

## Chapitre 0

# PROPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES DES FLUIDES DE TRAVAIL

*Il vaut mieux acheter un thermomètre en été qu'en hiver. Il coûte le même prix mais il contient davantage de mercure.*

Francis BLANCHE

Préalablement à toute étude des mécanismes et des lois de transferts en thermoconvection, il faut déjà avoir quelques idées sur les vecteurs sans lesquels cette catégorie d'échanges convectifs n'existerait pas, à savoir les fluides. Ceux qui interviennent le plus souvent sont communément baptisés "*fluides de travail*" ou "*fluides caloporteurs*".

## 0.1. - LES PRINCIPAUX FLUIDES DE TRAVAIL

Passons d'abord brièvement en revue les principaux fluides caloporteurs, liquides ou gaz.

Parmi les liquides, le plus employé est évidemment l'eau, éventuellement mélangée à des additifs. Viennent ensuite les fluides frigorigènes, utilisés dans les installations frigorifiques et les pompes à chaleur, puis les huiles de lubrification et les produits pétroliers.

Chez les gaz, c'est un truisme de dire que l'air vient en premier. Suivent le  $CO_2$  (dans les produits de combustion), le méthane  $CH_4$  (dans le gaz naturel), la vapeur d'eau (humide ou sèche) et les fluides frigorigènes (sous leur forme vapeur).

Bien entendu, quantité d'autres fluides sont amenés à jouer un rôle de caloporteur :  $H_2$  et  $O_2$  liquides, hélium, métaux liquides, liquides organiques, fluides complexes utilisés en génie industriel et alimentaire.

## 0.2. - LES CARACTÉRISTIQUES THERMOPHYSIQUES DES FLUIDES

Dans les équations de bilans relatives aux fluides en écoulement, figurent un certain nombre de propriétés spécifiques appelées "*caractéristiques thermophysiques*". Ce sont la masse volumique, la viscosité dynamique, la chaleur massique, la conductance thermique, la dilatabilité et la chaleur latente de changement d'état.

Plusieurs de ces grandeurs subissent de façon notable l'influence de la température. On dit qu'elles sont "*thermodépendantes*". Dans quelques cas, elles sont également fonction de la pression : cela se produit en particulier pour les fluides à l'état de vapeur saturante. Mais *en général, la pression est sans influence sensible*, sauf bien entendu sur la masse volumique des gaz.

La connaissance des ordres de grandeur est toujours précieuse, car elle permet de dégrossir rapidement certains problèmes. A ce propos, il n'est pas superflu de rappeler que dans la plupart des calculs de génie industriel, une marge d'incertitude de 5 à 10 % n'est pas ridicule (elle est même souvent plus élevée). Dans ces conditions, le fait d'utiliser les valeurs numériques avec une kyrielle de chiffres faussement significatifs reflète parfois un manque de sens critique vis-à-vis des réalités expérimentales.

## 0.3. - LA MASSE VOLUMIQUE

La masse volumique des gaz courants est de 1 à 2  $kg / m^3$  à la température ambiante et à la pression de 1 bar. A pression constante, elle est relativement sensible à  $T$  : ainsi, pour l'air elle vaut 1,3  $kg / m^3$  à  $0^\circ C$  et 0,94  $kg / m^3$  à  $100^\circ C$ , soit une baisse de plus de 30%. On sait par ailleurs qu'elle est sensiblement proportionnelle à la pression.

Pour la majorité des *liquides*, la masse volumique tourne autour de  $10^3 kg / m^3$ . Elle est à peu près insensible à la pression, et n'est pas très influencée par la température (dans le cas de l'eau, entre 0 et  $100^\circ C$ , elle ne diminue que de 4%). L'hypothèse "*fluide isochore*" ( $\rho = cte$ ) ne pose ici aucun problème.

## 0.4. - LA VISCOSITÉ

Lorsqu'on s'intéresse à la viscosité, on aperçoit une profonde coupure entre les gaz et les liquides.

En gros, avec les gaz, la viscosité dynamique  $\mu$  est de l'ordre de  $1.10^{-5}$  à  $2.10^{-5} Pa.s$ , et elle augmente avec la température. Par exemple, entre  $0$  et  $100^\circ C$ , la viscosité de l'air passe de  $1,72.10^{-5}$  à  $2,18.10^{-5} Pa.s$  ( $\approx +30\%$ ).

Il est beaucoup plus difficile de citer un ordre de grandeur de  $\mu$  pour les liquides, d'abord en raison d'une grande diversité, et aussi parce que la viscosité s'effondre lorsque  $T$  s'élève. Prenons le cas de l'eau : de  $0^\circ C$  ( $\mu=1,78.10^{-3} Pa.s$ ) à  $100^\circ C$  ( $\mu=0,28.10^{-3} Pa.s$ ), elle est divisée par 6. Avec les huiles de lubrification, c'est sur une division par 100 qu'il faut tabler.

La viscosité cinématique  $\nu=\mu/\rho$  présente des propriétés analogues. Sa thermodépendance est simplement renforcée par rapport à  $\mu$  dans le cas des gaz.

## 0.5. - LA CHALEUR MASSIQUE

Il y a peu de choses à dire de la chaleur massique, si ce n'est qu'il est tout-à-fait légitime de la considérer comme indépendante de la température.

Pour la quasi-totalité des fluides (gaz ou liquides), elle se situe dans la fourchette  $800 - 4200 J / kg.K$ .

## 0.6. - LA CONDUCTIVITÉ THERMIQUE ET LA DIFFUSIVITÉ

Les fluides, et singulièrement les gaz, sont de moins bons conducteurs thermiques que la majorité des solides (l'hydrogène constituant un cas à part).

La conductivité thermique des gaz est de l'ordre de  $0,02$  à  $0,04 W / m.K$ , et elle croît avec  $T$  ( $+25\%$  pour l'air entre  $0$  et  $100^\circ C$ ) à peu près de la même façon que la viscosité dynamique.

Pour les liquides, on peut multiplier cet ordre de grandeur par 10 puisque  $\lambda$  est généralement comprise entre  $0,1$  et  $0,7 W / m.K$ . Elle varie également dans le même sens que la température (de  $0,55$  à  $0,68 W / m.K$  avec l'eau entre  $0$  et  $100^\circ C$  soit  $+25\%$ , comme pour l'air).

La diffusivité thermique ( $a = \lambda / \rho C_p$ ) des liquides suit les variations de  $\lambda$  puisque les deux paramètres du dénominateur sont assez insensibles à  $T$ . Mais ce n'est pas du tout le cas avec les gaz vu que lorsque  $T$  augmente,  $\lambda$  augmente alors que  $\rho$  diminue. Il y a donc amplification (comme pour  $\nu$ ), et c'est ainsi que l'air voit sa diffusivité multipliée par 2 entre  $0$  et  $100^\circ\text{C}$  (de  $1,75$  à  $3,35\text{ m}^2/\text{s}$ ).

## 0.7. - LA DILATABILITÉ THERMIQUE

Dans certaines circonstances (convection libre et mixte), on est amené à prendre en compte de façon précise la variation de la masse volumique en fonction de la température, qui est à l'origine du mouvement. Cette variation est caractérisée par un paramètre appelé "dilatabilité" du fluide, et noté  $\beta$  (§ 5.2 et 6.2).

Pour les gaz,  $\beta = 1/T$ . La dilatabilité diminue donc quand  $T$  augmente. Dans la gamme des températures courantes rencontrées en convection libre ( $\approx 0^\circ\text{C}$  à  $80^\circ\text{C}$ ), elle passe ainsi de  $3,65 \cdot 10^{-3}\text{ K}^{-1}$  à  $2,85 \cdot 10^{-3}\text{ K}^{-1}$ , soit une baisse de 22 %.



Mais avec les liquides, la variation est considérable et inversée : par exemple, la dilatabilité de l'eau est de  $0,66 \cdot 10^{-4}\text{ K}^{-1}$  à  $0^\circ\text{C}$  et de  $6,55 \cdot 10^{-4}\text{ K}^{-1}$  à  $80^\circ\text{C}$ , donc multipliée par 10. C'est une propriété que l'on a un peu trop tendance à négliger lorsqu'on fait des calculs en convection libre.

## 0.8. - LA CHALEUR LATENTE DE CHANGEMENT D'ÉTAT

Les transferts convectifs s'accompagnent parfois d'un changement d'état liquide-gaz. C'est le cas dans les évaporateurs, les chaudières, les condenseurs, etc., dans beaucoup de réacteurs en génie des procédés, et dans tous les mécanismes qui mettent en oeuvre des écoulements d'air humide, à commencer par le séchage. Le paramètre caractéristique du changement de phase est la chaleur de vaporisation (ou de condensation)  $L_v$ .

Mise à part l'eau, pour laquelle  $L_v$  présente une valeur exceptionnellement forte ( $2250\text{ kJ/kg}$ ), les autres fluides classiques ont une chaleur de vaporisation comprise entre les bornes [ $\approx 100$  à  $\approx 1500\text{ kJ/kg}$ ]. En particulier, pour les fluides frigorigènes,  $L_v$  tourne autour de  $150$  à  $200\text{ kJ/kg}$ .

Ce paramètre est influencé par la pression, mais pas assez pour que cela vaille la peine d'en tenir compte.

## **0.9. - CONCLUSION SUR LA THERMODÉPENDANCE**

Pour fixer les idées, on peut résumer l'ensemble de ce qui précède en disant que, dans l'intervalle de référence  $[0, 100^\circ C]$ , les grandeurs thermophysiques varient au maximum de 30%, sauf la viscosité dynamique et la dilatabilité des liquides, qui se montrent hypersensibles à la température, et dans une moindre mesure la diffusivité thermique des gaz.