

gaz d'éclairage et d'air. On fait en sorte que l'air soit toujours en excès, le gaz d'éclairage n'entrant dans le mélange que pour 7 centièmes environ : on obtient alors, non pas une explosion violente, mais une combustion qui s'effectue, pour ainsi dire, par couches successives.

Le piston aspire lui-même dans le cylindre, une fois la machine lancée, le gaz combustible et l'air extérieur ; quand le piston arrive en un point déterminé de sa course, le tiroir, qui avait permis l'admission du mélange gazeux, ferme la lumière : c'est alors qu'on produit l'inflammation, qui donne naissance à une pression de 5 ou 6 atmosphères.

Quant à la manière de produire l'inflammation du mélange gazeux au moment précis où elle doit avoir lieu, elle diffère d'une machine à l'autre. — Dans la *machine Lenoir*, une étincelle électrique, produite par une petite bobine de Ruhmkorff (livre V), jaillit dans l'intérieur du cylindre. — Dans la *machine Hugon*, l'inflammation est produite par deux petits becs de gaz, installés dans des cavités ménagées dans le tiroir. Chacun de ces becs, en pénétrant dans la boîte, allume le mélange et s'éteint lui-même par l'explosion ; il sort alors de la boîte, et vient se rallumer à un bec fixe, placé à l'extérieur : il rentre ensuite dans la boîte, au moment où il doit allumer de nouveau le mélange, et ainsi de suite (*).

En raison du prix, relativement élevé, du gaz d'éclairage, les machines à gaz sont moins économiques que les machines à vapeur, lorsqu'il s'agit d'un travail qui doit se continuer longtemps d'une manière régulière. — Elles sont précieuses surtout pour les travaux intermittents, puisqu'il suffit de quelques minutes pour les mettre en mouvement, et qu'on n'a pas à supporter de dépense de combustible dans les intervalles de repos de la machine.

(*) Dans les machines à gaz en général, la combustion, qui s'effectue dans le cylindre lui-même, donne lieu à un dégagement de chaleur considérable : aussi est-il nécessaire, pour éviter une trop grande élévation de température qui rendrait le graissage défectueux et détruirait les joints, de faire circuler constamment un courant d'eau froide autour du cylindre, dans une double enveloppe.

CHAPITRE XI

NOTIONS SUR LA THÉORIE MÉCANIQUE DE LA CHALEUR

I. — ÉQUIVALENCE ENTRE LE TRAVAIL MÉCANIQUE ET LA CHALEUR.

380. Apparition de chaleur, accompagnant la disparition d'une force vive de translation. — Pour faire concevoir le lien qui existe entre les phénomènes du mouvement et les phénomènes de la chaleur, prenons d'abord un exemple particulièrement simple, celui d'un corps pesant, de masse m , tombant d'une hauteur h et venant rencontrer un plan horizontal, *parfaitement rigide*, comme un plan de marbre.

Si l'on choisit d'abord, pour cette expérience, un corps *parfaitement élastique*, comme une bille d'ivoire, on le voit, après qu'il a touché le sol, remonter suivant la verticale, à la hauteur h dont il était tombé, c'est-à-dire revenir à son point de départ, avec une vitesse nulle (52). Or, dans le mouvement de descente, le corps *reçoit un travail mgh* , celui de son poids ; en même temps, il *apparaît* dans le corps une *force vive* égale $\frac{1}{2}mv^2$, en désignant par v la vitesse dont il est animé à l'instant où il touche le plan de marbre. — Dans le mouvement d'ascension, la *force vive* $\frac{1}{2}mv^2$, que possédait le corps à l'origine de l'ascension, *disparaît*, mais le corps *produit un travail égal mgh* , en se déplaçant de bas en haut malgré son poids.

Si maintenant on répète la même expérience avec un corps *mou*, c'est-à-dire avec un corps qui, au lieu de rebondir comme la bille d'ivoire, reste appliqué sur le plan, il semble, au premier abord, qu'il y ait annulation de la force vive acquise pendant la chute, sans qu'il y ait production d'un travail correspondant. — Mais, dans tous les cas de ce genre, outre la déformation permanente qu'éprouve le corps, il se produit un nouveau phénomène, en apparence très différent des phénomènes du mouvement : il y a *dégagement de chaleur*. — Ainsi, quand une balle de fusil rencontre la plaque d'une cible, elle ne prend, après le choc, qu'une vitesse insensible en sens contraire ; mais il se produit un dégagement de chaleur qui la rend brûlante. — Les

boulets, quand ils sont tirés sur des plaques de blindage, éprouvent une élévation de température qui les porte à l'incandescence. — Dans l'exemple particulier que nous avons choisi, d'un corps perdant par le choc la force vive qui lui avait été communiquée par la simple action de son poids, le dégagement de chaleur n'est bien manifeste que pour des hauteurs de chute assez considérables : cependant il peut être constaté déjà pour des hauteurs de 5 à 4 mètres.

381. Notion générale de l'équivalence, entre une quantité de chaleur et une quantité de force vive ou de travail. — Les phénomènes du choc ne sont pas les seuls où l'on constate la *production* d'une certaine quantité de chaleur, accompagnant la *perte* d'une certaine quantité de force vive ou de travail.

Le *frottement* des corps les uns contre les autres, en diminuant à chaque instant la vitesse dont ils étaient animés, développe de la chaleur. — Ainsi, le frottement du moyeu d'une roue contre l'essieu, quand l'essieu n'est pas suffisamment enduit de matière grasse, arrive à rendre la roue brûlante, et peut même parfois y mettre le feu. — C'est par le frottement que nous amenons l'extrémité d'une allumette chimique à la température de combustion du phosphore.

A ces observations vulgaires il convient d'ajouter la belle expérience exécutée à Munich en 1798 par Rumford. Il fit construire un appareil dans lequel un cône d'acier trempé, mis en mouvement autour de son axe par deux chevaux, venait frotter contre les parois d'une cavité pratiquée dans une pièce de fer ; le tout était plongé dans une caisse de sapin, contenant environ 10 litres d'eau froide. Au bout de deux heures et demie, l'eau était en pleine ébullition (*).

On imite cette expérience, dans les cours, au moyen d'une disposition due à Tyndall. — Un tube métallique, rempli d'éther, T (fig. 250), est disposé de manière qu'on puisse lui imprimer un mouvement de rotation rapide autour de son axe, à l'aide de la roue R et de la courroie sans fin CC. Pendant ce mouvement, on serre fortement le tube entre deux plaques de bois P, P'. La chaleur dégagée par le frottement amène bientôt l'éther à une température telle, que le bouchon B est chassé par la force élastique de la vapeur.

La *compression* des gaz donne lieu à un dégagement de chaleur, que l'on utilise dans le briquet à air (fig. 17) ; dans ce cas, le dégagement de chaleur correspond au travail reçu par le gaz, quand on met le piston en mouvement.

Inversement, dans la machine à vapeur il y a *dépense* d'une certaine quantité de chaleur fournie par le combustible, et *production* d'une

(*) Rumford tira de cette expérience la conclusion, bien digne de remarque, si l'on se reporte à l'époque où elle fut formulée, que le dégagement de chaleur ne devait être qu'un phénomène de *mouvement* ; c'est la conclusion à laquelle sont arrivés également les savants modernes, comme nous le verrons plus loin.

certaine quantité de force vive communiquée aux organes de la machine, ou d'un travail effectué par ces organes,

En présence de ces résultats, on a dû se demander si, dans tous ces

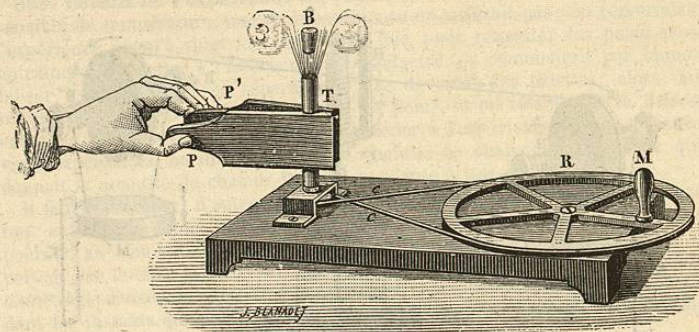


Fig. 250. — Expérience de Tyndall.

phénomènes divers, il n'existe pas un rapport constant entre la *quantité de chaleur* produite ou dépensée, et la *quantité de force vive ou de travail* dépensée ou produite. S'il en est ainsi, on en devra conclure qu'il y a *équivalence* entre une quantité déterminée de chaleur et une quantité déterminée d'énergie. — Nous allons indiquer quelques-unes des expériences qui ont permis d'arriver à ce résultat.

382. Transformation de travail en chaleur. — Expériences de Joule sur le frottement. — On doit à Joule, un grand nombre d'expériences, dans lesquelles on a employé une quantité déterminée de travail, pour produire, par le frottement de corps solides ou liquides les uns contre les autres, une quantité de chaleur que l'on mesurait avec précision.

Les parties principales de l'appareil sont les suivantes :

Deux masses de plomb M, M' (fig. 251), de poids égaux P que nous supposons d'abord évalués en kilogrammes-poids, suspendues à des cordons qui s'enroulent sur les axes B, B' de deux poulies, sont abandonnées sous l'action de la pesanteur ; elles impriment un mouvement de rotation à ces deux poulies, dont les gorges portent des fils qui viennent s'enrouler sur le cylindre de bois F et l'entraînent dans leur mouvement ; sur l'axe vertical autour duquel tourne le cylindre, sont montées des palettes de laiton, qui se meuvent au milieu d'une masse d'eau contenue dans un calorimètre. — Le frottement de l'eau, contre les palettes et contre la paroi du calorimètre, a pour effet de rendre le mouvement uniforme, au bout de quelques instants. A partir de ce moment, au travail moteur des poids P ne correspond aucun accroissement de force vive, mais une élévation de température de l'eau et

des pièces solides du calorimètre, c'est-à-dire la production d'une certaine quantité de chaleur.

On déterminait, au moyen d'un thermomètre très sensible, l'éléva-

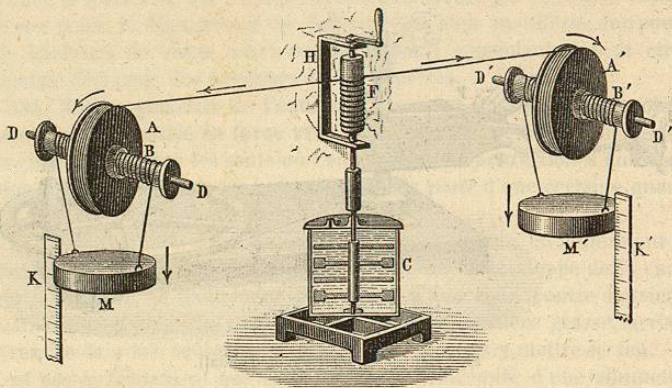


Fig. 251. — Expérience de Joule.

tion de température du calorimètre à la fin de l'expérience : on en déduisait, au moyen des chaleurs spécifiques connues, la quantité de chaleur produite Q , évaluée en grandes calories. — Le travail W , en kilogrammètres, qui avait été accompli pendant la chute des poids, était égal au produit de leur valeur $2P$ par la hauteur de chute H , évaluée en mètres.

La moyenne des expériences effectuées par Joule, en employant l'eau et le laiton, donna, pour le rapport $\frac{W}{Q}$, le nombre 424,9, ou sensiblement 425. — Joule fit d'ailleurs un grand nombre d'autres expériences, soit par la même méthode, en remplaçant l'eau par le mercure, et le laiton par le fer; soit par une méthode toute différente, en exerçant sur une masse d'eau une pression qui la forçait à traverser un diaphragme d'argile poreuse, et observant l'échauffement produit. Le nombre obtenu fut toujours sensiblement le même. — On peut donc affirmer que, dans les phénomènes de frottement, à la production d'une quantité de chaleur égale à une grande calorie, correspond la dépense d'une quantité de travail constante, et exprimée, en nombre rond, par 425 kilogrammètres.

Ce nombre 425 est ce que nous nommerons, dès maintenant, l'équivalent mécanique de la chaleur, ou ce qu'on pourrait appeler plus correctement l'équivalent mécanique de la grande calorie.

Remarque. La petite calorie équivaut alors à $0^{\text{me}},425$; et comme le kilogrammètre vaut 98 100 000 ergs, il en résulte que l'équivalent de la

petite calorie en ergs est $0,425 \times 98\,100\,000 = 4,17 \times 10^7$. En employant les unités pratiques C.G.S. l'équivalent de la petite calorie est donc de 4,17 joules.

383. Détails de l'expérience de Joule. — Pour obtenir un accroissement sensible de température, une seule expérience ne suffisait pas; on renouvelait l'expérience jusqu'à vingt fois. A chaque fois, pour remonter les poids sans entraîner les palettes à l'intérieur du calorimètre, on commençait par immobiliser le treuil F , et on séparait son axe de celui des palettes; alors, au moyen de la manivelle, on remontait les poids, et on rétablissait la liaison entre les deux parties de l'axe, pour procéder à l'expérience suivante. Après vingt expériences, on divisait par 20 la quantité de chaleur produite, ce qui donnait la quantité de chaleur Q correspondante à une seule expérience.

Il faut remarquer, d'autre part, que le travail $2P \times H$ n'avait pas été employé tout entier à produire l'échauffement du calorimètre. En effet, chacun des poids P , au moment où il venait rencontrer le sol avec une certaine vitesse v , perdait par le choc la force vive qu'il possédait. On observait donc, au moyen d'une règle divisée, la vitesse v du mouvement sensiblement uniforme des poids, dans les instants qui précédaient le choc; en remarquant que la masse totale des deux poids moteurs est $\frac{2P}{g}$, on connaissait la force vive perdue par le

choc, savoir $\frac{P}{g} v^2$. — Il fallait, en outre, retrancher de $2PH$ le travail w qui était employé à vaincre les frottements des pièces extérieures au calorimètre. Une dernière expérience faisait connaître cette quantité w : le treuil F étant détaché du calorimètre, on changeait le sens de l'enroulement du fil sur la poulie A' ; la masse M étant au bas de sa course, et la masse M au point K , on déterminait, par tâtonnements, quelle masse m il fallait ajouter du côté de M , pour que le poids additionnel p de cette masse communiquât au système la vitesse v observée dans les expériences principales: on avait évidemment $w = pH$. On avait donc, en définitive, une quantité de chaleur Q , équivalente au travail mécanique

$$W = 2PH - \frac{P}{g} v^2 - pH;$$

C'est la valeur de W ainsi calculée qui donnait, pour le rapport $\frac{W}{Q}$, ou pour l'équivalent mécanique de la grande calorie, 425 kilogrammètres (*).

384. Transformation de chaleur en travail. — Expériences de Hirn sur la machine à vapeur. — Considérons une machine à vapeur, au moment où elle est arrivée à une période d'activité régulière, c'est-à-dire où la température T maintenue dans la chaudière par l'action du foyer

(*) Nous avons supposé P , p , v , g et H évalués avec le système des unités de la Mécanique, et Q en grandes calories.

Dans le système d'unités C.G.S., le travail W sera évalué en ergs, Q en petites calories, H en centimètres, et les masses M , m , seront évaluées en grammes. Remplaçons P et p par leurs valeurs Mg et mg ; l'équation précédente devient :

$$W = 2MgH - Mv^2 - mgH.$$

On en déduit alors $\frac{W}{Q} = 41\,700\,000$. L'équivalent mécanique de la petite calorie est donc 41 700 000 ergs, ou 4,17 joules.

demeure constante, et où il en est de même de la température t maintenue dans le condenseur par l'injection de l'eau froide.

Si l'on prend un intervalle de temps déterminé, cinq minutes, par exemple, on peut, connaissant la capacité du cylindre où la vapeur arrive librement, et le nombre de coups de piston pendant ce temps, calculer la masse de vapeur m qui a passé dans le cylindre : on en déduit la quantité de chaleur Q qui a été employée pour transformer la masse m d'eau à la température t du condenseur, en vapeur à la température T de la chaudière (353). — D'autre part, la mesure de la quantité d'eau froide qu'on doit injecter dans le condenseur pendant le même temps, pour y maintenir une température constante t , donne la quantité de chaleur Q' qui est absorbée par cette eau (326), c'est-à-dire abandonnée par la vapeur qui s'y condense. — Or, on trouve que la quantité Q' est toujours moindre que Q , c'est-à-dire que *la vapeur ne rapporte pas au condenseur toute la chaleur qu'elle avait prise à la chaudière* (*).

La perte de chaleur $Q - Q'$ correspond au travail produit par la vapeur sur le piston. — Pour mesurer ce travail, Hirn déterminait directement les valeurs successives de la pression exercée par la vapeur, en un certain nombre de points de la course du piston. Or, en considérant des points suffisamment voisins les uns des autres, on pouvait supposer que le piston passait, de chacun d'eux au suivant, sous l'action d'une force constante (égale à la différence des pressions exercées à ce moment sur ses deux faces); le *travail* correspondant à ce petit déplacement s'obtenait en multipliant cette force par le déplacement lui-même. Une série de termes semblables donnait le travail pendant la durée de la course entière, et par suite le *travail total* W pendant l'intervalle de temps que l'on avait choisi.

Les expériences de Hirn ont fourni, pour valeur moyenne du quotient $\frac{W}{Q - Q'}$, le nombre 415. L'accord de ce résultat avec ceux de Joule est plus grand qu'on n'aurait pu l'espérer, quand on songe aux difficultés de pareilles expériences.

385. Conclusions relatives à l'équivalent mécanique de la chaleur. — Sans multiplier davantage les exemples de déterminations numériques de l'*équivalent mécanique* de la chaleur, nous considérons comme démontrées les deux conclusions suivantes :

1° Une certaine quantité de chaleur, consommée sans déterminer une élévation de température dans les corps auxquels elle a été fournie, produit une certaine quantité de travail, savoir 425 kilogrammètres par grande calorie.

2° Une certaine quantité de travail, dépensée sur un corps sans appa-

(*) Il est bien entendu qu'on a fait subir à ces nombres les corrections dues aux pertes de chaleur par rayonnement ou par conductibilité.

rition de force vive, et sans production d'un travail équivalent, produit dans le corps une certaine quantité de chaleur, savoir $\frac{1}{425}$ de grande calorie par kilogrammètre.

Cette *équivalence*, entre la chaleur dépensée ou produite, et le travail produit ou dépensé, doit être considérée comme un résultat expérimental, indépendant de toute hypothèse sur la nature de la chaleur. — Nous allons maintenant faire concevoir comment la *thermodynamique* ou *théorie mécanique de la chaleur* établit, entre les phénomènes de la chaleur et ceux du mouvement, une identité complète.

II. — INTERPRÉTATION MÉCANIQUE DES DIVERS EFFETS PRODUITS PAR LA CHALEUR.

386. La chaleur envisagée comme un mode de mouvement. —

Lorsqu'un corps, animé d'une certaine vitesse, vient rencontrer un obstacle rigide, on observe trois effets, qui semblent, au premier abord, très différents les uns des autres :

1° Le corps prend un *mouvement de translation*, dans une direction différente de sa direction primitive, mouvement dans lequel ne se retrouve, en général, qu'une partie de la force vive initiale.

2° Il se produit un *son*, c'est-à-dire un mouvement vibratoire, en vertu duquel certaines portions du corps oscillent autour de leur position d'équilibre. — On doit donc regarder une partie de la force vive primitive de translation comme ayant été employée à accomplir un travail, en écartant les points vibrants de la position où les actions moléculaires tendaient à la maintenir. Cet écart une fois produit, les actions moléculaires ramènent les points vibrants vers leurs positions relatives initiales, positions qu'ils dépassent en vertu de leur vitesse acquise, et ainsi de suite (*).

3° Enfin, il y a production de *chaleur*, et nous avons montré que, dans le cas actuel, cette production de chaleur correspond à la disparition d'une partie de la force vive de translation (380).

Les deux premiers effets sont des phénomènes de mouvement, dans chacun desquels se trouve une partie de la force vive primitive. — L'hypothèse fondamentale de la thermodynamique consiste à considérer le troisième effet, c'est-à-dire la production de chaleur, comme étant encore un phénomène de mouvement. — Dans cette théorie, on admet que les molécules des corps sont constamment animées de mouvements vibratoires, mais que, pour chaque corps, à mesure que la *température* s'élève, les mouvements vibratoires deviennent plus rapides, et par

(*) Ce mouvement, qui durerait indéfiniment dans le vide, s'éteint plus ou moins rapidement dans l'air, parce que la force vive des points vibrants se transmet progressivement à l'air.

suite la force vive de chaque molécule devient plus grande (*). — La somme des forces vives de toutes les molécules d'un corps constitue alors une fraction de l'énergie actuelle de ce corps (50) : suivant que sa température s'élève ou s'abaisse, on doit considérer l'énergie actuelle de ce corps comme augmentant ou diminuant.

Avant d'aller plus loin, remarquons que, s'il en est ainsi, le principe de l'équivalence entre le travail dépensé ou produit et la chaleur produite ou dépensée (385) est un cas particulier du principe des forces vives.

Dans la théorie moderne de la chaleur, fournir une certaine quantité de chaleur à un corps, c'est faire passer dans ce corps une certaine quantité d'énergie de mouvement. Nous allons analyser successivement, à ce point de vue, les effets divers que peut produire une addition de chaleur à un corps gazeux, solide ou liquide.

387. Effet d'une addition de chaleur, sur un gaz assujéti à conserver un volume constant. — Élévation de température. — Lorsqu'on fournit de la chaleur à une masse de gaz assujéti à conserver un volume constant, cette chaleur est employée tout entière à élever la température du gaz; ou, dans le langage de la théorie moderne, à accroître son énergie actuelle. — Il y a bien accroissement de la force élastique du gaz; mais il n'y a *aucun travail extérieur* effectué, puisque les parois de l'enceinte demeurent immobiles. On doit envisager cet accroissement de force élastique comme étant simplement une manifestation de l'accroissement de force vive des molécules.

Daniel Bernoulli a émis, dès 1758, une hypothèse sur la constitution des gaz, qui permet de se rendre compte de leurs diverses propriétés, et, entre autres, de celle dont il s'agit ici. — D'après Bernoulli, les molécules gazeuses, n'exerçant les unes sur les autres aucune action sensible, sont animées de mouvements rectilignes dans tous les sens, avec une vitesse constante pour chacune d'elles, et la valeur de cette vitesse dépend de la température elle-même. La *pression* qu'une masse gazeuse exerce sur la paroi qui la contient, est due à la succession des chocs de ses molécules, qui viennent s'y heurter pour prendre un mouvement en sens contraire. Dès lors, une addition de chaleur communiquée à une masse gazeuse, sous volume constant, en augmentant la vitesse des molécules, donne à la fois à ce gaz la propriété d'accuser une *température plus élevée*, ce qui est la manifestation ordinaire de l'accroissement de force vive intérieure, et la propriété d'exercer sur les parois de son enceinte une *pression plus grande*, résultant de ce que les molécules viennent choquer la paroi avec une vitesse plus grande, et à des intervalles plus fréquents.

(*) Ces vibrations *calorifiques* se distinguent des vibrations sonores par des caractères essentiels. — Les vibrations *sonores* consistent en des déformations périodiques qui se produisent inégalement dans les diverses parties du corps ébranlé : elles sont souvent assez prononcées pour être perceptibles à la vue : par l'intermédiaire de l'air, elles deviennent sensibles à notre oreille. — Les vibrations *calorifiques* affectent, d'une manière égale, tous les points d'un corps dans lequel la température est devenue uniforme; le mouvement périodique qui les constitue est inappréciable à la vue, et ne se manifeste au toucher que par la sensation spéciale de *chaleur*.

On dit quelquefois que toute la chaleur fournie au gaz reste à l'état de *chaleur sensible au thermomètre*. — Les expériences calorimétriques ont montré que pour échauffer 1 kilogramme d'air de 1°, sans variation de volume, il faut lui fournir 0°,1688.

388. Effets d'une addition de chaleur, sur un gaz soumis à une pression constante. — Élévation de température et production d'un travail extérieur. — Supposons maintenant que l'on fournisse de la chaleur à une masse gazeuse, dans des conditions telles que la *pression reste constante*.

Soit, par exemple, une masse d'air contenue dans un ballon de verre A (fig. 252), et séparée de l'air extérieur par une bulle

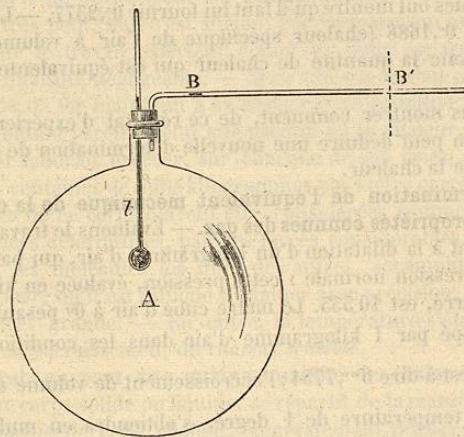


Fig. 252.

liquide B, introduite dans un tube horizontal. L'expérience constate à la fois : 1° un *accroissement de volume* du gaz, mesuré ici par le volume de la portion du tube BB' que la bulle liquide parcourt en se déplaçant; 2° une *élévation de température*, que l'on peut constater en plaçant un thermomètre sensible *t* au sein de la masse.

L'accroissement de volume du gaz correspond à un *travail extérieur* effectué, puisqu'il y a déplacement d'une portion de la paroi de l'enceinte, soumise extérieurement à la pression atmosphérique. Dans la disposition actuelle, la valeur de ce travail s'obtiendrait en multipliant la force avec laquelle l'atmosphère presse une surface égale à la section du tube, par la longueur du chemin parcouru par la bulle (*). —

(*) L'expression du *travail extérieur* peut encore être présentée sous une autre forme. — Soient *s* la section du tube, *b* la longueur BB' dont la bulle se déplace, et *p* la pression de l'atmosphère sur l'unité de surface. La force qui presse la surface de la bulle est $p \times s$; par suite, le travail accompli est $p \times s \times b$; mais, en remarquant que

L'élévation de température du gaz constitue un *accroissement de son énergie actuelle*.

Ces deux effets sont les seuls qui aient ici une valeur appréciable : l'étude attentive des phénomènes a montré que les molécules d'un gaz (supposé loin de son point de liquéfaction) ne sont assujetties les unes aux autres par aucune force intérieure, d'où résulte que l'écartement nouveau qu'elles éprouvent ne correspond à *aucun travail intérieur*, et par conséquent, à aucune variation de l'énergie potentielle (51). — C'est d'ailleurs ce que Joule a vérifié, par des expériences directes.

Pour échauffer 1 kilogramme d'air de 1°, en laissant varier son volume de manière que la pression reste constante, les expériences calorimétriques ont montré qu'il faut lui fournir 0°,2577. — L'excès de ce nombre sur 0°,1688 (chaleur spécifique de l'air à volume constant) représente donc la quantité de chaleur qui est équivalente au travail extérieur.

Nous allons montrer comment, de ce résultat d'expériences calorimétriques, on peut déduire une nouvelle détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur.

389. Détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur, au moyen des propriétés connues des gaz. — Évaluons le travail extérieur correspondant à la dilatation d'un kilogramme d'air, qui passe de 0° à 1° sous la pression normale : cette pression, évaluée en kilogrammes par mètre carré, est 10 333. Le mètre cube d'air à 0° pesant 1^{re},295, le volume occupé par 1 kilogramme d'air dans les conditions initiales est $\frac{1}{1,295}$, c'est-à-dire 0^{me},7754; l'accroissement de volume u , pour une

élévation de température de 1 degré, s'obtiendra en multipliant ce nombre par le coefficient de dilatation 0,00567; donc le travail extérieur, égal au produit $p \times u$ (note de la page précédente), est $10\,333 \times 0,7754 \times 0,00567$, ou 29^{me},5290. — D'après ce que nous venons de voir (588), à ce travail effectué correspond une dépense de chaleur de 0°,2577 — 0°,1688, ou 0°,0669. En divisant la valeur du travail par le nombre de calories, on obtient, en kilogrammètres, l'équivalent mécanique de la grande calorie, déterminé au moyen des propriétés de l'air, savoir

$$\frac{29,5290}{0,0669} = 425,68 \text{ (*)}$$

le produit $s \times b$ n'est autre chose que l'accroissement de volume u de la masse gazeuse, on peut représenter le travail extérieur par $p \times u$, c'est-à-dire qu'il est égal au produit du nombre qui représente la pression atmosphérique (évaluée en kilogrammes par mètres carrés), par l'accroissement de volume du gaz (évalué en mètres cubes). — On démontre que cette expression convient également au cas où l'accroissement de volume de gaz se fait par le déplacement des diverses parties de la paroi, dans diverses directions.

(*) Le même calcul, appliqué à d'autres gaz, conduit à des résultats numériques

390. Effets d'une addition de chaleur, sur les corps solides ou liquides. — Élévation de température et production de travail intérieur. — Lorsqu'on fournit une certaine quantité de chaleur à un corps *solide* ou *liquide*, elle produit, comme dans un gaz, des effets de diverses natures; mais les proportions relatives de chaleur qui correspondent à chacun de ces effets sont tout autres.

Fournissons à un bloc de fer, ayant pour volume 1 décimètre cube, la quantité de chaleur nécessaire pour élever sa température de 100 degrés. — Le coefficient de dilatation cubique du fer étant beaucoup moindre que celui des gaz, l'accroissement de volume est beaucoup plus petit qu'il ne serait pour un gaz; par suite, le *travail extérieur* effectué est très petit. Mais c'est surtout par comparaison avec le travail intérieur, que le travail extérieur actuel va nous apparaître comme comme une quantité négligeable. — Si en effet on voulait produire, sur ce même bloc de fer maintenu à sa température primitive, un accroissement de volume pareil à celui que produit ici la chaleur, l'expérience montre qu'il faudrait exercer, sur chacune de ses faces, une traction de plusieurs centaines de mille kilogrammes par mètre carré (*). Dès lors, les molécules de ce corps doivent être considérées comme maintenues à des distances déterminées, par des forces considérables. La chaleur, en écartant les molécules les unes des autres, accomplit donc ici un *travail intérieur*, qu'il est difficile d'évaluer avec précision, mais dont la valeur est très grande. — En outre, la température s'étant élevée de 100°, il y a eu accroissement de *chaleur sensible*.

En général, on peut dire qu'une quantité de chaleur déterminée fournie à un corps solide ou liquide, se répartit de la manière suivante : — 1° Une partie de cette chaleur, généralement négligeable, est employée à l'accomplissement du travail extérieur. — 2° Une autre partie est employée à faire varier l'écartement des molécules, malgré les forces moléculaires : elle produit ainsi un accroissement de l'énergie poten-

très voisins, tant qu'il s'agit de gaz très éloignés de leur point de liquéfaction, comme l'hydrogène, l'oxygène ou l'azote. — On trouve des nombres beaucoup plus grands, quand on l'applique à l'acide carbonique ou au protoxyde d'azote; on doit en conclure que, pour ces derniers gaz, le travail intérieur qui accompagne les changements de volume ne peut plus être regardé comme négligeable : les forces intérieures ne peuvent être considérées comme nulles que pour un gaz qui présenterait l'état parfait.

(*) Rappelons ici quelques faits bien connus, qui montrent la grandeur des effets mécaniques que peuvent produire les corps solides ou liquides, lorsqu'ils éprouvent des variations de température, dans des conditions où des obstacles résistants tendent à s'opposer à leurs variations de volume.

Des barres de fer, scellées à leurs deux extrémités dans la pierre, peuvent occasionner, par leurs variations de température, des ruptures dans les édifices les plus solides. — Si l'on ne ménageait pas des intervalles entre les rails successifs d'une voie ferrée, les chaleurs de l'été arriveraient à produire des déformations de la voie.

Lorsqu'un vase de verre a été entièrement rempli d'un liquide, et hermétiquement bouché, il suffit d'une élévation de température de quelques degrés pour briser le vase, alors même qu'il présente une grande résistance.

tielle (51); c'est la partie la plus considérable. — 3° La partie complémentaire, restée à l'état de chaleur sensible au thermomètre, produit un *accroissement de l'énergie actuelle*.

391. Passage de l'état solide à l'état liquide. — Chaleur de fusion. — Quand un corps solide atteint une température déterminée, une nouvelle addition de chaleur le fait passer, en totalité ou en partie, à l'état liquide; c'est le phénomène de la fusion.

Or, de ce que la température reste constante pendant tout le temps que dure la fusion, on doit conclure que l'énergie actuelle n'a subi aucun accroissement. — Quant au travail extérieur, il est négligeable, lorsque le corps est placé dans l'atmosphère, eu égard à la petitesse de la variation de volume (*).

La chaleur fournie est donc presque entièrement employée à un *travail intérieur* résistant, c'est-à-dire à un *accroissement d'énergie potentielle*: malgré les actions moléculaires, les molécules ont été amenées dans des positions relatives différentes de celles qu'elles avaient à l'état solide, à la même température. — Cette chaleur absorbée a d'abord reçu le nom de *chaleur latente*, pour indiquer qu'elle n'est pas sensible au thermomètre: il est préférable de l'appeler *chaleur de fusion*.

392. Passage de l'état liquide à l'état de vapeur. — Chaleur de vaporisation. — Un liquide auquel on fournit des quantités de chaleur graduellement croissantes, et dont la surface est soumise à une pression invariable, atteint en général une température à laquelle il entre en ébullition: à partir de ce moment, la température reste constante, toute la chaleur fournie étant employée à convertir le liquide en vapeur. — Voyons comment cette chaleur est utilisée.

Et d'abord, la température ne s'élevant pas, l'énergie actuelle du corps demeure constante.

Quant au *travail extérieur* effectué, il n'est pas négligeable comme il l'était dans le cas de la fusion, puisque la vapeur acquiert un volume bien supérieur à celui du liquide. Ce travail doit donc correspondre à une partie notable de la chaleur absorbée par le corps, pendant l'ébullition. — L'autre partie de la chaleur fournie correspond à un *travail intérieur* résistant; malgré les actions moléculaires qui s'exerçaient dans le liquide, les molécules ont été amenées à des distances telles, que leurs actions réciproques deviennent négligeables: *l'énergie potentielle a donc augmenté* par le passage à l'état de vapeur.

(*) Au moment de la fusion, la variation de volume est d'ailleurs tantôt un accroissement, comme cela a lieu pour la plupart des corps, tantôt une diminution, comme cela a lieu pour l'eau et pour quelques autres substances. Le travail extérieur, dû au déplacement de la surface qui supporte les pressions extérieures, est donc tantôt résistant, tantôt moteur: il est toujours négligeable dans les circonstances ordinaires. Quand on lui donne des valeurs assez grandes, en augmentant la pression extérieure, les phénomènes deviennent plus complexes: il y a à la fois variation dans la quantité de chaleur nécessaire pour produire la fusion, et modification de la température de fusion, comme on l'a vu (261).

Si l'on prend comme exemple l'ébullition de l'eau, on peut montrer, par un calcul simple, que la *chaleur de vaporisation*, c'est-à-dire la quantité de chaleur employée à la transformation du liquide en vapeur, correspond, pour $\frac{1}{13}$ de sa valeur, à l'accomplissement du travail extérieur, contre la pression atmosphérique; pour les $\frac{12}{13}$, à l'accomplissement du travail intérieur, contre les actions moléculaires qui s'exerçaient dans le liquide (*).

III. — TRANSFORMATIONS DE L'ÉNERGIE.

393. Transformations de l'énergie, dans les phénomènes physiques.

— Lorsque deux corps, dans un état physique déterminé, sont mis en présence, il peut arriver qu'ils passent à un autre état. Si, pendant la durée du phénomène, les corps ont été soustraits à toute action extérieure (chaleur, électricité, lumière...), s'ils n'ont produit ou reçu aucun travail, l'énergie totale du système doit demeurer constante, l'énergie de l'un des corps augmentant au détriment de l'énergie de l'autre. — Envisageons, à ce point de vue, quelques-uns des phénomènes physiques les plus simples.

1° Considérons un phénomène de *fusion*, et soit, par exemple, 1 kilogramme de glace à 0°, que l'on plonge dans une masse d'eau chaude, à une température suffisante pour déterminer la fusion de la masse de glace tout entière. — La glace fond sans élévation de température, c'est-à-dire que cette eau n'éprouve aucun accroissement d'énergie actuelle. Toute la chaleur que la glace absorbe est employée à effectuer le travail intérieur, correspondant au déplacement de ses molécules par rapport à leurs positions moyennes primitives (591): l'eau de fusion acquiert donc simplement un *accroissement d'énergie potentielle*. — Quant à la masse d'eau chaude dans laquelle la glace est plongée, on y constate: 1° un abaissement de température, c'est-à-dire une *diminution d'énergie actuelle*; 2° une diminution de volume, à laquelle correspond, puisque les forces intérieures sont motrices, une *diminution d'énergie potentielle*. La somme de ces deux quantités constitue la *dimi-*

(*) Voici ce calcul. — En tenant compte de la densité de la vapeur d'eau, par rapport à l'eau liquide, on trouve facilement que le volume occupé par 1 kilogramme de vapeur à 100° est égal à environ 1700 fois celui de l'eau qui l'a produite (plus exactement 1699 fois). — Pour obtenir le travail *extérieur* résistant, il suffit de multiplier la pression p (exprimée en kilogrammes par mètre carré), savoir 10 353, par l'augmentation de volume u exprimé en mètres cubes, savoir 1^m,699; on trouve 17 336 kilogrammètres. Pour évaluer la *quantité de chaleur* que représente ce travail extérieur, il suffit de diviser ce nombre par l'équivalent mécanique 425, ce qui donne 41 calories: en comparant cette quantité à la quantité totale de chaleur absorbée par l'eau pendant la vaporisation, 357 calories, on voit qu'elle en est environ la treizième partie. — Le reste de la chaleur fournie pendant l'ébullition, c'est-à-dire 496 calories (ou les $\frac{12}{13}$ de la quantité totale), représente le travail *intérieur* des actions moléculaires qui s'exerçaient dans le liquide.