

B. TEMPERATURE

La température est une grandeur physique qui, historiquement, a été difficile à définir et dont la mesure pose des problèmes conceptuels relativement délicats.

Notons que, pour le sens commun (et le vocabulaire usuel !), les notions de température et de chaleur sont intimement (voir inextricablement) mêlées.

Leur distinction est néanmoins fondamentale :

*La **température** est une **variable d'état**, elle caractérise un état énergétique d'un système.*

*La **chaleur** (ou plus académiquement le transfert thermique) est un phénomène de propagation d'énergie, c'est une **quantité énergétique** que le système va échanger avec l'extérieur.*

I Principe zéro de la thermodynamique, équilibre thermique :

Considérons pour exemple le cas d'un thermomètre à mercure : en le plongeant dans un bain stabilisé à une température donnée (c'est à dire thermostaté), par exemple de l'eau bouillant sous la pression atmosphérique, la colonne de mercure va d'abord se dilater, puis va atteindre l'équilibre thermique : les différentes grandeurs physiques permettant de la décrire ne varient plus. On affirme alors que la température du mercure est la même que celle du bain.

Principe zéro : deux systèmes en équilibre thermique ont même température ; et corrélativement, deux systèmes en équilibre thermique avec un même troisième système sont en équilibre entre eux.

II Echelles thermométriques :

Nos sens ne permettent pas une mesure directe de la température : nous ne faisons que ressentir une sensation de "chaud" ou de "froid" en touchant de la main un objet donné. Cette sensation correspond à un transfert thermique dont le sens et l'intensité dépendent des températures de l'objet et de notre main.

Par contre le phénomène de dilatation de la colonne de mercure d'un thermomètre nous donne accès à une grandeur mesurable (la longueur de la colonne de mercure) liée à la température du système considéré. On dit que la longueur de la colonne de mercure est une **grandeur thermométrique**. De nombreuses grandeurs physiques, dépendant de la température, peuvent aussi faire office de grandeur thermométrique : résistivité d'un métal, différence de potentiel à la jonction entre deux métaux, etc.

Remarquons cependant qu'en mesurant l'évolution d'une grandeur thermométrique, on ne mesure pas ici la température : on ne peut que **repérer** différentes températures le long d'une **échelle thermométrique**.

On va en effet établir une relation arbitraire (que l'on choisit simple) entre la grandeur thermométrique et la température par le biais de l'**équation thermométrique**.

Ce repérage, s'il permet de situer, de comparer, des températures, ne permet pas une mesure des température : la notion de mesure implique de pouvoir se référer à un étalon de mesure, et d'exprimer la mesure par rapport à cet étalon, ce qui suppose de pouvoir déterminer le rapport de deux températures. (le rapport entre la grandeur mesurée et l'étalon constitue la valeur de la mesure de la grandeur).

III Echelles centésimales :

Toute grandeur thermométrique, c'est à dire toute grandeur observable dont la valeur évolue avec la température, permet, en l'assortissant d'une équation thermométrique, de définir une **échelle empirique** de température.

Cette définition d'une échelle thermométrique se fera en fixant conventionnellement la température de certains points fixes, et par le choix de l'équation thermométrique.

Le cas particulier des échelles centésimales correspond au choix d'une relation linéaire entre la grandeur thermométrique et la température : la grandeur observable L est ainsi reliée à la température t par une équation thermométrique de forme : $L = A.t + B$ (L peut être par exemple la longueur de la colonne d'un thermomètre à mercure).

Il faut ensuite fixer deux températures de référence afin de définir les constantes A et B à partir de deux situations expérimentales facilement reproductibles.

On prendra par exemple la température de la glace fondante sous la pression atmosphérique, pour laquelle on fixe $t = 0$ lorsque $l = l_0$, et la température de l'eau en ébullition sous la pression atmosphérique, pour laquelle on fixe $t = 100$ pour $l = l_{100}$.

L'équation thermométrique peut alors se mettre sous la forme :

$$t = 100 \cdot \frac{l - l_0}{l_{100} - l_0}$$

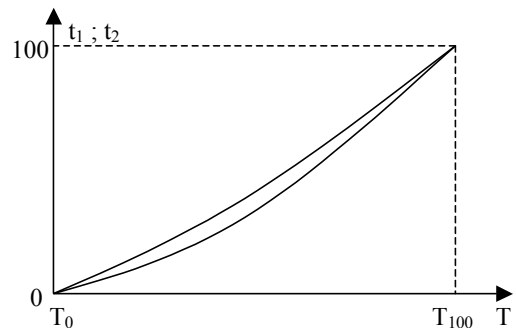
Cette démarche amène donc à décomposer un domaine de température en 100 intervalles arbitrairement considérés comme égaux (100 degrés).

Remarquons qu'à ce stade, nous n'avons toujours pas défini de mesure de la température, mais seulement un repérage de la température selon une échelle thermométrique centésimale. Pour illustrer cette notion, notons que la phrase : "une table de 2 m de long est deux fois plus longue que le mètre-étalon, ou qu'une table de 1 m" a un sens, alors que dire : "une température de 50 °C est deux fois plus forte qu'une température de 25 °C" ne signifie rien ! Que dire du 0 °C ? et de -10 °C ?

IV Inconvénient des échelles empiriques :

On peut construire différentes sortes de thermomètre, basés sur la dilatation de différents corps, ou même sur des phénomènes physiques différents. Deux thermomètres mettant en jeu des grandeurs thermométriques différentes n'indiqueront en général la même température que pour les points conventionnels $t = 0$ et $t = 100$.

En notant t_1 la température repérée à l'aide d'un premier thermomètre et t_2 celle obtenue à partir d'un second, et en admettant qu'il est possible de définir une température absolue T (la "vraie" température), ce que nous montrerons plus loin, on peut tracer le graphe ci-contre.



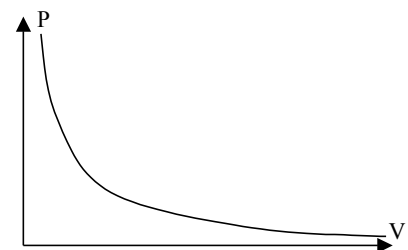
Il faudrait donc définir une échelle s'appuyant sur une grandeur thermométrique qui soit indépendante des propriétés spécifiques de tel ou tel corps. C'est l'échelle dite "des gaz parfaits", basée sur les propriétés des gaz aux très faibles pressions.

V Echelle thermométrique des gaz parfaits :

V-1 Comportement des gaz aux faibles pressions :

On considère une masse donnée d'un gaz. Son état physique est supposé défini par son volume V , sa pression P et sa température t . On peut étudier expérimentalement les évolutions de P , V et t .

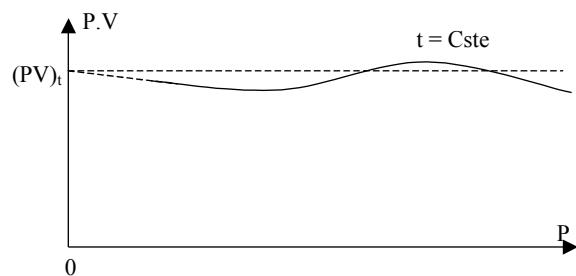
On peut envisager notamment, pour cet échantillon de gaz, le tracé de courbes isothermes représentant l'évolution de la pression en fonction du volume à température constante (isotherme en diagramme de Clapeyron).



Ces courbes présentent une allure hyperbolique ($P \approx k/V$ avec $k = \text{cste}$), qui amène à tracer ensuite les courbes isothermes représentant l'évolution du produit $P.V$ en fonction de la pression P .

Ces courbes sont nommées isothermes en diagramme d'Amagat :

On attend des variations faibles du produit $P.V$ à température constante ($P.V \approx k$).



On constate alors que les courbes isothermes en diagramme d'Amagat présentent une asymptote pour les faibles pressions qu'il est possible d'extrapoler pour la pression nulle.

On obtient alors pour une température t fixée, une grandeur correspondant à la limite $(P.V)_t = \lim_{P \rightarrow 0} P.V$ pour $P \rightarrow 0$, dépendant de la température, et constituant ainsi une grandeur thermométrique.

On peut donc utiliser $(P.V)_t$ pour construire une échelle de température.

On a tracé sur le graphe la courbe horizontale correspondant au modèle du Gaz Parfait, pour lequel le produit P.V est strictement invariant à température constante.

V-2 Echelle des gaz parfait :

Jusque là, le fait de choisir $(PV)_t$ comme grandeur thermométrique ne change à priori pas grand chose.

Mais l'intérêt va apparaître en considérant le diagramme d'Amagat de courbes isothermes relatives à des gaz différents :

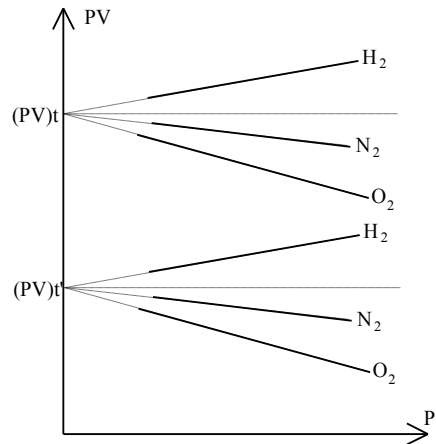
en prenant des échantillons contenant un même nombre de moles de gaz, l'extrapolation des isothermes pour $P \rightarrow 0$ conduit à une même valeur de $(PV)_t$ ne dépendant que de t.

A pression suffisamment faible (en extrapolant à pression nulle), tous les gaz rejoignent le modèle théorique du Gaz Parfait.

Quelle que soit la nature du gaz employé, le rapport des quantités $(PV)_t$ pour la température de l'eau bouillante ($t = 100$) et pour celle

définie par la glace fondante ($t = 0$) vaut : $\frac{(PV)_{t=100}}{(PV)_{t=0}} = 1,36610$,

valeur numérique que nous retrouverons dans un prochain chapitre.



De même, pour deux isothermes de températures t et t' quelconques, le rapport $(PV)_t / (PV)_{t'}$ ne dépend pas de la nature du gaz.

VI Définition de la température absolue, correspondance avec l'échelle Celsius :

L'échelle légale de température est fixée sur l'échelle des gaz parfaits. On notera T (en majuscule) la température absolue, définie par la relation :

$$\frac{(PV)_t}{(PV)_{t'}} = \frac{T}{T'}$$

La température absolue apparaît donc comme **mesurable**, puisque l'on a un procédé expérimental permettant de définir un **rapport** de deux températures absolues.

Il reste à choisir l'unité de température, en fixant la valeur d'une température particulière qui servira d'**étalon**.

Ce choix est déterminé par la volonté d'obtenir une correspondance avec l'échelle Celsius, qui comporte 100 degrés entre la température de la glace fondante et la température d'ébullition de l'eau sous la pression atmosphérique.

L'unité de température absolue est le Kelvin (K). La température de fusion de la glace vaut : $T_{\text{Fus}} = 273,15$ K.

Le rapport 1,36610 entre les températures absolues d'ébullition de l'eau et de fusion de la glace amène ainsi :

$$T_{\text{Eb}} = 1,36610 \cdot T_{\text{Fus}} = 373,15 \text{ K.} \quad \text{On a donc 100 K entre ces deux températures.}$$

Ceci amène donc une correspondance très simple entre la température absolue T et la température Celsius t :

$$t = T - 273,15$$

Ainsi, un écart de température aura même valeur exprimé en degrés Celsius et en Kelvin : $\Delta t = \Delta T$.

La situation expérimentale qui servira d'étalon doit être parfaitement reproductible, ce qui n'est pas le cas de la fusion de la glace, où de l'ébullition de l'eau, dépendant de la pression. C'est pourquoi il a été décidé de se fonder sur la température du point triple de l'eau, situation où coexistent, en équilibre, les trois états physiques de l'eau : solide (glace), liquide et vapeur. Cet état ne peut être obtenu qu'à une pression P_{triple} et une température T_{triple} parfaitement déterminées. ($P_{\text{triple}} = 613$ Pa et $T_{\text{triple}} = 0,01$ °C).

On choisit donc pour valeur d'étalon : $T_{\text{triple}} = 273,16$ K

Conclusion :

La température Celsius t correspond à une échelle thermométrique centésimale ; elle est basée sur les propriétés des gaz à pression infiniment faible.

Elle est en relation selon : $t = T - 273,15$ avec la température absolue T , basée sur la même échelle thermométrique, dite échelle des gaz parfaits, qui définit la température absolue par : $\frac{(PV)_t}{(PV)_{t'}} = \frac{T}{T'}$.

L'étalon de température est la température du point triple de l'eau : $T_{\text{triple}} = 273,16 \text{ K}$.