

TRANSFERTS THERMIQUES ET MASSIQUES  
DANS LES FLUIDES.

COURS MF204 2011-2012

Lagrée Pierre-Yves  
CNRS/ Univ. Pierre & Marie Curie, IJLRA, [pyl@ccr.jussieu.fr](mailto:pyl@ccr.jussieu.fr)

13 novembre 2011



## Présentation

Ce cours s'inscrit dans la continuité du cours de mécanique des fluides de première année : "fluides incompressibles" et il est en liaison avec celui de deuxième année de "turbulence". Des notions de Mathématiques Appliquées et de Mécanique des Milieux Continus (dispensées en première et deuxième année) sont aussi grandement utilisées. Ce cours de "Thermique" est principalement orienté vers les transferts de chaleur dans les fluides (équations de Navier Stokes) en laminaire et en turbulent (le rayonnement n'est quasiment pas abordé car mettant en jeu des mécanismes différents).

Pour pouvoir apprécier les subtilités des simplifications des équations de transfert de la mécanique des fluides, on suppose connues les hypothèses et les équations de la mécanique des milieux continus. Lors du premier cours on rappelle rapidement les équations fondamentales et le principe de la construction des lois de comportement. Ensuite, le point de vue de "l'analyse phénoménologique" sera adopté pour simplifier ces équations. Il s'agit d'une méthode qui permet de simplifier les équations de la mécanique des fluides (mais en fait de tout autre domaine) en mettant l'accent sur les ordres de grandeurs dominants. On fait alors apparaître des nombres sans dimension dans les équations de la "Mécanique", ce qui permet de simplifier la résolution en faisant disparaître des termes en justifiant les approximations et en réduisant les équations aux dérivées partielles à leurs termes principaux. On donne ainsi un sens physique aux équations en retenant les termes qui ont effectivement de l'importance. La méthode systématique utilisée pour résoudre ces équations simplifiées dépendant de petits paramètres est la théorie des développements asymptotiques raccordés (*matched asymptotic expansion*). Un rappel sous forme simplifiée est présenté en exercice de révision.

D'une certaine manière ce cours est donc consacré à la simplification des équations de la thermohydrodynamique, on le fait en se guidant avec les nombres sans dimension. On discute ainsi les approximations classiques de cette discipline.

- On commence par rappeler les équations générales de la mécanique (lois de conservation) et on présente très rapidement comment les équations constitutives sont obtenues à partir de la thermodynamique des processus irréversibles (Chap. 1). Ce chapitre ne présente aucune simplification des équations mais au contraire leur complexité.
- L'équation de la chaleur (cas de la diffusion dans un solide) est ensuite résolue dans des cas simples de manière à fixer les idées et à mettre en évidence le problème de l'écriture des conditions aux limites : c'est ainsi que le facteur d'échange est introduit. Cette simplification drastique sert à simplifier notre ignorance des échanges extérieurs (Chap 2). La PC1 rappelle des solutions classiques de l'équation de la chaleur.
- L'équation de la chaleur dans un fluide en mouvement est ensuite présentée, l'exemple de l'effet d'entrée dans un tube chauffé est examiné. Il permet de visualiser la compétition entre la diffusion et la convection, menant à l'apparition des couches limites thermiques. La PC2 examine ce problème de manière plus simplifiée et présente des liens avec la PC1. La PC3 présente un cas de couplage

thermique fluide/solide.

- Après avoir étudié la convection forcée (échange de chaleur grâce à un écoulement initial), la convection libre est abordée. Dans ce cas, l'écoulement est créé par l'échauffement du fluide. La PC4 montre la mise en mouvement d'un fluide dilatable sous l'action d'un réchauffement.
- La couche limite turbulente est ensuite présentée. La PC 5 est dévolue à l'écoulement et au transfert turbulent dans un tuyau.
- Le dernier point abordé est la convection massique, la PC 6 porte sur un cas d'avalanche sousmarine en utilisant une méthode simplifiée de calcul (méthode intégrale) .

En résumé, si tout le monde connaît déjà depuis fort longtemps l'équation de la chaleur (sans dimension) :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2},$$

le but de ce cours est de l'établir dans toute sa complexité en rajoutant tous les termes oubliés ou négligés par les présentations des cursus précédents simplifiés et de mettre en évidence le rôle important des conditions aux limites.



## Plan

### Cours

- 1. Généralités, équations de la thermomécanique des fluides.
- 2. Le coefficient d'échange, son importance dans les transferts thermiques.
- 3. La convection forcée.
- 4. La convection libre.
- 5. Introduction à la couche limite turbulente.
- 6. (La méthode intégrale.)
- 7. Transferts de masse.

### Exercices et Pales de révision sur le Web

- Un exemple simple de développement asymptotique raccordé.
- La couche limite hypersonique.
- Le jet turbulent.
- Le panache turbulent.
- Le réacteur MOCVD.
- De Poiseuille au panache via le jet.
- La convection thermique mixte.
- Le refroidissement d'un pôt d'échappement.
- Échanges thermiques dans une centrale nucléaire.
- Consulter les PC de couche limite du cours MF101.
- Consulter les ouvrages de thermique et de mécanique des fluides de la bibliothèque.
- les fichiers de ce cours sont consultables sur  
[http ://www.ida.upmc.fr/~lagree/COURS/ENSTA/coursENSTA.html](http://www.ida.upmc.fr/~lagree/COURS/ENSTA/coursENSTA.html)  
 n'hésitez pas à cliquer sur les liens dans ces pages.
- La page officielle est  
[https ://3w2.ensta.fr/%7Edfr/Cours/index.php?sigle=MF204](https://3w2.ensta.fr/%7Edfr/Cours/index.php?sigle=MF204)

### Pales de révision

- Echauffement d'eau interstitielle par du magma.
- Etude de la convection libre verticale dans une cavité.
- Etude de la convection mixte entre deux vitrages.
- Convection libre dans une cavité carrée.
- Convection mixte dans une cavité élancée
- Convection forcée instationnaire.
- Convection forcée dans le procédé de fabrication du verre fondu.
- Ecoulement catabatique (vent le long des montagnes).
- Convection mixte avec Magnétohydrodynamique.

Exemples de mots clefs Google :

convection forcée, solution de Lévêque thermique, solution de Graetz, convection libre, couche limite thermique, transferts thermiques fluides, transferts de masse,....