{-1}$, bien inférieure aux variations des autres énergies massiques dans les dispositifs généralement étudiés. Exemple machine frigorifique : l'enthalpie massique varie de qq $10^5 J.kg^{-1}$…
- il n'y pas d'échanges thermiques avec l'extérieur : la transformation est adiabatique. Hypothèse valide si les parois du détendeur sont calorifugées, ou si le fluide est à température ambiante.

❖ Montrer que cette détente est isenthalpique
❖ La pression en amont de l'étranglement est notée P_1. Celle en aval est notée P_2. Laquelle des deux pressions est la plus grande, et quelle est l'origine physique de cette variation ?

2. Bilan d'énergie mécanique

2.1. Quand réaliser un bilan d'énergie mécanique plutôt qu'un bilan thermodynamique ?

La réponse est la même qu'en première année : lorsqu'on ne s'intéresse qu'aux aspects mécaniques du phénomène étudié, et pas aux aspects thermiques.

En mécanique du point, on montre que l'énergie mécanique se conserve tant qu'il n'y a pas de frottements. Lorsqu'il y a des frottements, la diminution (par unité de temps) de l'énergie mécanique est égale à la puissance des forces de frottements. La mécanique ne dit rien quant à l'énergie qui a disparu.

La thermodynamique est alors venue compléter la mécanique : la disparition d'énergie mécanique due aux frottements s'accompagne toujours de l'apparition d'effets thermiques. En conformité avec les mesures expérimentales, la thermodynamique postule la conservation de l'énergie (1er principe) en affirmant l'existence d'une énergie thermique stockable (l'énergie interne) et échangeable (transfert thermique). Les frottements apparaissent alors comme ***le mécanisme assurant la conversion d'énergie mécanique en énergie interne***.

Conclusion : Lorsqu'un système mécanique est soumis à des frottements, on peut choisir de ne pas décrire les effets thermiques : on utilise alors le théorème de l'énergie mécanique. On peut sinon choisir de s'intéresser aux effets thermiques et invoquer le 1er principe de la thermodynamique.

Remarque : On rappelle que la dissipation d'énergie mécanique n'engendre généralement qu'une (très) faible élévation de température. Il n'est donc pas aberrant de laisser les effets thermiques de côté et de ne traiter que l'aspect mécanique.

2.2. TEM pour un système ouvert dans le cas d'un écoulement PSHI avec puissance utile P_u

Dans le cas d'un écoulement ***PSHI*** en présence d'une partie mobile :

$$\boldsymbol{D_m \times \Delta\left(\frac{P}{\rho}+\frac{1}{2}v^2+gz\right)=P_u}$$

NB : l'écoulement peut être qualifié de parfait partout sauf dans la couche limite autour de la partie mobile en contact avec le fluide.

➢ **Activité 2 (ci-dessous) : Raisonnement canonique ✪**

Démontrer cet énoncé :

- en appliquant le TEM au système fermé
- en admettant que la puissance des actions intérieures au système ouvert est nulle grâce aux deux hypothèses : incompressible et parfait.



2.3. Résolution de problème : hauteur du jet d'eau de Genève

A l'aide des données associées à la photo ci-après, trouver l'ordre de grandeur de la hauteur du jet.

On fournit ci-dessous des informations techniques issues de la fiche touristique de la ville de Genève relative à son célèbre jet d'eau (cf. photographie) :
Débit : 500 L/s,
Puissance des pompes : 1 MW,
Puissance de l'éclairage : 9 kW

Question :

À l'aide de ces données, trouver l'ordre de grandeur de la hauteur du jet.

2.4. Moyens concrets pour convertir chaque type d'énergie d'un écoulement PSHI dans une conduite

Dans le cas d'un écoulement PSHI dans une conduite, il est intéressant de faire l'inventaire des différents moyens possibles pour convertir une forme d'énergie mécanique en une autre.
Dans les questions, on considère qu'un seul paramètre géométrique de la conduite a été modifié.

- Comment forcer le fluide à modifier son énergie cinétique ? Que devient / d'où provient cette énergie ?
- Comment forcer le fluide à modifier son E_p de pesanteur ? Que devient / d'où provient cette énergie ?
- Comment forcer le fluide à modifier sa pression ?
- Lorsqu'une pompe est présente dans une conduite, quelle énergie modifie-t-elle si la conduite reste inchangée avant et après la pompe ? Cette énergie augmente-elle ou diminue-t-elle lors du passage dans la pompe ?
- Idem dans le cas d'une turbine (dispositif qui joue le rôle inverse de celui d'une pompe)
- (Complément dans le cas SHI) Comment convertir une partie de l'énergie mécanique en énergie interne ?

2.5. (Compléments) Cas avec plusieurs entrées et plusieurs sorties

Le 1er principe pour un système ouvert en régime stationnaire a été écrit dans le cas d'une entrée et une sortie.

- Adapter la formulation du 1er principe (par unité de temps, en W) dans le cas de deux entrées et trois sorties

Notions et contenus	Capacités exigibles
1. Systèmes ouverts en régime stationnaire	
Premier et deuxième principes de la thermodynamique pour un système ouvert en régime stationnaire, dans le seul cas d'un écoulement unidimensionnel dans la section d'entrée et la section de sortie.	Établir les relations $\Delta h+\Delta e = w_u+q$ et $\Delta s=s_e+s_c$ et les utiliser pour étudier des machines thermiques réelles à l'aide de diagrammes thermodynamiques (T,s) et (P,h).