

PROLOGUE

*La fureur de la plupart de ceux
qui veulent avoir de l'esprit, c'est
de faire des livres.*

MONTESQUIEU

Avant d'entrer de plain-pied dans le sujet, faisons d'abord rapidement connaissance avec la convection thermique.

Il en va de la convection comme de beaucoup d'autres phénomènes physiques : ses manifestations nous environnent en permanence sans que nous leur prêtions vraiment attention. Mais précisément, où et comment peut-on les percevoir, et sur quoi doit se fixer notre attention ?

Lorsqu'un fluide isotherme est en écoulement, il met en jeu des forces de pression et de frottement qui peuvent se traduire – partiellement - de manière visuelle ou sensitive.

Si l'écoulement est anisotherme, le mouvement s'accompagne d'un transfert de chaleur : il s'agit alors de "convection thermique" ou "thermoconvection". Malheureusement, les champs de température sont encore moins perceptibles à l'expérience quotidienne que les champs de vitesse, ce qui rend le phénomène un peu plus abstrait, voire un peu plus mystérieux.

Pourtant, la diversité des situations thermoconvectives est beaucoup plus grande qu'en mécanique des fluides isothermes. En effet, aux catégories d'écoulements classiques (interne, externe, laminaire, turbulent...) on doit superposer une différenciation qui porte sur les causes de l'écoulement et qui se répercute dans sa structure :

* si le mouvement du fluide a une origine mécanique (pompe, ventilateur, gradient naturel de pression...) on est en présence de "*convection forcée*".

* il peut advenir aussi que les gradients de masse volumique générés dans le fluide par les gradients de température soient suffisants pour que l'action du champ de pesanteur donne naissance à un mouvement ; celui-ci a donc une origine thermique, et on parle alors de "*convection libre*" ou "*convection naturelle*".

* lorsque les causes mécaniques et thermiques coexistent, on est en régime de "*convection mixte*".

Et de surcroît, la convection peut s'accompagner d'un changement de phase, qu'il s'agisse d'évaporation, d'ébullition, de condensation, ou encore de solidification ou de liquéfaction.

Les illustrations de ces phénomènes sont omniprésentes.

Ainsi, dans une salle équipée d'un radiateur à eau : l'air échauffé par le radiateur s'élève, puisque sa masse volumique devient plus faible que celle de l'air environnant ; à proximité d'un mur ou d'une vitre froide, il redescend; le tout se passe en "*convection libre externe*". Dans le radiateur, où la circulation de l'eau est forcée mais lente, il s'établit un régime de "*convection mixte interne*". En allumant un brûleur à gaz de cuisine, on a dans la flamme et autour d'elle un régime de "*convection mixte externe*", du fait que le gaz sort avec une certaine vitesse initiale.

Les échangeurs, où l'écoulement des fluides est presque toujours imposé, sont le siège d'une "*convection forcée interne*"; dans les évaporateurs et condenseurs de machines frigorifiques, elle se produit "*avec changement de phase*". Pour observer de la "*convection forcée externe avec évaporation*", il suffit de mettre ses mains mouillées sous un sèche-mains à jet d'air.

Citons encore les nuages, qui nous offrent des exemples de "*convection libre (ou mixte) externe avec changement de phase*" lorsque se forment le brouillard, la pluie, la grêle ou la neige.

Dans toutes les situations que nous venons d'évoquer, la chaleur est transmise simultanément par la diffusion moléculaire et par les mouvements du fluide, ce dernier mode de transfert étant appelé "*advection*". La convection thermique résulte de leur conjonction ; elle est donc inséparable de l'écoulement du fluide : soit la distribution des températures est sous la dépendance directe de celle des vitesses, soit il y a dépendance mutuelle.

A quoi on peut ajouter que la conduction pure ne s'observe guère dans les fluides, car il est rare qu'un gradient de température n'entraîne pas un mouvement. A l'inverse, dans certains cas, le transfert thermoconvectif peut provenir non pas d'un écart initial de température entre surface et fluide, mais de la dissipation de l'énergie mécanique en chaleur (échauffement visqueux ou échauffement cinétique).

Au point de vue pratique, le plus important en thermoconvection est le calcul des flux de chaleur qui transitent entre les fluides et les parois solides. A cet égard, l'existence de la couche limite dynamique, et en particulier la condition de vitesse nulle à la paroi (pour une surface imperméable) font que au voisinage de celle-ci c'est la conduction qui est dominante, l'advection prenant

progressivement le relais quand on s'en écarte. De telle sorte que la densité de flux de chaleur à la surface se calcule à partir de la loi de Fourier :

$$\varphi_p = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (\text{en } W / m^2) \quad (0.1)$$

où λ désigne la conductivité thermique du fluide, et y la coordonnée perpendiculaire à la paroi, orientée vers le fluide.

Selon les conditions aux limites, le résultat peut être multiforme. Par commodité, et pour faire apparaître explicitement deux températures significatives du transfert (T_p à la paroi et T_∞ dans le fluide) on a pris depuis longtemps l'habitude d'écrire :

$$\varphi_p = h(T_p - T_\infty) \text{ ou } h(T_\infty - T_p) \quad (\text{avec } h > 0) \quad (0.2)$$

On introduit ainsi un paramètre auxiliaire h , homogène à une conductance thermique, qui est appelé au choix "*coefficient de convection*" ou "*coefficient d'échange*" ou "*conductance de film*" (en $W / m^2 \cdot K$). Corrélativement, on considère donc que le transfert de chaleur entre le fluide et la paroi s'opère à travers un film de résistance thermique $1/h$. Ce "*modèle conductif*" de la convection est surtout intéressant dans les cas où l'on peut additionner des résistances thermiques, c'est-à-dire essentiellement lorsque le transfert a lieu d'un fluide à un autre à travers une paroi.

Les calculs de thermoconvection ont donc pour objet principal de fournir des expressions de h (ou directement de φ_p) en fonction des principaux paramètres dynamiques et thermiques de l'écoulement (vitesse, température, géométrie, nature du fluide...). Le raisonnement conduira ensuite éventuellement jusqu'à T_p si cette grandeur est inconnue. Mais il arrive aussi que le détail du champ de température soit le but essentiel de l'étude.

Le nombre élevé de paramètres mis en jeu constitue bien sûr une source de difficultés. Ceci explique en partie l'utilisation presque systématique de groupements adimensionnés, qui permet de réduire le nombre de variables significatives. Mais il ne faudrait pas en déduire que la thermoconvection est une discipline inabordable. Dans ce qui suit, on s'efforcera de prouver le contraire et de viser deux objectifs : compréhension des mécanismes physiques, et présentation didactique des méthodes de calcul.