

594. **Machines à gaz. — Machine Lenoir et machine Hugon.**

— On désigne sous le nom de *machines à gaz*, des machines où le mouvement est produit par la combustion d'un mélange gazeux, combustion s'effectuant dans le cylindre lui-même. — Le seul mélange qui ait été vraiment utilisé jusqu'ici est le mélange de 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 violente explosion, 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.

— Ces machines sont à double effet ; la plupart des pièces accessoires sont semblables à celles des machines à vapeur.

Il nous reste à indiquer comment on obtient l'inflammation du mélange gazeux, au moment précis où elle doit avoir lieu. — Dans la *machine Lenoir*, une étincelle électrique, produite par une petite bobine de Ruhmkorff (livre III), montée avec deux ou trois éléments de Bunsen (*ibid.*), jaillit dans l'intérieur du cylindre. — Dans la *machine Hugon*, l'inflammation est produite par des becs de gaz, installés dans deux petites 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 régulier, devant se continuer longtemps, et à poste fixe. — 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. Pour ce genre d'usage, on conçoit que, tout compte fait, elles puissent offrir un avantage considérable sur celles où le foyer doit être allumé longtemps avant que la machine puisse être mise en action.

(*) 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

595. **Apparition de chaleur, accompagnant la disparition d'une force vive de translation.** — Pour faire concevoir la relation générale 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 remonter, suivant la verticale, à la hauteur même dont il était tombé, c'est-à-dire revenir à son point de départ, où il arrive avec une vitesse nulle. Envisageons séparément chacun de ces deux mouvements en sens contraire. — Dans le mouvement de descente, le corps a *acquis*, au moment où il rencontre le plan rigide, une certaine vitesse v , et par suite une certaine force vive $\frac{1}{2}mv^2$. Cette force vive est égale, comme nous l'avons vu (25), au travail moteur de la force qui le sollicite, c'est-à-dire de son poids p ; l'expression de ce travail est ph : c'est un travail *dépensé*. — Dans le mouvement d'ascension, le corps est d'abord renvoyé par le plan rigide, avec une vitesse égale et contraire à la vitesse primitive : il possède donc, à l'origine de ce mouvement de bas en haut, une force vive $\frac{1}{2}mv^2$, égale à celle qu'il possédait au moment de rencontrer ce plan (*). Or, il perd successivement toute cette force vive, en parcourant de bas en haut le même chemin h , puisque sa vitesse redevient nulle lorsqu'il arrive au

(*) L'expression de la force vive ne contenant que le *carré* de la vitesse, sa valeur est indépendante du signe de la vitesse elle-même.

haut de sa course; à cette *perte de force vive*, correspond la *production d'un travail*, qui est encore représenté, en valeur absolue, par *ph*, c'est-à-dire égal en grandeur à celui qui avait été dépensé pendant la chute. — En résumé, pendant la descente, *dépense de travail* et *production d'une force vive correspondante*; pendant l'ascension, *dépense de cette force vive* et *production d'un travail correspondant*.

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. — 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 de mouvement. Toutes les fois qu'un corps, rencontrant un obstacle rigide avec une certaine vitesse, possède, après la rencontre, une vitesse nulle, ou simplement une vitesse moindre que sa vitesse primitive, il y a un *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'abord, 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 3 à 4 mètres.

596. 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 en frottant vivement l'extrémité d'une tige de bois dans la cavité d'un autre morceau de bois, que les peuples sauvages parviennent à allumer du feu, et c'est par un procédé analogue 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 en 1798 par Rumford, dans la fonderie de canons de Munich qu'il dirigeait. Frappé de la haute température qui se produit dans le

forage du bronze, 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 M. Tyndall. — Un tube métallique rempli d'eau T (fig. 290) 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

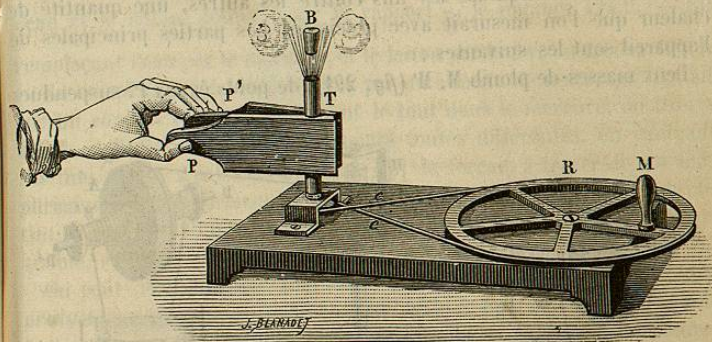


Fig. 290. — Expérience de Tyndall.

deux plaques de bois P, P'. La chaleur dégagée par le frottement amène bientôt l'eau à une température telle, que le bouchon B est chassé par la force élastique de la vapeur.

Les phénomènes de *compression*, et en particulier la compression des gaz, donnent lieu à un dégagement de chaleur, que l'on utilise dans le briquet à air (fig. 14); dans ce cas, le dégagement de chaleur est le résultat de la dépense de travail qu'il a fallu effectuer pour mettre le piston en mouvement.

Inversement, l'observation d'une machine à vapeur en activité montre la *dépense* d'une certaine quantité de la chaleur produite par le combustible, s'accompagnant d'une *production* de force vive communiquée aux organes de la machine, ou d'un travail effectué.

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

(*) 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.

phénomènes, de natures diverses en apparence, 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 de force vive ou de travail. — Nous allons indiquer quelques-unes des expériences qui ont permis d'arriver à ce résultat.

597. Transformation de travail en chaleur. — Expériences de M. Joule sur le frottement. — On doit à M. Joule, de Manchester, 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. 291), de poids égaux P, suspendues

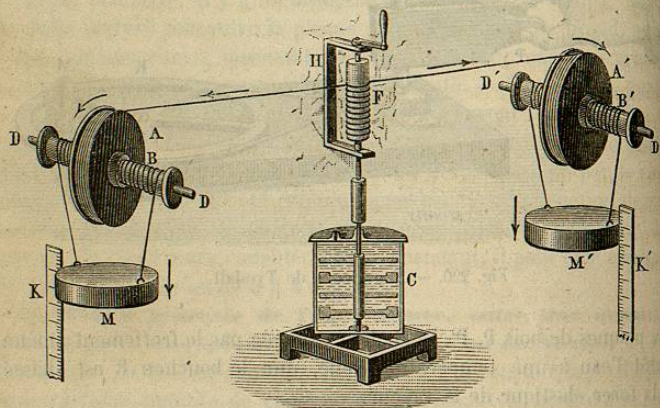


Fig. 291. — Expérience de Joule.

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 diminuer la vitesse que les poids moteurs tendraient à imprimer au système : à cette perte de force vive, correspond une élévation de température de l'eau et des pièces solides qui sont en contact avec elle, c'est-à-dire la production d'une certaine quantité de chaleur.

On évaluait la quantité de chaleur produite, en déterminant, au moyen d'un thermomètre très sensible, la température du calorimètre avant l'expérience, et ensuite la température du calorimètre après qu'on avait laissé descendre les poids depuis le point le plus haut de leur course jusqu'au sol du laboratoire. L'élévation de température du liquide et des pièces solides permettait de déterminer, au moyen des chaleurs spécifiques connues, la quantité de chaleur produite Q, évaluée en calories (*). — Le travail T, effectué pendant la chute des deux poids, était égal au produit de leur valeur totale 2P, évaluée en kilogrammes, par la hauteur de chute H, évaluée en mètres (**).

La moyenne des expériences effectuées par M. Joule, en employant l'eau et le laiton, donna, pour le rapport $\frac{T}{Q}$, le nombre 424,9. — En remplaçant l'eau par le mercure, et le laiton par le fer, on trouva 425,4. — En remplaçant l'arbre à palettes par un anneau de fonte, qui frottait sur un cône de fonte, et plongeant le tout dans le mercure, on trouva 426,4. — Enfin, dans des expériences toutes différentes, en exerçant sur une masse d'eau une pression qui la forçait à traverser un diaphragme d'argile poreuse, et observant l'échauffement produit, on obtint le nombre 425,0. — La concordance entre ces nombres est remarquable, eu égard aux difficultés pratiques d'expérimentation.

On peut donc affirmer que, dans les phénomènes de frottement, à la production d'une quantité de chaleur égale à une calorie, correspond la dépense d'une quantité de travail constante, et exprimée, en nombre rond, par 425 kilogrammètres (***) .

(*) Pour rendre l'accroissement de température plus sensible, on renouvelait l'expérience jusqu'à vingt fois. — Les frottements étaient augmentés par une disposition qui consistait à placer, dans le liquide, des cloisons verticales fixes, portant des ouvertures simplement suffisantes pour laisser passer les palettes mobiles.

(**) Il faut remarquer que ce 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 de règles divisées, 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 con-

naissait la force vive perdue par le choc, savoir $\frac{P}{g}v^2$. En outre, on avait déterminé, par une expérience spéciale, la valeur du travail qui était employé à vaincre les frottements des pièces extérieures au vase calorimétrique, dans les conditions mêmes de l'expérience principale : désignons par t ce travail, dont la valeur était d'ailleurs toujours assez faible. On voit que, pour avoir l'expression définitive du travail T qui avait été employé à produire la quantité de chaleur Q, il suffisait de retrancher, du travail total des poids $2P \times H$, la somme de la force vive perdue par le choc sur le sol $\frac{P}{g}v^2$ et du travail t.

(***) M. Favre et M. Hirn ont obtenu, par des procédés tout différents, des nombres qui s'écartent peu de ceux de M. Joule.

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 calorie*. — Il nous reste à vérifier que la valeur de ce nombre reste encore la même dans des phénomènes d'un ordre inverse.

398. Transformation de chaleur en travail. — Expérience de M. 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 maintenue dans la chaudière par l'action du foyer demeure constante, et où il en est de même de la température maintenue dans le condenseur par l'injection de l'eau froide.

La mesure des dimensions du cylindre permet de connaître la quantité de vapeur qu'il reçoit, pour un nombre déterminé de coups de piston : par suite, connaissant aussi la température de la vapeur dans la chaudière, on en déduit la quantité de chaleur Q qui est consommée pendant un temps donné, pendant plusieurs minutes par exemple, pour transformer en vapeur l'eau empruntée au condenseur (364). — 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, donne la quantité de chaleur Q' qui est absorbée par cette eau (342), 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*. Ce résultat est facile à concevoir, d'après les notions qui précèdent. En effet, dans son trajet entre la chaudière et le condenseur, la vapeur a agi sur le piston et a produit ainsi une certaine quantité de travail : dès lors, la *perte de chaleur* qu'elle éprouve est le résultat d'une transformation de chaleur en travail mécanique. — L'expérience fournit la valeur de cette perte de chaleur, pendant le temps considéré : elle est exprimée par la différence $Q - Q'$ (*).

Il reste à évaluer la *quantité de travail* effectué par la vapeur. C'est ce qu'a fait M. Hirn, de Colmar, en opérant sur une machine à vapeur en activité. — Il a dû, pour cela, mesurer directement les valeurs successives de la pression exercée par la vapeur, en divers points de la course du piston (il employait, pour effectuer ces mesures, un appareil connu sous le nom d'indicateur de Watt). Or, en considérant un certain nombre de points suffisamment voisins les uns des autres, on peut supposer que le piston passe, de chacun d'eux au suivant, sous l'action d'une force constante (égale à la différence des pressions qui s'exercent à ce moment sur ses deux faces) ; le *travail* correspondant à ce petit déplacement s'obtient en multipliant cette force par le déplacement lui-

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

même. Une série de termes semblables donne le travail pendant la durée de la course tout entière, et par suite le *travail total* T , évalué en kilogrammètres, pendant l'intervalle de temps que l'on aura choisi pour l'expérience.

Les expériences de M. Hirn ont fourni, pour valeur moyenne du quotient $\frac{T}{Q - Q'}$, le nombre 413 : résultat dont l'accord avec ceux de M. Joule (397) est plus grand qu'on n'aurait pu l'espérer, quand on songe aux difficultés de pareilles expériences.

399. 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 considérerons 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 calorie ;

2° Une certaine quantité de travail, dépensée sans effectuer aucun travail mécanique apparent, produit une certaine quantité de chaleur, savoir $\frac{1}{425}$ de 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 idée théorique sur la nature de la chaleur elle-même. — Nous allons maintenant chercher à faire concevoir comment la *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.

400. La chaleur envisagée comme un mode de mouvement.

— Pour faire concevoir comment la chaleur a pu être envisagée comme un mode de mouvement, reprenons l'énumération des phénomènes qui se produisent 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 du mouvement primitif.

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 un *dégagement de chaleur*, et nous avons montré que, dans le cas actuel, ce dégagement de chaleur correspond à la disparition d'une partie de la force vive de translation (595).

Les deux premiers effets sont des effets de mouvement, dans chacun desquels se trouve une partie de la force vive primitive. — L'hypothèse qui sert de base à la théorie mécanique de la chaleur consiste à considérer le troisième effet, c'est-à-dire l'effet produit par le dégagement 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 suite la force vive qui correspond à ces vibrations devient plus grande (**).

Avant d'aller plus loin, nous ferons remarquer que, s'il en est ainsi, l'*équivalence* entre la quantité de travail dépensée et la quantité de chaleur produite devient une *conséquence nécessaire* du principe de la *conservation de la force vive*, principe qu'un grand nombre d'esprits éminents considèrent comme un axiome.

Nous allons montrer maintenant comment on peut interpréter, en se plaçant à ce point de vue, les effets physiques que produit la chaleur sur les divers corps.

401. Effets de la chaleur sur un gaz soumis à une pression constante. — Travail extérieur. — Variation de la chaleur sensible. — Supposons que l'on fournisse de la chaleur à une masse

(*) 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 aux molécules de l'air, qui ne peuvent acquérir de vitesse qu'à la condition d'emprunter de la force vive au corps vibrant lui-même.

(**) Ces vibrations *calorifiques*, que l'on pourrait être tenté d'assimiler aux vibrations sonores, s'en distinguent par des caractères essentiels. — Les vibrations *sonores* consistent, comme nous le verrons, en des déformations périodiques qui se produisent dans certaines parties du corps ébranlé : ces déformations sont souvent assez prononcées pour être perceptibles à la vue ou au toucher; en imprimant à l'air des déplacements correspondants, elles deviennent sensibles à notre oreille, par la transmission des vibrations aux nerfs acoustiques. — 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 toujours un mouvement intime, inappréciable à la vue, et ne se manifestant au sens du toucher que par la sensation spéciale que nous désignons par l'expression de *chaleur*.

gazeuse, dans des conditions telles que la *pression supportée par le gaz demeure constante*.

Soit, par exemple, une masse d'air contenue dans un ballon de verre A (fig. 292), et séparée de l'air extérieur par une bulle de 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. Ces deux effets sont ici simultanés; examinons séparément chacun d'eux.

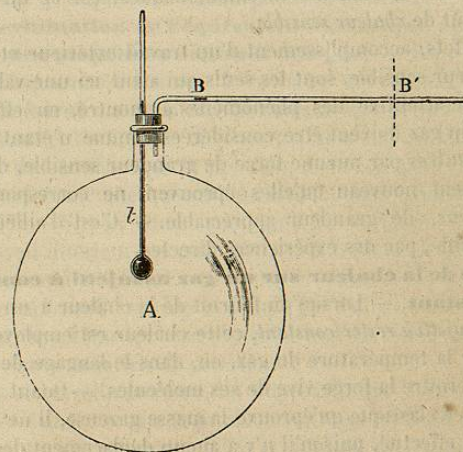


Fig. 292.

1° L'*accroissement de volume* du gaz détermine le déplacement d'une partie de la paroi de l'enceinte, qui est soumise extérieurement à la pression atmosphérique. Il y a donc un travail accompli; c'est ce qu'on nomme le *travail extérieur*. — Dans la disposition actuelle, la valeur de ce travail, en kilogrammètres, s'obtiendrait en multipliant la pression de l'atmosphère sur une surface égale à la section du tube (pression évaluée en kilogrammes), par la longueur du chemin parcouru par la bulle (longueur évaluée en mètres) (**).

(*) Nous considérons comme négligeable l'augmentation de volume due à la dilatation du verre. Il serait facile d'en tenir compte, comme nous l'avons fait dans un grand nombre de cas; il s'agit d'ailleurs ici, comme on va le voir, non pas d'une expérience destinée à fournir des mesures précises, mais d'une disposition qui nous permette d'exposer, d'une manière simple, les résultats obtenus par des méthodes plus compliquées.

(**) 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

2° L'élévation de température du gaz, au point de vue de la théorie actuelle, consiste en un accroissement de force vive dans les mouvements de ses molécules. — On peut évaluer, en calories, la quantité de chaleur correspondante. En effet, les expériences calorimétriques ont montré que, pour échauffer 1 kilogramme d'air de 1 degré (sans variation de volume), il faut lui fournir $0^{\text{cal}},1688$. Dans le cas actuel, il suffira donc de multiplier ce nombre par le poids de l'air et par l'élévation de température, pour obtenir la quantité de chaleur qui correspond uniquement à la variation de température du gaz. — Cette quantité de chaleur, qui donne au gaz la propriété d'exercer une action nouvelle sur les instruments thermométriques, est ce qu'on nomme l'accroissement de *chaleur sensible*.

Ces deux effets, accomplissement d'un travail extérieur et accroissement de chaleur sensible, sont les seuls qui aient ici une valeur appréciable. L'étude attentive des phénomènes a montré, en effet, que les molécules d'un gaz doivent être considérées comme n'étant assujetties les unes aux autres par aucune force de grandeur sensible, d'où résulte que l'écartement nouveau qu'elles éprouvent ne correspond à aucun travail intérieur, de grandeur appréciable. — C'est d'ailleurs ce que M. Joule a vérifié, par des expériences directes.

402. Effets de la chaleur sur un gaz assujetti à conserver un volume constant. — Lorsqu'on fournit de la chaleur à un gaz dont le volume est assujetti à rester constant, cette chaleur est employée uniquement à élever la température du gaz, ou, dans le langage de la théorie actuelle, à accroître la force vive de ses molécules. — Quant à l'accroissement de force élastique qu'éprouve la masse gazeuse, il ne représente pas un travail effectué, puisqu'il n'y a aucun déplacement des parois de l'enceinte. On doit l'envisager comme constituant simplement une manifestation de l'accroissement de force vive des molécules, manifestation différente de l'action exercée sur un thermomètre (*).

pression de l'atmosphère sur l'unité de surface. La pression de l'atmosphère sur la surface de la bulle est $p \times s$; par suite, le travail accompli est $p \times s \times b$; mais le produit $s \times b$ n'est autre chose que le volume de l'espace cylindrique qui représente l'accroissement de volume de la masse gazeuse : si donc on représente par u cet accroissement, 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 de l'atmosphère sur l'unité de surface (pression évaluée en kilogrammes), par l'accroissement de volume du gaz (volume 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.

(*) Daniel Bernoulli a émis, dès 1738, 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

Dès lors, toute la chaleur fournie au gaz restant ici à l'état de *chaleur sensible*, on comprend que la quantité de chaleur nécessaire, pour produire sur une même masse de gaz une même élévation de température, doit être moindre que dans le cas où il y a en même temps accroissement de volume, c'est-à-dire production d'un travail extérieur. — Ainsi s'explique, dans la théorie actuelle, ce fait que la chaleur spécifique d'un gaz à volume constant est plus petite que sa chaleur spécifique à pression constante.

Nous allons montrer maintenant comment la comparaison des valeurs numériques de ces deux chaleurs spécifiques conduit à une nouvelle détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur.

403. Détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur, au moyen des propriétés connues des gaz. — Pour échauffer de 1 degré 1 kilogramme d'air, sans faire varier son volume, on a vu (355) qu'il faut lui fournir une quantité de chaleur représentée par $0^{\text{cal}},1688$. — Pour échauffer de 1 degré un kilogramme d'air, en laissant son volume varier de manière que sa pression reste constante, on a vu (352) qu'il faut lui fournir une quantité de chaleur plus grande, représentée par $0^{\text{cal}},2377$. — Si l'on admet que, dans les variations de volume de l'air, le travail intérieur est nul (401), la différence $0^{\text{cal}},0689$ entre les deux nombres qui précèdent représente la quantité de chaleur qui est équivalente au travail extérieur accompli par l'air, quand il prend l'accroissement de volume qui correspond à une élévation de température de 1 degré, sans variation de pression.

Évaluons ce travail extérieur, en supposant que la température initiale de l'air soit 0° , et que la pression soit égale à celle d'une colonne de mercure de 760 millimètres. La pression p sur l'unité de surface, ou sur 1 mètre carré, est 10 335 kilogrammes. D'autre part, le poids spécifique de l'air par rapport à l'eau étant 0,001 295, le volume occupé par 1 kilogramme d'air dans les conditions initiales, volume évalué en

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.

Cette hypothèse de Bernoulli, qui s'introduit dans le calcul avec une extrême simplicité, rend compte de toutes les propriétés des gaz, loi de Mariotte, loi de Gay-Lussac, etc. Elle peut donc être considérée comme ayant une grande valeur, mais elle n'est nullement nécessaire à la théorie mécanique de la chaleur : cette théorie subsisterait tout entière, alors même que certains faits viendraient rendre inadmissible l'hypothèse de Bernoulli sur la constitution des gaz.

mètres cubes, est $\frac{0,001}{0,001295}$, c'est-à-dire $0^{\text{me}},7754$; l'accroissement de volume u , pour une élévation de température de 1 degré, s'obtiendra en multipliant ce nombre par le coefficient de dilatation 0,00367; donc le travail extérieur, égal au produit $p \times u$ (seconde note de la page 337), est $10\,333 \times 0,7754 \times 0,00367$, ou 29,3290. — En divisant la valeur de ce travail par la quantité de chaleur qui a été dépensée pour le produire, on obtient

$$\frac{29,3290}{0,0689} = 425,68.$$

Telle est la valeur numérique de l'équivalent mécanique de la chaleur, déterminée au moyen des propriétés de l'air (*).

404. Effets de la chaleur sur les corps solides ou liquides. — Travail intérieur, accompagnant la variation de volume. — 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.

Prenons comme exemple un bloc de fer, ayant pour volume un décimètre cube, auquel on fournira 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*, qui correspond au déplacement de la surface pressée par l'atmosphère, est beaucoup plus petit. Mais c'est surtout par comparaison avec le travail intérieur, que le travail extérieur actuel va nous apparaître comme une quantité sensiblement négligeable. — Si l'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. Dès lors, les molécules de ce corps, bien loin d'être sans action sensible les unes sur les autres comme celles des gaz, doivent être considérées comme maintenues à des distances déterminées, par des forces consi-

(*) Le même calcul, appliqué à d'autres gaz, conduit à des résultats numériques 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 des gaz comme l'acide carbonique, le protoxyde d'azote, que la compression peut arriver à liquéfier. 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. — En d'autres termes, les actions moléculaires ne peuvent être considérées comme nulles, que pour un corps qui présenterait l'état gazeux parfait: c'est une propriété qui n'appartient peut-être rigoureusement à aucun des gaz sur lesquels portent nos expériences, mais dont ces gaz s'approchent d'autant plus qu'ils sont plus éloignés de leur point de liquéfaction.

dérables. 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 extrêmement grande. — En outre, la masse de fer ayant maintenant acquis la propriété d'exercer sur le thermomètre une action différente de son action primitive, il y a eu accroissement de *chaleur sensible*, c'est-à-dire accroissement des forces vives de ses molécules.

Les mêmes remarques sont applicables à un corps solide ou liquide quelconque. On peut dire qu'une quantité de chaleur déterminée, fournie à l'un de ces corps, se répartit de la manière suivante: — 1° Une partie de cette chaleur est employée à l'accomplissement du travail extérieur; mais ce n'est là qu'une quantité généralement négligeable, dans les conditions ordinaires. — 2° Une autre partie est employée à accomplir un *travail intérieur*, c'est-à-dire à produire l'écartement des molécules; c'est la partie la plus considérable. — 3° La partie complémentaire reste à l'état de *chaleur sensible*: c'est l'équivalent calorifique de l'accroissement des forces vives des molécules (*).

405. 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 qu'aucune partie de la chaleur fournie ne reste à l'état de *chaleur sensible*. Par suite, pendant la fusion, la somme des forces vives moléculaires du corps n'est pas modifiée. — 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 (**).

(*) 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. — Les feuilles de plomb ou de zinc, qui sont employées pour les toitures, arrachent les clous qui les fixent, lorsque le froid de l'hiver les fait contracter: on est obligé de les laisser libres par une partie de leur contour, en les superposant simplement par leurs bords, comme des tuiles, pour permettre à la dilatation de se produire. — On comprend de même la nécessité de ménager des intervalles entre les rails successifs d'une ligne de chemin de fer; si ces intervalles ne sont pas suffisants, les chaleurs de l'été arrivent à produire des déformations de la voie, qui paraissent avoir été la cause déterminante de certains accidents.

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.

(**) 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