

Fiche 28

Phénomènes de transport (systèmes ouverts)

Ressources utilisées

- Th.G, 16 juin 2019, <http://thibault.giauffret.free.fr>
- Référence prépas vert/bleu, PC/PC*, OLIVIER p. 463
- Compétences Prépas, BCPST2, BAUDE et GRÉCIAS
- Physique expérimentale, FRUCHART
- Thermodynamique des systèmes ouverts : PÉREZ, Chapitre 13, p. 233 ; **Regarder le chapitre 4 !**
- Thermodynamique des systèmes ouverts : SANZ, PC/PC*, Chapitre 1.

Pré-requis

- Conduction électrique, thermique
- Diffusion de matière
- Thermodynamique : énergie interne, enthalpie, grandeurs extensives...
- Thermodynamique : premier principe en système fermé

Éléments imposés possibles

Fait précédemment

I Transport de masse par convection (Description d'un système ouvert, Bilan de masse pour un système ouvert)
II Transport d'énergie pour un système ouvert (Bilan énergétique pour un système ouvert, Application au mélangeur du robinet).

D'après CR de 2018, éviter I Description des phénomènes de transport, II Transport de charge par conduction électrique (essayer de rester loin de la conduction électrique ?)

Introduction pédagogique

Niveau Généralement L2. Par exemple, BCPST2 le programme s'étend du transport de matière et d'énergie par conduction (diffusion de matière, conduction électrique, conduction thermique) au transport de matière et d'énergie par convection (débits, bilan de masse, bilan d'énergie, toujours en régime permanent, machines thermiques).

Autre exemple, PC, bilans dynamiques...

Difficultés Naturellement, les difficultés porteront principalement sur la définition des systèmes étudiés, pour lesquelles il s'agira d'insister puisque c'est la première introduction des systèmes ouverts que l'on fera aux élèves. Pour que la notion de système ouvert soit comprise le plus aisément, elle sera ramenée à la notion

de système fermé, connu et étudié juste avant par les élèves. Une autre difficulté tiendra dans la capacité à séparer les différents modes de transport (diffusion, convection...); pour palier à cela, le mode de transport sera toujours rappelé et éventuellement comparé à d'autres.

Travaux dirigés Études de plusieurs machines thermiques pour mettre en application, sur chacune des parties, le premier principe de la thermodynamique en écoulement.

Travaux pratiques ... Mesures de débits massiques ? Modélisation d'un robinet mélangeur ?

Introduction

Dans le cours précédent, nous avons traité des phénomènes de diffusion : par exemple la diffusion de matière, ou la conduction thermique. Nous avons noté alors que ces phénomènes n'impliquaient pas de transport microscopique de matière.

Expérience Tube cyclique avec colorant à un coin, chauffer en dessous de la zone colorée et observer un déplacement de matière, bien plus rapide que ce qu'était la diffusion.

Mais vous le savez bien, la conduction thermique n'est pas seule responsable de l'homogénéisation en température d'un fluide, par exemple : certains phénomènes de transport font intervenir des déplacements macroscopique de matière qui joue donc sur le transfert de matière et d'énergie dans un système, ouvert ou fermé. Un **système ouvert**, contrairement à un système fermé, est un système pouvant échanger de l'énergie ou de la masse avec le système extérieur.

Aujourd'hui, nous nous intéressons particulièrement au phénomène de transport macroscopique de matière et ses conséquences, dans un système dit ouvert.

Objectifs Comprendre les phénomènes de transport de masse dans un système ouvert et les conséquences sur le transport d'énergie.

28.1 Transport de masse par convection

Intéressons-nous tout d'abord à un système modèle : un tuyau, dans lequel s'écoule un fluide, en régime permanent. [Schéma tuyau cylindrique de section S , orienté selon d'axe des x] Comment caractériser le transport de masse dans ce tuyau ?

Première question à se poser : comment définir un système dans lequel appliquer ce qu'on sait ?

28.1.1 Description du système ouvert

Le fluide est en écoulement, et on suppose qu'il n'y a pas de création de masse dans la conduite. On doit définir un système **ouvert**, c'est à dire pour lequel la matière peut entrer et sortir. La façon la plus simple de définir ce système aujourd'hui, c'est de considérer un système fermé, que l'on va suivre en fonction du temps.

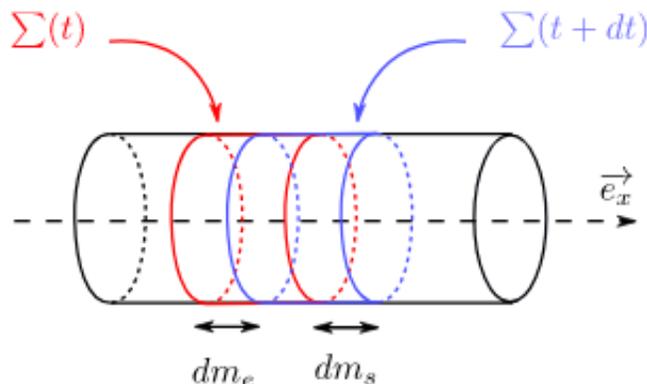


FIGURE 28.1 – Définition des systèmes, à dessiner étapes par étapes !

On définit donc le système $\Sigma(t)$ que l'on suit dans le temps, pendant une durée dt et que l'on retrouve comme $\Sigma(t + dt)$. L'intersection entre ces deux systèmes (en réalité le même, pris à deux instants différents !) amène à ce qu'on appelle un système ouvert SO , pour lequel une masse dm_e rentrerait alors qu'une masse dm_s en sortirait. Cela s'imagine plus facilement en réécrivant la masse du système fermé à différents temps :

$$m_{\Sigma}(t) = dm_e + m_{SO}(t) \quad (28.1)$$

$$m_{\Sigma}(t + dt) = dm_s + m_{SO}(t + dt) \quad (28.2)$$

28.1.2 Bilan de masse dans un système ouvert

Pour un système fermé, comme Σ , la conservation de la masse fait que la masse du système est indépendante du temps. Cela permet d'écrire, en soustrayant les équations précédemment établies :

$$0 = dm_s - dm_e + \frac{dm_{SO}}{dt} dt, \quad (28.3)$$

où le dernier terme est aussi nul, puisqu'on suppose être en régime permanent, donc sans que les grandeurs physiques ne dépendent du temps. On remarque alors en divisant par dt qu'on a conservation du débit massique au passage dans le tuyau. Cela peut paraître anodin, puisque notre exemple est simpliste, mais on peut le complexifier de plusieurs façons :

Exemple

- pour des sections d'entrées et de sorties différentes, [redéfinir les grandeurs d'entrée et de sortie (vitesses, sections...); exprimer le fait que la vitesse va varier !];
- pour une entrée et plusieurs sorties – on arrive à une analogie à l'électronique et la loi des nœuds (mise en évidence du transport de charge).

Ce transport de matière macroscopique a comme conséquence un transport d'énergie macroscopique : si les particules fluides se déplacent, elles se déplacent avec leur énergie interne...

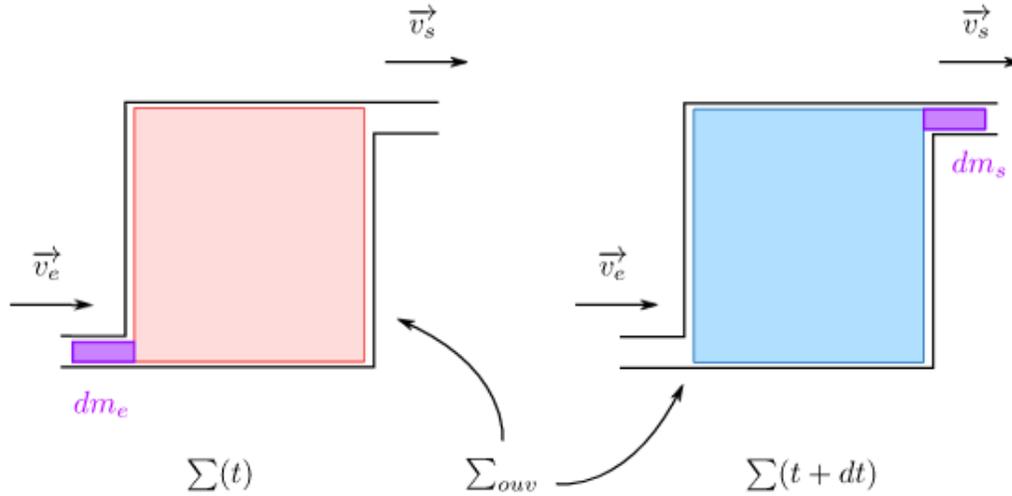
28.2 Transport d'énergie par convection

28.2.1 Bilan énergétique dans un système ouvert

Redémonstration, premier principe sur un système fermé qui se déplace, approche thermodynamique du théorème de BERNOULLI (décrit dans le rapport de leçon de T. GIAUFFRET)

On se donne un réservoir contenant une hélice qui produit un travail W' ou $\delta W'$; on définit les paramètres du réservoir : z_e et z_s les altitudes d'entrées et de sortie, v_e et v_s les vitesses d'entrée et de sortie...

Comme précédemment, ce qu'on sait faire : ce sont les systèmes fermés... alors comment appliquer le premier principe de la thermodynamique à un système ouvert ?



De la même façon que précédemment, on peut donc définir un système fermé Σ que l'on suit dans le temps (date t et $t + dt$) ; l'intersection de ces deux systèmes est toujours le système ouvert qui nous intéresse.

On peut alors écrire que la variation d'énergie du système fermé se décompose comme :

$$dE_{\Sigma} = dE_{SO} + E_{\text{entrant}} - E_{\text{sortant}}. \quad (28.4)$$

On fait l'hypothèse d'un régime permanent :

— en supposant de plus des sections égales

$$dm_e = dm_s = dm \quad (28.5)$$

— pour le système ouvert

$$dE_{SO} = 0 \quad (28.6)$$

et en appliquant le premier principe de la thermodynamique au système fermé Σ :

$$dm(e_s - e_e) = \delta W' + \delta W_p + \delta Q, \quad (28.7)$$

ou encore

$$(e_s - e_e) = \delta w' + \delta w_p + \delta q. \quad (28.8)$$

En développant $e = u + \frac{1}{2}v^2 + gz$ et $\delta w_p = -pdV$ et en notant que $H = U + pV$, on trouve finalement :

$$\Delta_{e \rightarrow s} \left(h + \frac{1}{2}v^2 + gz \right) = \delta w' + \delta q. \quad (28.9)$$

On réalise donc un transfert d'énergie (enthalpie, énergie cinétique et énergie potentielle) au travers d'un système ouvert, par convection, avec influence du travail fourni par l'appareil ou des transferts thermiques qui sont associés aux parois du système.

28.2.2 Application au robinet mélangeur

Calcul de la température de sortie en fonction des débits d'entrée eau chaude et eau froide.

Expérience Manipulation p.423 FRUCHART, Physique expérimentale.

Remarque Regarder dans le BAUDE et GRÉCIAS, BCPST2, Compétences Prépa, p. 221.

28.2.3 Application à / au...

1. Robinet mélangeur (thermodynamique) [possibilité de manipulation, *cf.* FRUCHART p.423]
2. Machines thermiques... (traitées dans le PÉREZ, mais sans notion de système ouvert, Chapitre 10.)
3. Bilan de quantité de mouvement, force subie par une canalisation, OLIVIER, p.467.
4. Bilan de moment cinétique, tourniquet hydraulique (L2 PCSI), OLIVIER, p. 470.

Remarque Si bilan d'énergie et bilan d'entropie traité, on peut évoquer la notion d'exergie (Partie dédiée dans le PÉREZ, p.240 (niveau L2+++))
Introduite Chapitre 12.

Conclusion