

**Titre :** LP21 : Principes de la thermodynamique en écoulement. Applications

**Présentée par :** Izia Meyre--Baqué

**Rapport écrit par :** Lucie Sallé

**Correcteur :** Jules Fillette, Julien Froustey

**Date :** 17/05/2021

Bibliographie		
Titre	Auteurs	Éditeur
Pérez, Thermodynamique		
DUNOD PC,PC*		
Diu, Thermodynamique		
Berthollet, Thermodynamique et applications		

## Plan détaillé

(indiquer parties, sous-parties, 1 ou 2 phrases d'explications par sous-partie, et références)

Niveau choisi pour la leçon : CPGE

Pré-requis : 1<sup>er</sup> et second principe de la thermodynamique (système fermé), fonction d'état (H,U,S), machine thermique, diagramme des frigorisques, gaz parfait, loi de Laplace

### Introduction

On s'est intéressés aux systèmes fermés dans les cours précédents et on va désormais considérer les systèmes ouverts en écoulement.

#### 1. Principes de la thermodynamique pour un écoulement 1D en régime stationnaire

##### 1.1 Système ouvert

- Def système ouvert : peut échanger de la matière avec l'extérieur
- Problème : on ne peut pas faire de bilans de matières, donc on va définir un système fermé
- Schéma d'un système fermé à  $t$  : volume de contrôle + masse qui entre
- Système fermé à  $t+dt$  : volume de contrôle + masse sortante
- Définition du débit massique :  $Dm=dm/dt$ , ce débit est conservé en régime permanent (voir questions)

##### 1.2 Premier principe pour un écoulement 1D en régime stationnaire

On considère un système de volume de contrôle  $V$ , où on se situe à l'entrée en  $z_1, u_1, P_1, v_1, s_1$ .  
On travaille avec les grandeurs massiques

- Au système fermé entre  $t$  et  $t+dt$ , on applique le premier principe de la thermodynamique
- Bilan d'énergie  $E(t)=E_{\text{volume\_de\_controle}} + \frac{1}{2} v^2 dm + dm g z + dm u$ ,  $E(t+dt)=$  (même chose avec des 2)
- Différentielle de  $E$  :  $dE = dm \Delta(v^2/2 + g z + u)$
- Travail des forces de pression :  $\delta W_1 = p_1 dV_1$  où  $dV_1 = dm/p_1$  de l'amont sur le fluide, et  $-p_2 dV_2$  de l'aval sur le fluide
- Travail utile (lorsque pièces mécaniques, hélice par ex)
- On regroupe tout et on définit l'enthalpie massique, puis premier principe : tout est en  $J.kg^{-1}$

### 1.3 Second principe de la thermodynamique pour un fluide en écoulement

- Second principe sous forme massique

## 2. Applications aux machines thermiques

### 2.1 Description du cycle de Rankine

Centrale électrique : l'eau va subir des transformations que l'on va étudier et cela permet de transformer l'énergie thermique en énergie électrique

- Générateur de vapeur : vaporisation isobare : augmentation de  $T$ , changement d'état
- Turbine : détente adiabatique réversible
- Condenseur : liquéfaction isobare, isotherme
- Pompe : transfert d'énergie mécanique : compression adiabatique

Tableau où on exprime la pression et la température, et énergie à chaque étape :

- $P_1 T_1 \rightarrow P_2 = P_1, T_2 > T_1, q_{ch} > 0$
- $P_2 T_2 \rightarrow P_3 < P_2, T_3, w_f < 0$
- $P_3 T_3 \rightarrow P_4 = P_3, T_3 = T_4, q_f < 0$
- $P_4 T_4 \rightarrow P_1 < P_4, T_1, w_p > 0$

### 2.1 Application des 2 principes

On peut appliquer sur chaque étape les premier et second principes. Hypothèse : on néglige les variations d'énergie cinétique et potentielle devant les variations d'enthalpie

Premier principe

- $q_{th} = h_2 - h_1$
- $h_3 - h_2 = w_f$
- $h_4 - h_3 = q_f$
- $h_1 - h_4 = w_p$

Second principe

- $s_1 - s_4 = 0$
- $s_3 - s_2 = 0$
- $s_2 - s_1 = q_{ch}/T_{ch} + s_{ch}$
- $s_4 - s_3 = q_f/T_f + s_f$

## 2.2 Diagramme des frigoristes et rendement

SLIDE : diagramme des frigoristes. Valeurs numériques :

$P_{haute} = P_2 = P_1 = 10^7 \text{ Pa}$

$P_{basse} = P_3 = P_4 = 2 \times 10^4 \text{ Pa}$

$T_2 = 340^\circ\text{C}$

On essaie de tracer le cycle.

- On part de  $T_2$ ,  $P_2$  que l'on connaît
- Ensuite on suit une isentropique jusqu'à la pression basse (transformation 2-3), mélange diphasé
- On suit une horizontale jusqu'à coexistence des phases (3-4)
- Adiabatique : vertical jusqu'à  $P_1$

Grâce à la lecture des données sur le diagramme, on peut en déduire le rendement.

Ce qui nous intéresse :  $W_f$ , et ce qui coûte :  $Q_{ch}$ .

Pour avoir  $W_f$ , il faut regarder entre 2 et 3, et on lit les enthalpies massiques :  $1000 \text{ kJ.kg}^{-1}$

Pour trouver  $Q_{ch}$ , on regarde la transformation entre 1 et 2 :  $2600 \text{ kJ.kg}^{-1}$

On a un rendement de 38%.

Premier et second principe très pratiques en utilisant ce genre de diagrammes. On présente une autre application

## 3. Application à l'écoulement dans une tuyère

### 3.1 Description du système de la tuyère de Laval

- Tube pour accélérer des gaz qui sont chauds : convertit de l'énergie sous forme thermique en énergie mécanique.
- Schéma : avec chambre à combustion, transformations des gaz adiabatiques
- En sortie on veut une grande vitesse

Hypothèses : Gaz parfait en écoulement 1D stationnaire, adiabatique, réversible

On veut calculer  $v_2$  ?

### 3.1 Applications des 2 principes

On considère toujours le système fermé constitué du volume de contrôle et ce qui entre (à  $t$ ), ce qui sort (à  $t+dt$ ).

On applique le premier principe à  $S$  entre  $t$  et  $t+dt$

On néglige la variation d'énergie potentielle

$H_2 - h_1 + v_2^2/2 - v_1^2/2 = 0$  (pas d'échange thermique, pas de travail échangé)

On exprime l'enthalpie grâce à ce qu'on connaît.

- $H = nR\gamma/(\gamma-1) \cdot (T_2 - T_1)$

On exprime l'enthalpie massique, et la différence entre les deux

- On a un gaz parfait qui subit une transformation adiabatique réversible → LAPLACE
- Calcul avec définition du coefficient de détente
- On néglige la vitesse  $v_1$  qui est très faible devant  $v_2$
- Expression de  $v_2$

ODG vitesse en sortie de la tuyère : gaz diatomique (vapeur d'eau),  $T_1$  grande (3500K), coefficient de détente de 0.2

On a  $v_2$  de l'ordre de 3000 m.s<sup>-1</sup>

## Conclusion

On peut aller plus loin avec la tuyère en calculant la force de poussée

**Fin à 37 min.**

## Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

(l'étudiant liste les questions posées, ainsi que les réponses données par l'enseignant. Si certaines réponses manquent, l'enseignant pourra compléter le document)

- **Niveau de cette leçon ?** deuxième année de CPGE PC. Les prérequis étaient corrects mais prêtez juste attention au fait que la version infinitésimale des principes est au programme de deuxième année, mais juste avant l'étude menée ici donc tout va bien !
- **Prérequis des principes ?** on a besoin de la forme différentielle.
- **Prérequis des machines thermiques ?** vu en première année, on a déjà parlé de cycles, diagrammes des frigoristes. Surtout on a vu des machines souvent idéales, ou avec des transformations non idéales mais de gaz parfaits. Ici on permet l'étude de machines dont les transformations ET les fluides sont réels.
- **Les rendements que l'on calculait avant (en première année) étaient faux ?** Ils n'étaient pas faux, mais c'était par exemple le rendement de Carnot, idéal encore une fois. De plus, on ne prenait pas en compte des machines avec écoulement.
- **Qu'est-ce que l'étude du diagramme des frigoristes apporte par rapport à ce qu'on ferait autrement ?** on peut le faire avec les températures, en calculant les enthalpies, avec les capacités thermiques. Répétons l'idée : ça permet l'étude de fluides réels.
- **Qui est le système ouvert ?** le volume de contrôle
- **Pourquoi on ne peut pas appliquer le premier principe à un système ouvert ?** on l'écrit pour des systèmes fermés. En fait si on connaissait exactement l'énergie apportée ou emportée par chaque particule qui entre/sort on pourrait écrire le principe au système ouvert mais ça n'est pas le cas !
- **Est-ce que c'est un principe général de ne pas pouvoir appliquer les principes en système ouvert ?** on fait un bilan de quantité de mouvement pour une fusée par exemple
- **Que signifie régime stationnaire ?** grandeurs indépendantes du temps (masse, température). En un point donné de l'écoulement, les grandeurs intensives sont constantes. Ici on prend un volume de contrôle constant, dont la masse volumique en tout point est constante, donc la masse est constante. On peut d'ailleurs appuyer sur la différence entre constante (au cours du temps) et conservée (entre différents points de l'écoulement).

- **Débit massique conservé pourquoi ?** on part du régime stationnaire, et la masse est constante au cours du temps, donc en écrivant la variation de la masse elle est forcément la même en entrée et en sortie.
- **Travail des forces de pression sur la masse entrante à gauche ou à droite ?** ce sont les forces extérieures qui apparaissent dans le premier principe, donc celle qui s'exerce à droite est interne au système et n'apparaît pas.
- **Quelle est la différence entre  $d$ ,  $\delta$  et  $\Delta$  ?**  $d$  est réservé aux fonctions d'état, et on ne peut pas parler de travail initial et final, on parle de travail lors d'une transformation.  
*Cette distinction entre  $d$ ,  $\delta$  et  $\Delta$  doit être absolument maîtrisée.*
- **Qu'est-ce que peut être le travail utile ?** quand on a une pièce mobile, travail mécanique par exemple
- **Qu'est-ce que pourrait être  $\delta Q$  ?** transfert thermique entre une source chaude une source froide ? *Ça aurait pu être intéressant, lors de la démonstration des principes, d'explicitier l'origine habituelle de ces termes (travail mécanique d'une turbine, chauffage par effet joule, ...) encore une fois pour rendre le 1 un peu plus concret.*
- **Qu'est-ce que  $T_s$  dans le second principe ?** température de surface par laquelle se fait le transfert thermique.
- **Comment on écrirait ce terme sous forme plus générale ?** on peut faire une somme/intégrale sur toutes les sources. *Autant écrire l'entropie échangée  $S_e$ , et préciser que si on a contact avec un thermostat, on peut alors écrire  $S_e = Q/T_{ext}$ .*
- **Est-ce que y'a d'autres formes du 1<sup>er</sup> et 2<sup>nd</sup> principe ?** sous forme de puissance par exemple. *Oui, et ça aurait été intéressant d'en parler, surtout dans la mesure où il restait du temps à la fin.*
- **Est-ce que le  $\Delta$  qui définit la fin – le début marche ici ?** cela dépend
- **A quoi sert la machine de Rankine ?** à transformer de l'énergie thermique en énergie mécanique, c'est un moteur. On lui fournit de l'énergie thermique et il en sort de l'énergie mécanique
- **Les autres éléments de la machine consomment quoi ?** on fournit du travail à la pompe également
- **Quel est l'intérêt si on fournit du travail et on sort du travail ?** on n'a pas la même forme de travail. *Et pas la même valeur (le travail obtenu est bien plus grand que celui consommé).*
- **Qu'est-ce qu'on obtient si on somme tout ?** on obtient 0, car on a cycle et on a une fonction d'état (dont la variation ne dépend pas du chemin suivi mais on revient au même point)  
*Il faut être très solide sur le raisonnement : fonction d'état (ne dépend que des variables d'état) -> variables d'état identiques après un cycle (par définition d'un cycle) -> fonction d'état inchangée.*
- **Quelles sont les hypothèses de chaque étape et sont-elles raisonnables ?** première : vaporisation isobare, on a un changement d'état donc à  $P$  fixé c'est logique, et deuxième : adiabatique. Il faut que le passage dans la turbine soit suffisamment rapide pour que les transferts thermiques n'aient pas eu le temps de se faire
- **On applique le principe à qui ?** au fluide qui traverse le système, qui est le fluide caloporteur. On applique à chaque sous-système
- **Quel est le fluide ?** eau *(le diagramme  $\ln(p)$ ,  $h$  était celui du fluide R718 ... Qui est bien l'eau !)*
- **Comment on choisit le fluide ?** il faut qu'il transporte bien la chaleur, il faut que le changement d'état ne s'effectue pas à trop hautes et basses pressions
- **Pourquoi on met du changement d'état ?** permet un bon transport de chaleur, on compare les enthalpies de vaporisation avec les transferts thermiques d'une source froide à chaud
- **Aurait-on pu avoir 1 ?** non.

- **Quel est le rendement maximal ?** le rendement de Carnot  $1-T_f/T_c$ . Cela aurait pu être intéressant de comparer la valeur obtenue au rendement de Carnot.
- **Pourquoi il n'y a pas de lignes  $W$  et  $Q$  ?** ce ne sont pas des fonctions d'état
- **Est-ce qu'il y a de l'entropie créée ?** dans le condenseur et le générateur de vapeur
- **Comment s'appelle ce genre de cycle ?** cycle endoréversible, cycle réel qui se rapproche le plus de Carnot en limitant les sources d'irréversibilité aux seuls contacts thermiques avec les sources de chaleur.
- **Qu'est-ce que  $\gamma$  ?** Coefficient de Laplace,  $\gamma = C_p/C_v$
- **Est-ce qu'adiabatique réversible est le seul cas où on peut appliquer la loi de Laplace ?**  
L'hypothèse « isentropique » suffit (adiabatique réversible est un cas particulier, mais celui qu'on rencontre le plus souvent).
- **Pourquoi facteur de compression égal à 0.2 ? qu'est ce qui limite ce rapport ?** cela dépend de la géométrie de la tuyère
- **Est-ce que la tuyère est convergente ou divergente ? à quel endroit cela doit passer de convergent à divergent ?** Dans le cas étudié on cherche la vitesse la plus grande possible en sortie. Une fois qu'on a atteint la vitesse du son par une tuyère convergente, on prend une tuyère divergente (à cause de la compressibilité de l'air)  
On peut regarder par exemple [https://fr.wikipedia.org/wiki/Tuyère\\_de\\_Laval](https://fr.wikipedia.org/wiki/Tuyère_de_Laval), c'est la partie sur la relation d'Hugoniot qui relie section de la tuyère et vitesse d'écoulement. C'est un exercice relativement classique de CPGE.
- **Le facteur  $\gamma$  pour le gaz parfait ?** monoatomique et diatomique, différent, cette valeur vient du théorème de l'équipartition de l'énergie, c'est dû au nombre de degré de liberté
- **Si on devait écrire ce principe à un régime non permanent, qu'est ce qui changerait ?** plus le même débit massique.
- **Si jamais on avait 2 entrées et 3 sorties, que faudrait-il changer ?** On aura des sommes avec les débits massiques.  
Avec plusieurs entrées/sorties, on est obligé d'écrire le principe avec des puissances car on n'a plus une masse élémentaire  $dm$  unique par laquelle on peut diviser tous les termes.

## Commentaires lors de la correction de la leçon

(l'étudiant note les commentaires relatifs au contenu de la leçon : niveau, sujets abordés, enchaînement, réponses aux questions, etc. L'enseignant relit, et rectifie si besoin)

C'était une bonne leçon. Le plan est tout à fait pertinent. Une autre manière de faire pourrait être de distiller des exemples dans le 1, juste après les énoncés de chaque principe et se réserver une grosse application pour le 2 (la machine thermique convient tout à fait).

On ne voit pas trop comment occuper 40min dans cette leçon sans parler des machines thermiques et des diagrammes des frigoristes etc. à moins d'enchaîner des petits exemples qui donneront à la leçon un effet catalogue assez pénible.

La tuyère est aussi un bon exemple.

Il faut être très rigoureux, toujours, mais particulièrement sur la thermodynamique (attention notamment à ne pas confondre entropie et enthalpie au tableau ...). Il ne faut pas dire que c'est le

premier principe pour un système ouvert (donc les titres et le discours étaient bien choisis pour cela).

Il faut redire tout le temps le système sur lequel on applique les principes et faire bien la différence entre les fonctions d'état et les autres grandeurs thermodynamiques.

Avec l'étude des machines thermiques en première année, on a des gaz parfaits, sur lesquels on connaît les transformations, mais là on met des fluides réels qui bougent et changent d'état. Avant, tout est parfait et là on se penche plus sur des machines réelles.

À partir du moment où on a un écoulement, on a l'enthalpie qui est plus adaptée à l'étude des systèmes, c'est un message important de la leçon.

Dans la première partie, on peut parler de débit (notamment démontrer pourquoi il est conservé en régime permanent), et on peut parler du principe en terme de puissances et introduction meilleure du système ouvert : on aurait pu introduire la tuyère au départ pour mettre un peu de concret dans le début de la leçon. C'est important de motiver l'étude des systèmes en écoulement.

On peut discuter de l'irréversibilité par exemple à la fin, en disant que le rendement peut changer si on prend une autre isenthalpique. On peut discuter de la détente de Joule-Thomson, échangeur thermique...

### Partie réservée au correcteur

#### Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.) :

Comme noté en correction, c'était une bonne leçon. Il faut la mener avec un peu plus de confiance et de certitude pour que le message passe mieux mais, déjà, le message est le bon !

Le plan ne laisse pas trop de place à l'originalité mais ce n'est pas un problème car un plan très classique, très bien réalisé, pourra tout à fait mener à une très bonne note.

Au-delà du titre en lui-même, c'est une leçon de thermodynamique et il faut donc faire très attention à ce qu'on fait, aux hypothèses dont on a besoin pour affirmer tel ou tel résultat. Le passage de l'énergie interne à l'enthalpie dans ce genre de système peut être notamment mieux mis en exergue face à des élèves de prépa.

#### Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates :

La notion principale ici est la démonstration, l'énoncé et l'utilisation **des deux** principes de la thermodynamique en écoulement.

La notion de régime stationnaire est ici piègeuse, il faut y faire attention.

Les concepts secondaires (mais à aborder absolument) sont les applications : machines thermiques, tuyère, compresseur, turbine, etc.

**Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur) :**

Non concerné.

**Bibliographie conseillée :**

La bibliographie utilisée par Izïa est complète et pertinente.