

se fait la respiration des animaux et celle des végétaux. Nous n'avons pas à insister sur ces questions mêmes qui appartiennent à un autre cours, mais il était nécessaire d'indiquer les phénomènes simples dont on retrouve l'équivalent dans les actions qui se manifestent dans cette fonction, actions qui sont sans doute plus complexes, parce que les conditions sont aussi moins simples; comme nous l'avons déjà indiqué, notamment, les liquides qui existent dans les tissus des êtres vivants ne peuvent être assimilés absolument ni à des liquides purs, ni à de simples solutions de solides ou de gaz. Ajoutons que, pour certains cas au moins, les gaz qui se trouvent dans ces liquides ne sont pas seulement à l'état de dissolution, mais qu'ils sont engagés dans des combinaisons chimiques; quoique celles-ci soient peu stables, se décomposent facilement, les gaz qui y figurent ne sont pas aussi libres que s'ils étaient seulement à l'état de dissolution.

194. — Enfin un phénomène encore moins bien connu et qui n'a pas été étudié, est celui de l'osmose qui se produit entre deux gaz dissous dans des liquides séparés par une membrane : deux cas différents devraient d'ailleurs être considérés successivement selon qu'il s'agit de solutions gazeuses dans un même liquide, ou que les liquides séparés par la membrane sont de nature différente.

Nous ne pouvons signaler aucune donnée numérique sur cette question, ni même aucune expérience précise : des faits de cet ordre existent cependant; c'est, en effet, des phénomènes de ce genre qui se produisent dans la respiration des animaux aquatiques : il y a osmose entre l'acide carbonique du sang et l'oxygène dissous dans l'eau. Une action analogue a lieu dans la respiration des plantes submergées. Ces échanges gazeux ont lieu certainement : nous ne savons rien des lois auxquelles ils obéissent.

Nous en avons dit assez dans ce qui précède, encore que nous n'ayons pu traiter complètement toutes les questions, pour montrer que les phénomènes si variés de nutrition et de respiration qui se passent chez les êtres vivants (phénomènes qui consistent, au fond, en des échanges entre des solides, des liquides et des gaz qui sont directement en contact ou qui sont séparés par des corps poreux), ne sont pas d'une nature particulière qui permette de les distinguer des phénomènes physiques proprement dits. Nous ne croyons pas devoir insister, mais nous pensons que ce rapprochement, pour ne pas dire cette identité, est tel que tout progrès fait dans l'explication des phénomènes fonctionnels dont nous parlons correspondra à un progrès dans l'étude des phénomènes physiques dont nous venons de passer les principaux en revue.

## LIVRE II

### CHALEUR

#### CHAPITRE PREMIER

##### NOTIONS PRÉLIMINAIRES

195. **Sensations de chaleur et de froid.** — Lorsque nous sommes soumis à certaines influences extérieures telles que l'action des rayons du soleil, le voisinage d'un corps en combustion, nous éprouvons une sensation particulière dite *sensation calorifique* ou *chaleur*; cette sensation disparaît plus ou moins rapidement lorsque cesse l'influence extérieure. Cette sensation n'est pas localisée dans un organe spécial et il semble que c'est par toute la périphérie de notre corps que nous pouvons l'éprouver.

D'autre part le contact d'un morceau d'eau congelée, le vent du nord en hiver, nous font éprouver une autre sensation, le *froid*; comme la précédente, elle cesse avec l'action qui l'a fait naître, comme celle-ci elle n'est pas localisée dans un organe spécial, mais peut être éprouvée en un point quelconque de notre corps.

Ces deux sensations sont différentes, nous les distinguons aisément; mais, absolument, nous ne pouvons les opposer l'une à l'autre, ainsi qu'il arrive pour toutes les sensations quelles qu'elles soient : nous ne pouvons dire que l'une est le contraire de l'autre.

Disons que dans des conditions pathologiques déterminées et sans cause extérieure nous éprouvons quelquefois de semblables sensations; mais la cause en est toute différente, et nous n'avons pas à nous en occuper ici.

Nous ignorons quelles sont les causes de ces sensations, et nous ne savons pas directement si elles ont entre elles quelques relations : diverses observations peuvent nous renseigner à cet égard.

On reconnaît, en effet, que, placés dans les conditions où nous éprouvons ces sensations, les corps inanimés subissent des changements dans

diverses propriétés, dureté, état, etc. L'un des effets les plus généraux consiste dans des changements de dimensions; les corps, en général, et sauf de rares exceptions, se dilatent dans les conditions où nous éprouvons de la chaleur; ils se contractent, diminuent de dimensions quand nous éprouvons du froid. Les causes qui nous font éprouver deux sensations différentes produisent dans les corps inanimés des effets de même nature, des changements de dimensions, soit en plus, soit en moins. Il est donc naturel de supposer que les dimensions d'un corps sont liées à l'action d'une certaine cause, augmentant ou diminuant avec celle-ci; il est naturel aussi de supposer que c'est cette cause qui nous fait éprouver les sensations de chaleur et de froid, la chaleur étant due aux conditions qui amènent la dilatation des corps, c'est-à-dire à l'augmentation d'action de cette cause, le froid aux conditions qui amènent la contraction, c'est-à-dire à sa diminution. On a désigné cette cause, quelle qu'en soit la nature, sous le nom de *chaleur*, dénomination qui peut amener une certaine confusion si l'on n'y prend garde, puisqu'elle s'applique à la fois à la sensation et à la cause hypothétique de cette sensation.

On pensait autrefois que la chaleur (on dit aussi quelquefois le *calorique*, mais moins souvent) était un fluide impondérable qui pouvait entrer dans les corps, les pénétrer, ou en sortir. Des considérations que nous exposerons plus loin montrent que cette hypothèse est peu vraisemblable et qu'il convient plutôt de rattacher la chaleur aux mouvements infiniment petits des molécules des corps. Mais, comme on le verra, il est inutile de connaître la nature de la chaleur pour l'étude des phénomènes qu'elle produit: cependant l'hypothèse qui la rattache aux mouvements moléculaires permet de se rendre facilement compte de quelques effets observés.

**196. Mesure des effets calorifiques. Température.** — Les sensations de chaleur et de froid ne nous permettent pas de préciser les conditions dans lesquelles se produisent les effets calorifiques; elles dépendent non seulement de ceux-ci mais encore de notre état, des conditions dans lesquelles nous étions antérieurement. De nombreuses observations montrent, en effet, que des conditions identiques peuvent faire naître des sensations différentes; nous citerons seulement une expérience caractéristique.

Plongez l'index de la main gauche, par exemple, dans un vase contenant de l'eau glacée, et l'index de la main droite dans un autre vase contenant de l'eau qu'on a chauffée. Après quelques minutes portons les deux doigts en même temps dans un troisième vase contenant de l'eau qui a été abandonnée à elle-même. Quoiqu'ils soient soumis à une cause identique, les deux doigts font éprouver des sensations différentes: par le premier, le doigt gauche, nous jugerons que l'eau est chaude, par le second, nous jugerons qu'elle est froide.

Les effets produits sur les corps inanimés semblent plus réguliers; ils se manifestent identiques à eux-mêmes lorsque, en tenant compte de tout, les conditions nous paraissent être identiques. Il est donc naturel de prendre l'un de ces effets pour caractériser les conditions dans lesquelles intervient l'agent chaleur, les conditions calorifiques: on a choisi, conventionnellement, le volume des corps pour caractériser ces conditions.

Étant donné un corps, on dira qu'il est soumis aux mêmes conditions calorifiques, qu'il repasse par le même état calorifique toutes les fois qu'il reprend le même volume: les conditions calorifiques auront changé lorsque le volume aura changé.

Il faut pouvoir caractériser ces conditions calorifiques et le procédé le plus simple est de les caractériser numériquement. Le nombre qui caractérise un état calorifique déterminé est ce qu'on appelle sa *température*; le *thermomètre* est l'appareil qui permet de déterminer la température correspondant à un état calorifique donné.

197. — Indiquons sur quelles conventions repose l'évaluation numérique des températures.

L'observation montre que lorsque différents corps de même volume sont placés dans les mêmes états calorifiques, les changements qu'ils éprouvent ne sont pas les mêmes. Il faut donc choisir la nature du corps dont on étudiera le volume: c'est ce qu'on appelle la *substance thermométrique*. Arbitrairement (et pour des raisons qu'il est inutile de développer) on a choisi l'air comme substance thermométrique.

Les températures sont définies par les changements de volume; on a pris pour les définir la relation la plus simple, la proportionnalité:

*Les variations de température sont proportionnelles aux variations de volume.*

On fait choix enfin arbitrairement, de deux états calorifiques, qu'on puisse aisément reproduire identiques à eux-mêmes, et on convient, arbitrairement aussi, des valeurs de la température pour ces états. Ce sont ces données conventionnelles qui définissent l'*échelle thermométrique* employée.

198. — L'échelle thermométrique la plus usitée est l'échelle centigrade; elle est définie ainsi: les deux états calorifiques qui servent de termes de comparaison sont ceux qui correspondent à la glace fondante, et à l'eau bouillante, sous la pression normale de 76 centimètres; les températures correspondantes sont respectivement 0 et 100.

Si donc nous désignons par  $V_0$  le volume du corps thermométrique dans la glace fondante, par  $V_{100}$  son volume dans l'eau bouillante et par  $V_t$  son volume dans un état calorifique dont nous désignerons la température par  $t$ , nous devons avoir, par définition:

$$\frac{t}{100} = \frac{V_t - V_0}{V_{100} - V_0}$$

ou :

$$t = \frac{100}{V_{100} - V_0} (V_t - V_0).$$

La valeur de  $t$ , déduite de cette équation, est le nombre de degrés ( $t^\circ$ ) qui définit l'état calorifique considéré.

On remarquera que, suivant que ce second état calorifique donnera à  $V_t$  une valeur plus grande ou plus petite que  $V_0$ , c'est-à-dire suivant que, à partir de la glace fondante, le thermomètre se sera dilaté ou contracté, la valeur de  $t$ , la température, sera positive ou négative.

Dans l'équation précédente la quantité  $\frac{100}{V_{100} - V_0}$  qui est constante est ce qu'on appelle le *coefficient thermométrique*.

De la première équation, nous pouvons déduire la définition du degré centigrade :

Le degré centigrade ( $1^\circ$ ) est la variation de température qui communique à une masse d'air une variation de volume égale à la centième partie de la variation que cette masse éprouve en passant de la température de la glace fondante à celle de l'eau bouillante, sous la pression normale de 76 centimètres de mercure.

Dans les recherches de précision, on emploie un thermomètre à air réalisant les conditions que nous venons d'indiquer : dans la pratique, on se sert généralement d'un thermomètre à mercure donnant la température par une simple lecture ; nous y reviendrons plus loin : nous indiquerons alors d'autres échelles thermométriques qui sont quelquefois employées.

Nous ferons remarquer que les mesures de température sont entièrement arbitraires, comme, naturellement, toutes celles qu'on en déduit. Il serait possible cependant de rattacher ces mesures au système d'unités absolues qui sont employées pour certaines parties de la physique et de la mécanique : mais les mesures relatives à la chaleur sont usitées depuis longtemps et beaucoup de données numériques s'y rattachent. On n'a pas cru pouvoir rompre avec d'anciennes habitudes, ce qui est regrettable à divers égards.

**199. Hypothèse sur la nature de la chaleur.** — Nous avons dit que l'idée d'un agent spécial pour expliquer les effets calorifiques était abandonnée : une hypothèse qui paraît rendre compte des faits observés consiste à rattacher l'état calorifique d'un corps au mouvement moléculaire. Les molécules des corps seraient toujours en mouvement, exécutant des mouvements oscillatoires ou orbitaires pour les solides et les liquides, animées de mouvement rectiligne pour les gaz : les vitesses de ces mouvements pourraient varier, et les états calorifiques seraient reliés à la grandeur de ces vitesses, ou tout au moins à la grandeur de la

moyenne de ces vitesses si, comme il est au moins possible, celles-ci varient très rapidement.

Nous avons indiqué en mécanique (XLIV) que la force vive d'un système mesure son énergie potentielle, mesure, pour ainsi dire, la possibilité d'agir que ce système possède au point de vue mécanique lorsqu'il s'agit du mouvement de totalité du corps ; nous étendrons cette idée au cas du mouvement moléculaire et nous dirons que la force vive moléculaire mesure l'énergie calorifique que possède le corps, mesure sa possibilité d'agir au point de vue calorifique.

Nous verrons, par la suite, à préciser cette notion.

**200. Des quantités de chaleur.** — Les lois qui ont été déterminées rattachent les divers effets produits aux variations de température ; ce n'est là qu'un côté de la question, et il serait désirable de relier les effets à leur cause réelle, la chaleur, en introduisant dans les lois les variations de quantités de chaleur.

Disons que, quoique l'on n'ait pas cherché directement ces relations, on pourrait cependant les trouver. Si, d'une part, en effet, on a la loi entre un effet déterminé et la température, d'autre part, on a trouvé la relation entre les variations de température et les quantités de chaleur qui les produisent. On voit donc que la température intervient comme un auxiliaire, un intermédiaire, que l'on pourrait éliminer ; nous dirons même que cette élimination est facile, et nous la ferons à l'occasion, tant qu'il n'est pas nécessaire d'apporter une extrême précision dans les déterminations, et c'est le cas pour le point de vue où nous avons à nous placer.

La détermination de ces relations exige qu'on puisse mesurer des quantités de chaleur, notion vague jusqu'à présent, puisqu'on ignore ce qu'est la chaleur. Nous allons indiquer par quelles considérations on peut arriver à préciser cette notion. Les moyens pratiques d'effectuer les mesures de quantités de chaleur font le sujet de la *calorimétrie* dont nous nous occuperons plus loin.

**201.** — L'expérience montre que si deux corps sont à la même température, il ne se produit aucun changement lorsqu'on les met au contact ; il y a équilibre de température. Il n'en est pas de même si les corps ayant été soumis préalablement à des conditions calorifiques différentes ne sont pas à la même température ; par le contact, plus ou moins prolongé, ils arrivent l'un et l'autre à une température finale intermédiaire aux deux températures primitives. L'un a gagné de la chaleur, l'autre en a perdu : quelle que soit la nature de cet agent on admet que les quantités de chaleur en jeu sont égales (pourvu qu'il n'y ait aucune action autre que la variation de température). Il n'y a donc, en totalité, ni gain, ni perte de chaleur, mais seulement une répartition nouvelle qui s'est produite.

Nous déduirons de là que, lorsque la température d'un corps change sans qu'aucun autre effet soit produit, il doit y avoir un échange de chaleur et qu'il doit y avoir un corps qui, d'une façon quelconque, absorbe ou fournit de la chaleur.

202. — Considérons un effet quelconque produit par la chaleur, la fusion de la glace, par exemple. Nous devons admettre évidemment que, quelle que soit la nature de la chaleur, il faut toujours la même quantité de chaleur pour fondre la même quantité de glace, 1 kilogramme par exemple. On conclut de là que pour fondre 2, 3... kilogrammes de glace, il faut 2, 3... fois plus de chaleur que pour fondre 1 kilogramme et l'on en déduit qu'il y a proportionnalité entre les quantités de chaleur et les poids de glace fondue; ces derniers peuvent donc être pris comme mesure des premières.

Nous devons également admettre que 1 gramme d'hydrogène en brûlant dégage sous la même pression toujours la même quantité de chaleur; et par une remarque analogue à la précédente, nous concluons qu'il doit y avoir proportionnalité entre les poids d'hydrogène brûlé et les quantités de chaleur dégagée; les premiers peuvent être pris comme moyen de mesure des dernières.

On pourrait raisonner de même pour divers autres effets et l'on aurait ainsi diverses manières de mesurer les quantités de chaleur. Nous nous arrêterons spécialement sur la méthode qui est suivie effectivement pour la mesure des quantités de chaleur, méthode qui a été choisie arbitrairement, mais qui en somme relie les quantités de chaleur à un élément déjà défini, la variation de température.

203. **De la calorie.** — Soit une masse d'eau du poids de 1 kilogramme amenée à 0°, c'est-à-dire à la température de la glace fondante; pour l'amener à la température de 1°, il faut lui fournir une certaine quantité de chaleur; ce serait cette même quantité de chaleur qu'il faudrait fournir à toute autre masse d'eau de 1 kilogramme pour faire varier sa température de 0 à 1°.

Cette quantité de chaleur a été choisie comme unité de quantité de chaleur; on la désigne sous le nom de *calorie*. Donc :

*La calorie est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 kilogramme d'eau à 0° pour l'amener à la température de 1°.*

Comme précédemment, si au lieu de 1 kilogramme d'eau on a des masses de 2, 3...  $n$  kilogrammes dont on fasse varier la température de 0 à 1°, il faut fournir 2, 3...  $n$  fois plus de chaleur, c'est-à-dire 2, 3...  $n$  calories.

Les quantités de chaleur sont ainsi définies par des poids d'eau dont la température varie de 0 à 1°.

On emploie quelquefois une autre unité définie d'une façon identique, si ce n'est qu'on considère 1 gramme d'eau au lieu de 1 kilo-

gramme. Cette nouvelle unité est donc 1000 fois plus petite que la première : on la désigne quelquefois aussi sous le nom de *calorie*, ce qui est un inconvénient. Pour éviter toute confusion on peut la nommer *petite calorie* ou *calorie-gramme-degré*, par opposition à la première, qui est la *grande calorie* ou *calorie-kilogramme-degré*.

Mais au point de vue expérimental, il ne serait pas toujours commode de maintenir les températures exactement entre 0 et 1° en faisant varier le poids de l'eau en expérience; la difficulté peut être levée, comme nous allons le dire tout à l'heure.

On admet, et ceci semble d'accord avec toutes les expériences, que s'il faut fournir à un corps une certaine quantité de chaleur pour élever sa température de  $t$  à  $t'$ , ce corps abandonnera précisément la même quantité de chaleur lorsque sa température s'abaissera de  $t'$  à  $t$  (en admettant que, dans les deux cas, il n'y ait aucun autre effet produit que la variation de température).

Ceci posé, l'expérience montre que si l'on mélange des poids égaux d'eau, l'un à  $t$ , l'autre à  $t'$ , le mélange a (si l'on peut éviter toutes les causes d'erreur) une température égale à la moyenne des températures primitives,  $\frac{t + t'}{2}$ . Si  $t$  est plus grand que  $t'$ , la première masse a fourni de la chaleur en quantité égale à celle que la seconde a absorbée. Or pour ces quantités de chaleur égales, les variations de température ont été de  $t$  à  $\frac{t + t'}{2}$ , soit  $\frac{t - t'}{2}$ , et de  $t'$  à  $\frac{t + t'}{2}$ , soit aussi de  $\frac{t - t'}{2}$ . Donc des quantités de chaleur égales agissant sur des masses égales d'eau produisent des variations égales de température.

Comme précédemment, on conclut de là que, pour des masses d'eau égales, les variations de températures sont proportionnelles aux quantités de chaleur. Il faut 1 calorie pour faire varier de 1° la température de 1 kilogramme d'eau; il faudra  $t$  calories pour faire varier de  $t$ ° la température de 1 kilogramme d'eau. Et, d'une manière plus générale, il faut  $p$  calories pour faire varier de 1° la température de  $p$  kilogrammes d'eau, il faudra  $pt$  calories pour faire varier de  $t$ ° la température de  $p$  kilogrammes d'eau.

On conçoit qu'il est facile de déterminer le poids de l'eau employée et la variation de température qu'elle subit; on en déduit la quantité de chaleur qui a agi. La nécessité de faire varier la température entre deux limites déterminées n'existe plus.

Il importe de dire toutefois que ces résultats ne sont pas tout à fait exacts, et qu'il n'y a pas absolument proportionnalité entre les variations de température et les quantités de chaleur; mais tant que ces variations ne dépassent pas 60° et c'est le cas dans les faits dont nous avons à nous

occuper, la proportionnalité existe très sensiblement, et l'on ne commet pas d'erreurs appréciables en l'appliquant.

204. **Chaleur spécifique.** — Les résultats que nous venons de signaler sont vrais également, avec la même approximation, pour des corps quelconques : pour un corps déterminé, il y a très sensiblement proportionnalité entre la quantité de chaleur fournie ou absorbée par le corps et la variation correspondante de température.

Mais l'expérience montre que pour des poids égaux de corps différents, il faut des quantités de chaleur différentes pour produire la même variation de température. C'est ce que montre l'exemple suivant :

On mélange 1 kilogramme d'eau à 0° et 1 kilogramme de mercure à 60° : lorsque l'équilibre est établi la température des deux corps est égale à 1°,93. L'eau a donc reçu 1,93 calorie et pour fournir cette quantité de chaleur, la température du mercure a dû s'abaisser de  $60 - 1,93 = 58,07$ . Donc pour 1° la masse de 1 kilogramme de mercure aurait fourni seulement  $\frac{1,93}{58,07} = 0,0333$  calorie. Cette quantité est ce qu'on appelle la *chaleur spécifique* du mercure. Une remarque analogue peut être faite pour tous les corps ; on a alors :

*La chaleur spécifique d'un corps est la quantité de chaleur (nombre de calories) qu'il faut fournir ou enlever à une masse de 1<sup>kg</sup> pour faire varier sa température de 1°.*

De ces diverses considérations, on déduit que si  $p$  est le poids d'un corps,  $t$  et  $t'$  les valeurs entre lesquelles varie sa température sous l'influence d'une quantité de chaleur  $q$ , et  $c$  sa chaleur spécifique, on a :

$$q = c(t - t'), \text{ si } t > t' \quad \text{ou} \quad q = c(t' - t), \text{ si } t' > t.$$

La notion de chaleur spécifique ne peut évidemment s'appliquer qu'aux corps homogènes ; c'est dire qu'elle a peu d'importance directement dans l'étude des êtres organisés.

## CHAPITRE II

### PROPAGATION DE LA CHALEUR. — CONDUCTION

205. **Modes de propagation de la chaleur.** — Considérons un corps porté à une température différente de celle de l'enceinte dans laquelle il se trouve, plus élevée par exemple. L'expérience montre que cette température s'abaisse plus ou moins rapidement, le corps se refroidit. Quelles sont les causes de ce refroidissement ? Ces causes sont au nombre de trois :

1° La *conduction* : le corps fournit aux corps avec lesquels il est en contact, notamment à son support, une certaine quantité de chaleur qui se propage dans ce corps en élevant successivement la température des divers points.

2° La *radiation* : le corps envoie, à travers les corps qui l'entourent, de la chaleur qui passe à travers ceux-ci sans les échauffer pour aller s'arrêter plus loin sur d'autres corps qui l'absorbent et dont la température s'élève.

3° La *convection* : le corps étant en contact avec un corps fluide, échauffe directement les couches du fluide qui le touchent, celles-ci deviennent plus légères (251), s'élèvent en emportant la chaleur qu'elles ont reçue pour être remplacées par d'autres couches pour lesquelles se produit le même effet.

Des considérations analogues, mais inverses, seraient à signaler si la température du corps était inférieure à celle de l'enceinte.

Les questions relatives à la convection et à la radiation seront étudiées ultérieurement et nous nous occuperons surtout ici de la conduction.

206. **Conduction.** — Lorsqu'on échauffe un point d'un corps, on reconnaît que la température des divers autres points s'élève progressivement : tel est, comme nous l'avons dit, le phénomène de la *conduction* ; la *conductibilité* est la propriété que possède ce corps de transmettre ainsi la chaleur.

Quand on considérait la chaleur comme un fluide, ce phénomène s'expliquait par un écoulement du fluide du point où la température est la plus élevée à ceux où elle est plus basse. Dans l'hypothèse que nous avons indiquée et admise, il n'y a rien de semblable : il y a aux divers points des molécules dont les vibrations ont plus ou moins d'amplitude. Celles pour lesquelles l'amplitude est la plus grande, dont la température est la plus élevée, communiquent une certaine quantité de force vive aux molécules voisines dont les vibrations prennent plus d'amplitude, dont la température s'élève ; le même effet se produit de proche en proche, jusqu'à ce que tous les points ayant la même température, si cela est possible, il n'y ait plus communication de mouvement d'une molécule aux molécules voisines.

Considérons, par exemple, une barre pour laquelle les résultats sont simples à énoncer. Supposons que, au début, tous ses points soient à une même température et qu'on vienne à en échauffer un, une de ses extrémités, par exemple, en maintenant sa température constante.

On observe que, plus ou moins rapidement, les températures des autres points s'élèvent de telle sorte que la température d'un point dépend de sa position et de l'instant de l'observation. Mais, à partir d'un certain moment, chaque point conserve une température invariable, celle-ci ne dépendant plus que de la position du point. La première phase de