

Champ de température

La température T est définie en chaque point \vec{x} et à chaque instant t , soit $T \equiv T(\vec{x}, t)$. A un instant donné, il y a donc une infinité de températures définies au sein d'un objet physique A , une en chacun des points \vec{x} appartenant au volume intérieur \mathcal{D}_A : on parle du *champ volumique de température* au sein de A . On portera souvent une attention particulière aux températures définies en chacun des points \vec{y} situés sur $\partial\mathcal{D}_A$, c'est à dire à la frontière de A : on parle alors du *champ surfacique de température* à la frontière de A .

La *physique des transferts thermiques* permet l'analyse des champs de température en lien avec les échanges d'énergie par *conduction*, *convection* et/ou *rayonnement*. Nous définirons plus tard ces *trois modes de transfert thermique* mais dans chaque cas, les liens entre énergie et température seront de deux types :

- quelque soit le mode de transfert, les flux d'énergie sont modélisés comme des fonctions du champ de température, avec typiquement des flux orientés des zones les plus chaudes vers les zones les plus froides ;
- selon les sens des flux (convergeants ou divergeants), lorsque les transferts thermiques apportent ou enlèvent de l'énergie à un élément de matière (solide ou fluide), sa température peut augmenter ou baisser ; on utilisera pour cela une modélisation issue de la *thermodynamique de l'équilibre*.

La capacité calorifique

On rappelle ici quelques résultats de la thermodynamique de l'équilibre. Considérons un solide homogène indéformable A que l'on suppose à l'équilibre à tout instant. On suppose également que l'énergie associée à son interface I avec l'extérieur est négligeable, i.e. $\mathcal{E}_{A+I} = \mathcal{E}_A$. On note \mathcal{E} l'énergie de ce solide en omettant l'indice A : $\mathcal{E} \equiv \mathcal{E}_A$. De même, on note T sa température. A tout instant cette température est unique car le champ de température est uniforme au sein d'un objet lorsque cet objet est dans un état d'équilibre. On fait ensuite l'hypothèse que l'énergie cinétique d'ensemble \mathcal{E}_C , et l'énergie potentielle d'ensemble \mathcal{E}_P , sont négligeables devant l'énergie interne \mathcal{U} , i.e. $\mathcal{E} = \mathcal{U} + \mathcal{E}_C + \mathcal{E}_P \approx \mathcal{U}$. Dans ces conditions, l'évolution $d\mathcal{E}$ de l'énergie de A entre deux instants t et $t+dt$ infiniment proches, soit $d\mathcal{E} = \mathcal{E}(t+dt) - \mathcal{E}(t)$, est liée à l'évolution dT de sa température, soit $d\mathcal{E} = mc dT$, selon la relation

$$d\mathcal{E} = mc dT \quad (1)$$

où m est la masse de A et c est la capacité calorifique massique de la matière le composant.

Pour un liquide incompressible, la relation entre $d\mathcal{E}$ et dT est identique. Pour les milieux compressibles, au sens général, l'évolution de la température ne suffit pas à déterminer l'évolution de l'énergie. Mais pour les gaz, lorsqu'on peut faire l'hypothèse que le modèle du gaz parfait est valable (une hypothèse très souvent pertinente), on retrouve encore une fois la même relation :

$$d\mathcal{E} = mc_V dT \quad (2)$$

où c_V est la capacité calorifique massique à volume constant. Nous verrons que le plus souvent, pour les gaz, c'est à une autre capacité calorifique que l'on fait appel : la capacité calorifique massique à pression constante notée c_P . Celle-ci ne relie pas l'évolution de la température à l'évolution de l'énergie, mais à celle de l'enthalpie notée \mathcal{H} . Pour un gaz homogène, l'enthalpie est définie comme

Commentaire 1 - Thermodynamique du proche équilibre

Les transferts thermiques relèvent de la *physique du hors-équilibre*, mais on admet souvent que la thermodynamique de l'équilibre est valable localement. On parle alors de *thermodynamique du proche équilibre*. Le système étudié n'est pas à l'équilibre puisqu'en particulier les flux d'énergie sont non nuls et la température n'est pas la même en tout point. Mais si on considère un petit volume élémentaire $d\vec{x}$ autour d'un point \vec{x} , on admet que la matière dans $d\vec{x}$ se comporte à chaque instant comme si elle était à l'équilibre à la température $T(\vec{x}, t)$. Le système dans son ensemble n'est pas à l'équilibre mais on peut le découper en une infinité de petits volumes et appliquer la théorie de l'équilibre à chacun de ces petits volumes.

Commentaire 2 - Capacité calorifique d'un objet non uniforme

Le produit $C_A = mc$ est la capacité calorifique de A . Lorsque A n'est pas uniforme, la capacité calorifique massique est différente en chaque point (elle devient un champ volumique), i.e. $c \equiv c(\vec{x}, t)$. La capacité calorifique de l'en-

$\mathcal{H} = \mathcal{U} + PV$ où P est la pression du gaz et V son volume. Pour un gaz parfait on peut déjà retenir :

$$d\mathcal{H} = mc_P dT \quad (3)$$

C'est la thermodynamique des systèmes ouverts qui justifie de raisonner en termes d'enthalpie. Nous y reviendrons lorsque nous aborderons en détail la physique des transferts convectifs. L'idée principale est que grâce à l'enthalpie on peut raisonner comme si il n'y avait que des transferts thermiques. On laisse de côté le fait que lors des changements de volume du fluide il y a aussi des travaux des forces de pression, et donc des échanges d'énergie sous forme mécanique. Mais en compensation on ne dit plus que les flux d'énergie ϕ sous forme thermique à travers les interfaces se traduisent par des variations d'énergie pour les objets des deux côtés de l'interface : on dit qu'ils se traduisent par des variations de l'enthalpie de ces objets. Tout se passe alors comme si on "transférait de l'enthalpie".

semble de A s'écrit alors comme une somme des capacités calorifiques de tous les éléments de volume $d\vec{x}$ composant le volume intérieur \mathcal{D}_A de A . La masse de la matière contenue dans le volume élémentaire $d\vec{x}$ est $\rho(\vec{x}, t)d\vec{x}$ où ρ est la masse volumique. La capacité calorifique associée à ce volume élémentaire est donc $\rho(\vec{x}, t)d\vec{x}c(\vec{x}, t)$ et la capacité calorifique de A s'écrit

$$C_A = \int_{\mathcal{D}_A} \rho(\vec{x}, t)c(\vec{x}, t)d\vec{x} \quad (1)$$

Les transferts d'énergie sous forme thermique dépendent du champ de température

Pour illustrer quantitativement les liens entre énergie et température, nous pouvons reprendre l'exemple du corps humain A du ???chapitre précédent??. Le premier lien concerne la façon avec laquelle la perte énergétique du corps humain dépend de la température, ou plus précisément comment le flux à travers sa frontière, $\phi_{\partial\mathcal{D}_A}$, dépend à la fois de la température de surface du corps (la température de peau) et de la température de l'environnement. Admettons pour l'instant que $\phi_{\partial\mathcal{D}_A}$ correspond aux seuls transferts thermiques entre la peau, à $T_{peau} = 33^\circ C$, et l'air, à $T_{air} = 13^\circ C$ (les transferts par convection, mais nous verrons qu'il y a aussi d'autres transferts thermiques ainsi que des flux d'énergie qui ne relèvent pas de la thermique). Les $100W$ de perte sont alors liés à l'écart de température de $20^\circ C$ entre la peau et l'air. Si l'air n'est plus à $13^\circ C$ mais à $-7^\circ C$, alors l'écart de température entre la peau et l'air est de $40^\circ C$, c'est à dire deux fois plus élevé, et nous verrons que les modèles convectifs les plus usuels prévoient que le flux est proportionnel à l'écart de température, donc $\phi_{\partial\mathcal{D}_A} = -200W$. C'est le premier lien entre énergie et température : les flux d'énergie par transfert thermique dépendent du champ de température, ici de la différence de température entre la peau et l'air.

Les échanges d'énergie modifient le champ de température

Le second lien entre énergie et température concerne l'évolution du champ de température résultant des transferts d'énergie. Pour cela revenons à une perte constante de $100W$. Nous avons vu que le résultat de cette perte est qu'en l'absence d'alimentation, en une journée le corps humain perd $8640000J$. Donc entre deux instants t_i et t_f séparés de $24h$,

$$\mathcal{E}(t_f) - \mathcal{E}(t_i) = -8640000J \quad (4)$$

La question qui se pose est alors la suivante : comment va évoluer la température du corps lorsque son énergie va baisser de $8640000J$? Dans le cas du corps humain, cette question est mal posée car ce qui se produit pendant une journée sans alimentation est essentiellement une transformation chimique (on parle couramment de "bruler des graisses") et la température interne ne change pas (elle reste à $37^\circ C$). Par contre, si nous remplaçons le corps humain par une masse équivalente d'eau immobile, alors pendant chaque intervalle de temps dt nous allons pouvoir écrire $d\mathcal{E} = mc dT$, et si la capacité calorifique est indépendante de la température

$$\mathcal{E}(t_f) - \mathcal{E}(t_i) = \int_{[t_i, t_f]} mc dT = mc \int_{[t_i, t_f]} dT = mc (T(t_f) - T(t_i)) \quad (5)$$

Si on prend une masse $m = 80\text{kg}$, la capacité calorifique massique de l'eau aux températures usuelles étant $c = 4180\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, on en conclut que la variation de température correspondant à une perte d'énergie $\mathcal{E}(t_f) - \mathcal{E}(t_i)$ de -8640000J est

$$T(t_f) - T(t_i) = \frac{\mathcal{E}(t_f) - \mathcal{E}(t_i)}{mc} = \frac{-8640000}{80 * 4180} = -25.8\text{K} \quad (6)$$

Pour 80kg d'eau, la température aurait donc baissé de 25.8 degrés si on lui avait enlevé 100J toutes les secondes pendant 24h . On voit bien que cette baisse de température n'a rien de représentatif de ce qui arrive au corps humain (même si il est majoritairement composé d'eau) : le lien entre variation d'énergie et variation de température que nous avons fait dans ce chapitre n'est en effet valable que pour une matière qui ne change pas d'état et ne subit aucune transformation chimique, et ce n'est pas le cas du corps humain.

Aide 1 - Modèle / modélisation

Le concept de *modèle* occupe une place essentielle dans notre discours. Lorsque nous parlons de *modélisation*, il s'agit de l'action de choisir, énoncer et défendre la pertinence d'un modèle. Il est tout à fait possible de construire un enseignement de la physique des transferts thermiques sans jamais utiliser ces deux termes, mais nous nous sommes donné comme objectif de favoriser l'appropriation, non pas seulement d'aider à découvrir cette physique mais de former des thermiciens. Or "se former en Thermique" c'est devenir un modélisateur autonome : oser élaborer un modèle adapté à chaque nouveau contexte et disposer des moyens nécessaires à sa validation. Nous essaierons donc d'explicitier chacune des étapes de modélisation que nous reconstruirons, même si cela nous oblige à faire référence à des branches de la physique que nous ne travaillerons que plus tard dans le cours (ou que le lecteur devra travailler par lui-même). Nous avons procédé de cette façon dès le début du premier chapitre, lorsque nous avons parlé de modélisation macroscopique et d'énergie associée à une interface. Nous continuons avec le corpus de la thermodynamique de l'équilibre auquel nous nous référons ici sans aucun approfondissement, sachant que la question de la validité des modèles issus de l'hypothèse d'équilibre thermodynamique local deviendra plus tard une question de premier plan, lorsque nous aborderons la physique du rayonnement, puis lorsque nous nous intéresserons aux transferts d'énergie à petite échelle.

Commentaire 1 - Energie et énergie interne

La thermodynamique de l'équilibre distingue l'énergie \mathcal{E} et l'énergie interne \mathcal{U} . L'énergie \mathcal{E} regroupe cette énergie interne \mathcal{U} , l'énergie cinétique d'ensemble et l'énergie potentielle d'ensemble. En toute rigueur, les relations que nous venons de rappeler portent sur la variation de l'énergie interne $d\mathcal{U}$ et non pas sur $d\mathcal{E}$. Nous faisons donc l'hypothèse que les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle d'ensemble sont faibles devant les apports d'énergie par conduction, convection et rayonnement. L'énergie cinétique d'ensemble de A regroupe elle-même plusieurs contributions ??? est-ce que c'est bien correct ???, dont celle liée à la translation, soit $\frac{1}{2}m\vec{V}^2$ où \vec{V} est la vitesse de déplacement du centre de gravité de A (la vitesse moyenne de la matière composant A); les autres contributions sont liées à la rotation (si A tourne aussi sur lui-même) et à la vibration (si A est composé de plusieurs parties qui peuvent osciller l'une par rapport à l'autre). Ces phénomènes de translation, rotation et vibration d'ensemble doivent donc être négligeables devant ce que l'on cherche à étudier : on admet alors que macroscopiquement rien ne change (aucune manifestation énergétique à l'échelle de A) et que l'énergie apportée par les transferts thermiques se retrouve intégralement dans l'énergie interne (dans une modification de l'état de la matière à une échelle inférieure) ??? on n'a pas parlé de l'énergie potentielle d'ensemble ???). Si on prend le temps de comprendre ce qu'est l'énergie interne de A , on retrouve des énergies cinétiques de translation, de rotation et de vibration, mais ce sont typiquement celles des molécules constituant la matière de A . Si l'énergie interne de A augmente cela peut donc signifier que les molécules ont des vitesses plus élevées, tournent sur elles-mêmes plus rapidement, vibrent plus fortement, même si macroscopiquement rien ne traduit ce changement énergétique. De même, l'énergie potentielle est associée aux forces d'interaction et si on néglige les variations d'énergie potentielle d'ensemble, on néglige donc typiquement celles associées à l'interaction gravitationnelle avec la masse de la Terre, ou celles associées aux interactions électromagnétiques avec les charges existant dans l'environnement. Mais on retrouve de telles interactions dans l'énergie interne, typiquement les interactions électromagnétiques entre les protons et les électrons.

Cette question de la définition précise de l'énergie interne, de la distinction entre les énergies cinétiques et potentielles qui en relèvent et celles qui relèvent de l'énergie d'ensemble, est toujours une question très délicate. Nous ferons en sorte qu'il n'y ait pas d'ambiguïté possible avant d'avoir avancé dans la formation très largement. Nos premiers objets d'étude sont donc macroscopiquement immobiles, ne tournent pas, ne changent pas d'altitude, et les énergies qui nous intéressent sont seulement celles des molécules de A qui, même si A reste immobile, se déplacent, tournent, vibrent, interagissent entre elles d'une façon qui change lorsque A gagne ou perd de l'énergie.

Glossaire

This document is incomplete. The external file associated with the glossary ‘main’ (which should be called `fiche_energie_et_temperature.gls`) hasn’t been created.

Check the contents of the file `fiche_energie_et_temperature.glo`. If it’s empty, that means you haven’t indexed any of your entries in this glossary (using commands like `\gls` or `\glsadd`) so this list can’t be generated. If the file isn’t empty, the document build process hasn’t been completed.

If you don’t want this glossary, add `nomain` to your package option list when you load `glossaries-extra.sty`. For example:

```
\usepackage[nomain]{glossaries-extra}
```

Try one of the following:

- Add `automake` to your package option list when you load `glossaries-extra.sty`. For example:

```
\usepackage[automake]{glossaries-extra}
```

- Run the external (Lua) application:

```
makeglossaries-lite.lua "fiche_energie_et_temperature"
```

- Run the external (Perl) application:

```
makeglossaries "fiche_energie_et_temperature"
```

Then rerun \LaTeX on this document.

This message will be removed once the problem has been fixed.

Acronymes

This document is incomplete. The external file associated with the glossary ‘acronym’ (which should be called `fiche_energie_et_temperature.acr`) hasn’t been created.

This has probably happened because there are no entries defined in this glossary. Did you forget to use `type=acronym` when you defined your entries? If you tried to load entries into this glossary with `\loadglsentries` did you remember to use `[acronym]` as the optional argument? If you did, check that the definitions in the file you loaded all had the type set to `\glsdefaulttype`.

This message will be removed once the problem has been fixed.

Symboles

This document is incomplete. The external file associated with the glossary ‘symbols’ (which should be called `fiche_energie_et_temperature.sls`) hasn’t been created.

Check the contents of the file `fiche_energie_et_temperature.slo`. If it’s empty, that means you haven’t indexed any of your entries in this glossary (using commands like `\gls` or `\glsadd`) so this list can’t be generated. If the file isn’t empty, the document build process hasn’t been completed.

Try one of the following:

- Add `automake` to your package option list when you load `glossaries-extra.sty`. For example:

```
\usepackage[automake]{glossaries-extra}
```

— Run the external (Lua) application:
`makeglossaries-lite.lua "fiche_energie_et_temperature"`

— Run the external (Perl) application:
`makeglossaries "fiche_energie_et_temperature"`

Then rerun L^AT_EX on this document.

This message will be removed once the problem has been fixed.