fait tourner à gauche le plan de polarisation, tandis que le *sucre de canne*, toutes choses égales d'ailleurs, le fait tourner à droite, et cependant les deux substances sont identiques au point de vue de la composition chimique.

3° *Loi de Biot. — Pouvoir rotatoire moléculaire.* — La rotation imprimée au plan de polarisation par une même substance en dissolution dépend, — toutes choses égales d'ailleurs, — du degré de concentration de cette dissolution, ainsi que de l'épaisseur de la couche liquide traversée par la lumière. Biot a déterminé la loi de ces variations.

La rotation du plan de polarisation produite par une solution active est proportionnelle au poids de la substance dissoute dans l'unité de volume du liquide neutre et à la longueur du tube dans lequel on l'observe.

Par exemple, l'expérience prouve que, en opérant sur du sucre sec, il faut en dissoudre $16^{gr},31$ dans $0^{l},1$ d'eau et observer la dissolution dans un tube de 20 centimètres pour obtenir la même rotation qu'avec une plaque de quartz de 1 millimètre d'épaisseur.

Soit donc V le volume d'une solution contenant un poids P de la substance active, le poids dissous dans l'unité de volume sera $\frac{P}{V}$; si l'on observe cette dissolution dans un tube de longueur L, la rotation α imprimée au plan de polarisation sera, d'après la loi de Biot, proportionnelle à $\frac{P}{V}$ L. En désignant par ρ un coefficient qui est constant pour une même substance dissoute, mais qui est variable d'une substance à l'autre, on aura comme expression algébrique de la loi de Biot

$$\alpha = \rho \frac{PL}{V}.$$

Le coefficient ρ s'appelle le *pouvoir rotatoire moléculaire* de la substance active. On voit, d'après la formule, qu'il représente la rotation que la substance active fait subir au plan de polarisation d'une certaine couleur, lorsque l'unité de poids (P = 1) de la substance est dissoute dans l'unité de volume (V = 1) du liquide neutre et qu'on l'observe dans un tube ayant l'unité de longueur (L = 1).

Valeur numérique de ρ. — La valeur numérique du *pouvoir rotatoire moléculaire* d'une substance active dépend donc à la fois de la couleur prise pour type, ainsi que des unités de longueur, de volume et de poids adoptées.

La saccharimétrie étant l'opération la plus usuelle de ce genre de recherches, il convient de lui emprunter ses unités[1]. On rapportera donc les rotations α aux *rayons jaunes*, en prenant pour unité de poids le *gramme*, pour unité de volume le *décilitre* et pour unité de longueur le *décimètre*.

On définira alors le *pouvoir rotatoire moléculaire* de la manière suivante : c'est la rotation imprimée aux vibrations des rayons jaunes par une dissolution qui contiendrait 1 gramme de substance active par décilitre et qu'on observerait dans un tube de $0^{m},1$ de longueur.

On a alors, en appliquant par exemple au sucre de canne la formule générale,

$$24 = \rho \frac{16,35 \times 2}{1}, \quad \text{d'où} \quad \rho = 0^{\circ},734 \text{ ou } 44'20''.$$

598. **Applications de la polarisation rotatoire. — Saccharimétrie et saccharimètres : Définitions.** — La détermination du pouvoir rotatoire moléculaire des différentes substances actives fournit un moyen précieux

1. A. Bertin, *loc. cit.*

d'apprécier le degré de concentration ou le degré de pureté de leurs dissolutions. Voici un exemple de cette application.

On a vu qu'en dissolvant $16^{g},35$ de sucre pur dans $0^{l},1$ d'eau, et en observant la dissolution dans un tube de $0^{m},20$, on fait tourner de 24° vers la droite le plan de polarisation des rayons jaunes : c'est la rotation qu'on obtiendrait avec une plaque de $0^{m},001$ de quartz droit. Supposons qu'on ait acheté de la cassonade et qu'on veuille connaître la quantité de sucre pur qu'elle contient. On n'aura qu'à en peser $16^{g},35$ et les faire dissoudre dans $0^{l},1$ d'eau pure, filtrer et clarifier la dissolution, la verser dans un tube de $0^{m},20$ de long, et chercher de combien elle fait tourner vers la droite les vibrations jaunes. Ou plutôt, au lieu d'opérer directement de cette manière, on cherchera quelle épaisseur de *quartz gauche* il faut superposer à la dissolution pour annuler sa rotation. Si nous trouvons, par exemple, qu'il faut une plaque de 0,80 de millimètre, nous en conclurons que le *sucre brut* essayé contenait 80 p. 100 de *sucre cristallisable*. Aucune méthode d'analyse chimique n'est aussi sûre ni aussi expéditive que cette méthode physique.

Cet usage, purement industriel, de la polarisation rotatoire est de beaucoup le plus fréquent. C'est ce qui a fait donner le nom de *saccharimétrie* à cette méthode d'analyse, et de *saccharimètres* aux instruments qu'on a construits pourappliquer la méthode avec facilité et précision. Mais l'industriel n'est pas le seul à s'en servir. Le physiologiste peut étudier de la même manière les variations de l'albumine dans le sang et dans les autres liquides de l'organisme; le médecin peut suivre au saccharimètre la marche de la maladie appelée *diabète sucré*.

599. **Saccharimétrie et Saccharimètres : Principe et Méthode, Organes essentiels.** — Le saccharimètre est donc un instrument qui sert à déterminer non pas précisément la rotation qu'une substance active peut imprimer aux vibrations jaunes, — comme cela s'obtient avec l'appareil de Biot, — mais l'épaisseur de la lame de quartz qui est capable de produire une rotation égale. Et cette détermination se fait par la méthode de *compensation*, c'est-à-dire en compensant la rotation de la substance, dextrogyre ou lévogyre, qu'on étudie à l'aide d'une plaque de quartz faisant tourner en sens contraire.

Cette méthode de compensation est fondée sur ce fait que, lorsqu'on superpose deux substances actives, de signe contraire, *la rotation totale*, imprimée par le système, est égale *à la somme algébrique* des rotations de chaque substance. Si, par exemple, en prend 2 lames de quartz, dont l'une fait tourner les vibrations rouges de 18° vers la droite, et l'autre les fait tourner de 18° vers la gauche, le système des deux quartz superposés sera *inerte* comme une lame de verre de même épaisseur; il ne produira aucun effet de rotation, ni dans la lumière rouge, ni dans la lumière blanche.

L'opticien Soleil a construit, d'après ce principe, deux petits appareils qui sont les organes essentiels de tout *saccharimètre :* ce sont *la plaque à deux rotations* et le *compensateur*.

1° *Plaque à deux rotations. — Teinte sensible.* — Cet appareil se compose de deux plaques de quartz, de rotation contraire et de même épaisseur, non pas superposées, mais *accolées*, *juxtaposées*. Ce système fournit le moyen le plus délicat que l'on connaisse de mettre l'analyseur *au* 0°, c'est-à-dire dans la position de l'extinction, dans un appareil de polarisation.

Pour cela on donne à chacun des quartz, non pas une épaisseur quelconque, mais une épaisseur rigoureusement égale à $0^{m},0075$. Comme $0^{m},001$ de quartz tourne la vibration jaune exactement de 24°, une plaque de $0^{m},0075$ tournera la même vibration de $24^{\circ} \times 0^{m},0075$ ou 180°. Mais 180° et 0° c'est tout un dans le mouvement d'orientation d'un analyseur, puisque ces deux azimuts sont diamétralement opposés dans un cercle. Supposons donc qu'on ait un appareil

de polarisation quelconque, et qu'on y ait placé l'analyseur *à l'extinction* dans la lumière blanche : si l'on y interpose la plaque à rotations, les rayons jaunes seront éteints par les deux quartz, et les deux moitiés de l'image seront l'une et l'autre colorées de la teinte complémentaire du jaune. Si, par exemple, l'analyseur est un nicol, l'image unique qu'il donnera sera colorée uniformément de cette teinte complémentaire du jaune (fig. 656, I). Mais pour peu qu'on dérange le nicol, d'un côté ou de l'autre, les deux moitiés de l'image, correspondant aux deux moitiés de la plaque changeront en sens inverse, et l'on s'en apercevra immédiatement à cause de l'opposition des couleurs produites (fig. 656, II et III).

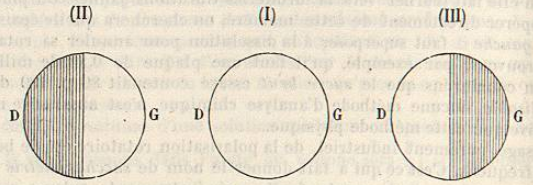

Fig. 656.

Cette teinte complémentaire du jaune est un certain *violet pâle* ou *violet rose* connu sous le nom de *teinte sensible*. La teinte est pâle, parce qu'elle correspond à l'extinction des rayons jaunes, qui sont les plus brillants du spectre. Elle est d'autant plus facile à apercevoir, et, par suite, d'autant plus *sensible*, qu'elle est placée entre un *rouge* et un *bleu*, qu'on obtient en tournant légèrement l'analyseur soit *à droite*, soit *à gauche*.

2° *Compensateur*. — Cet appareil se compose encore de deux quartz de rotations contraires, non plus *juxtaposés*, mais superposés. L'un, G, est fixe et lévogyre (fig. 657) et d'une seule pièce ; l'autre est divisé diagonalement en deux prismes

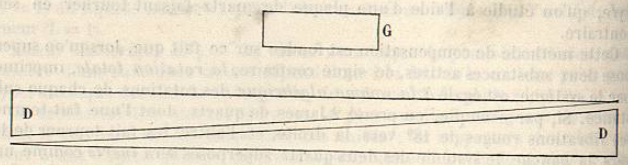

Fig. 657.

très aigus, D, D, qui glissent l'un sur l'autre au moyen d'une crémaillère. (La figure 657 représente l'appareil schématiquement, et la figure 659, II, le représente tel qu'il sert dans le saccharimètre de Soleil.) Il résulte de ce glissement que le second quartz, qui est dextrogyre, présente au rayon une épaisseur qui peut varier depuis zéro jusqu'à une épaisseur *supérieure* à celle du premier quartz. On peut arriver ainsi à la compensation exacte par degrés insensibles et apprécier des variations d'épaisseur très petites au moyen des divisions d'une règle qui mesure le déplacement des deux prismes (fig. 659, III).

600. **Saccharimètre de Soleil.** — Soleil a construit le premier saccharimètre ou appareil destiné à analyser les substances saccharifères. La figure 658 représente, en perspective, le saccharimètre fixé horizontalement sur son pied et la figure 659 donne une coupe longitudinale de l'ensemble et des détails.

Description. — On peut distinguer dans l'appareil trois parties principales : un tube qui contient le liquide à analyser, un polariseur et un analyseur

Le tube *m*, qui renferme le liquide, est de cuivre étamé intérieurement, il est fermé à ses deux extrémités par deux glaces à faces parallèles et il est soutenu par un support *k*, qui se termine à ses deux bouts par deux tubes *r* et *a*, dans lesquels sont les cristaux qui servent de polariseurs et d'analyseurs, et qui sont représentés dans la coupe (fig. 659).

Devant l'orifice S se place une lampe ordinaire à modérateur. La lumière émise par cette lampe, dans la direction de l'axe de l'instrument, rencontre

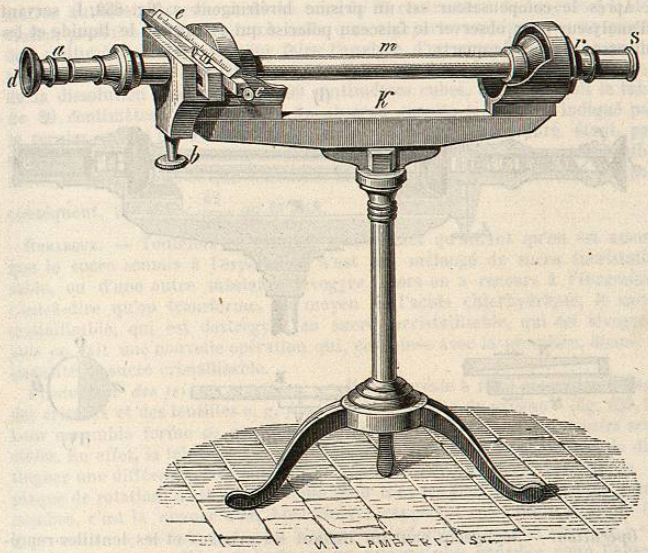

Fig. 658.

d'abord un prisme biréfringent *r*, qui sert de polariseur (593, 3°). L'image ordinaire seule arrive à l'œil, l'image extraordinaire étant projetée hors du champ de la vision, à cause de l'amplitude de l'angle que font entre eux le rayon ordinaire et le rayon extraordinaire. Enfin le prisme biréfringent est dans une position telle, que le plan de polarisation soit vertical et passe par l'axe de l'appareil.

A sa sortie du prisme biréfringent, le faisceau polarisé rencontre une plaque à double rotation, dont nous avons expliqué l'usage.

Après avoir traversé le quartz *q*, le faisceau polarisé passe dans le liquide que contient le tube *m*, et de là rencontre un compensateur, formé d'un quartz simple *i* et du double quartz *n*. Le mouvement des deux moitiés du compensateur s'obtient au moyen d'une double crémaillère et d'un pignon qu'on tourne à l'aide d'un bouton *b* (fig. 658 et 659, I).

Quand les lames se déplacent respectivement dans le sens indiqué par les flèches (fig. 659, II), il est évident que la somme de leurs épaisseurs augmente ; elle diminue au contraire quand les plaques avancent dans le sens

opposé. Une échelle *e* et un vernier *v* (fig. 659, III) suivent les plaques dans leur mouvement, et servent à mesurer les variations d'épaisseur du compensateur. Cette échelle, représentée ainsi que son vernier dans la figure 659 (III), porte deux divisions ayant un zéro commun, l'une de gauche à droite, pour les liquides dextrogyres, l'autre de droite à gauche, pour les liquides lévogyres.

Lorsque le vernier est au zéro de l'échelle, la somme des épaisseurs des plaques N et N' est précisément égale à celle de la plaque *i*, et comme la rotation de cette dernière est contraire à celle du compensateur, l'effet est nul. Mais si l'on fait marcher dans un sens ou dans l'autre les plaques du compensateur, celui-ci ou le quartz *i* l'emporte, et il y a rotation à droite ou à gauche.

Après le compensateur est un prisme biréfringent *c* (fig. 659, I) servant d'analyseur pour observer le faisceau polarisé qui a traversé le liquide et les diverses plaques de quartz.

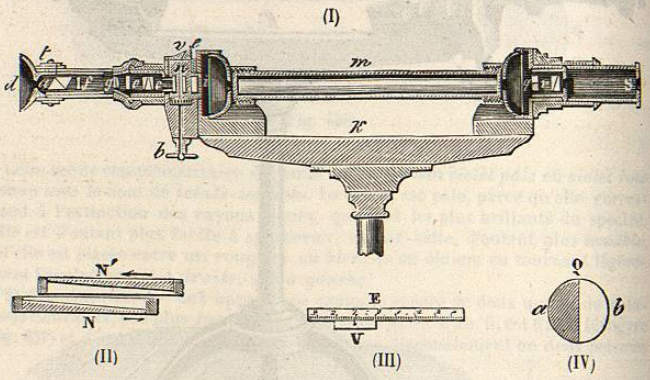

Fig. 659.

Opération. — Négligeons pour un instant les cristaux et les lentilles représentés à sa gauche dans le dessin. Si l'on fait d'abord coïncider le zéro du vernier *v* avec celui de l'échelle, et si le liquide contenu dans le tube est inactif, les actions du compensateur et de la plaque *i* se détruisent, et, l'effet du liquide étant nul, les deux moitiés de la plaque *q*, vues au travers du prisme *c*, donnent rigoureusement la même teinte, ainsi qu'on l'a déjà observé. Mais si l'on remplace le tube plein de liquide inactif par un second tube rempli d'une dissolution sucrée, le pouvoir rotatoire de celle-ci s'ajoute à celui de même sens de l'un des quartz de la plaque à double rotation *p*, et diminue d'autant le pouvoir rotatoire de l'autre quartz. Il résulte de là que les deux moitiés de la plaque *q* ne présentent plus la même teinte, et que la moitié *a* (fig. 659, IV) est rouge, par exemple, tandis que la moitié *b* est bleue. On fait alors marcher les prismes du compensateur, en tournant le bouton *b* vers la droite ou vers la gauche, jusqu'à ce que la différence d'action du compensateur et de la plaque *i* compense le pouvoir rotatoire de la dissolution, ce qui a lieu lorsque les deux moitiés de la plaque *q* à double rotation reviennent à leur teinte primitive.

Quant au sens de la déviation et à l'épaisseur du compensateur, on les mesure par le déplacement relatif de l'échelle *e* et du vernier *v*. Les divisions de l'échelle sont telles, que 10 de ces divisions correspondent à une variation de

1 millimètre dans l'épaisseur du compensateur, et comme le vernier donne lui-même les dixièmes de ces divisions, il en résulte qu'il mesure des variations de $\frac{1}{100}$ de millimètre dans l'épaisseur du compensateur.

Calcul de l'expérience. — Une fois que la teinte des deux moitiés de la plaque *q* est redevenue uniforme, comme avant l'interposition de la dissolution sucrée, on lit sur l'échelle à quelle division correspond le vernier : le nombre correspondant donne immédiatement le titre de la dissolution. En effet, nous avons vu que $16^{gr},471$ de sucre candi, bien desséché et bien pur, étant dissous dans l'eau, et la liqueur étant amenée au volume de 100 centimètres cubes et observée dans un tube de 20 centimètres de longueur, la déviation produite est précisément celle que comporte une épaisseur de quartz de 1 millimètre. Cela posé, pour faire l'analyse d'un sucre brut, on en prend toujours un poids de $16^{gr},471$ qu'on fait dissoudre dans de l'eau, et, le volume de la dissolution étant amené à 100 centimètres cubes, on en remplit le tube de 20 centimètres de longueur. On observe ensuite le nombre indiqué par le vernier quand on a retrouvé la teinte primitive. Ce nombre étant, par exemple, 42, on en conclut que cette dissolution contient, en sucre cristallisable, 42 pour 100 de ce que contenait la dissolution de sucre candi, et, par conséquent, $16^{gr},471 \times \frac{42}{100}$, ou $6^{gr},918$.

Remarque. — Toutefois ce résultat n'est exact qu'autant qu'on est assuré que le sucre soumis à l'expérience n'est pas mélangé de sucre incristallisable, ou d'une autre substance lévogyre. Alors on a recours à l'*inversion*, c'est-à-dire qu'on transforme, au moyen de l'acide chlorhydrique, le sucre cristallisable, qui est dextrogyre, en sucre incristallisable, qui est lévogyre, puis on fait une nouvelle opération qui, combinée avec la première, donne la quantité de sucre cristallisable.

Producteur des teintes sensibles. — Il nous reste à faire connaître l'usage des cristaux et des lentilles *o*, *g*, *f*, *a*, placés à la suite du prisme *c* (fig. 659, 1). Leur ensemble forme ce que Soleil a nommé le *producteur des teintes sensibles*. En effet, la teinte la plus sensible, c'est-à-dire celle qui permet de distinguer une différence très faible dans la coloration des deux moitiés de la plaque de rotation, n'est pas la même pour tous les yeux : pour le plus grand nombre, c'est la nuance d'un bleu violacé rappelant celle de *la fleur de lin* que nous avons définie ci-dessus. L'appareil de Soleil permet de produire à volonté la *teinte sensible*, ou toute autre nuance plus sensible pour l'observateur.

Pour cela, en avant du prisme *c* est d'abord une plaque de quartz *o* taillée perpendiculairement à l'axe, puis une petite lunette de Galilée (515), formée d'un verre biconvexe *g* et d'un verre biconcave *f*, pouvant se rapprocher entre eux, ou s'écarter suivant la distance de la vue distincte de l'observateur ; enfin l'appareil se termine par un prisme de Nicol *a*, qu'on tourne à volonté sur lui-même. Le prisme biréfringent *c* agissant comme polariseur par rapport au quartz *o*, et le prisme *a* comme analyseur, lorsqu'on tourne ce dernier à droite ou à gauche, la lumière qui a traversé le prisme *c* et la plaque *o* change de teinte (596), et finit par donner celle que l'expérimentateur a adoptée pour teinte fixe.

601. **Saccharimètre à pénombres.** — Dans le saccharimètre de Soleil, certaines vues n'apprécient qu'avec difficulté l'instant précis où les deux plaques *q* reviennent exactement à leur teinte rose violacée primitive. Pour obvier à cet inconvénient, M. Jellet a imaginé le *saccharimètre à pénombres*. Dans cet appareil l'éclairage est produit avec une lumière monochromatique (le jaune de la raie du sodium), et le polariseur est modifié de manière que l'œil n'ait plus à comparer deux couleurs différentes, mais deux intensités

d'une même couleur, ou plutôt de deux pénombres; — car la lumière du sodium s'efface en réalité dans l'appareil pour ne donner que deux pénombres dans le champ de l'oculaire — : ce qui permet à l'œil d'obtenir beaucoup plus exactement les moindres variations. C'est donc l'égalité de ces deux pénombres qui remplace la teinte de passage du saccharimètre de Soleil; et alors, de même que dans l'appareil de Biot (fig. 655), c'est l'angle de rotation qu'il faut imprimer à l'analyseur pour égaliser les deux pénombres qui fait connaître la richesse du liquide sucré.

602. **Analyse de l'urine des diabétiques.** — Dans la maladie connue sous le nom de *diabète sucré*, les urines sont chargées d'une forte quantité d'un sucre fermentescible qu'on nomme *sucre de diabète*. Ce sucre, à l'état naturel dans les urines, fait tourner le plan de polarisation à droite. Pour le doser dans les urines des diabétiques, on commence, si celles-ci ne sont pas assez limpides, par les clarifier par le sous-acétate de plomb; on filtre, on remplit le tube *m* de l'urine clarifiée, puis on tourne le bouton *b* jusqu'à ce qu'on obtienne, pour la plaque à deux rotations, la même teinte qu'avant l'interposition de l'urine. On sait d'ailleurs, par un essai préalable, que 100 parties de l'échelle du saccharimètre représentent le déplacement à donner aux quartz compensateurs lorsqu'il entre dans l'urine $225^{gr},6$ de sucre par litre; il en résulte que chaque division de l'échelle représente $2^{gr},256$ de sucre. Donc, pour obtenir la quantité de sucre contenue dans une urine donnée, il suffit de multiplier $2^{gr},256$ par le nombre qu'indique le vernier au moment où l'on retrouve la teinte primitive.

LIVRE VIII

CHALEUR

CHAPITRE PREMIER

EFFETS GÉNÉRAUX. — THERMOMÉTRIE.

603. **Définition et origine de la chaleur. — Théorie dynamique.** — La *chaleur* est, avant tout, la cause de nos sensations de *chaud* et de *froid;* mais cette cause a des effets plus variés et plus puissants, par lesquels on peut aussi la définir : c'est elle qui fait fondre les corps solides, tels que la glace, bouillir les liquides, tels que l'eau, qui fait dilater tous les corps, et qui rend le fer et les autres métaux incandescents.

De nombreuses hypothèses ont été émises sur l'origine et la cause de la chaleur; deux systèmes principaux, — les mêmes que pour la *lumière*, — ont été soutenus par les physiciens : le système de l'*émission* et celui des *ondulations*.

Dans le premier, on attribuait les phénomènes calorifiques à un fluide matériel, impondérable, incoercible, qu'on nommait *calorique*. D'après cette hypothèse, les atomes du calorique, étant dans un état constant de répulsion, seraient projetés dans toutes les directions et à toutes les distances, s'emmagasineraient en quantité variable dans les corps, et s'opposeraient au contact immédiat de leurs molécules. L'hypothèse de la matérialité de la chaleur fut adoptée par les savants les plus illustres, tels que Newton, Lavoisier, Laplace, Gay-Lussac. Elle est abandonnée aujourd'hui par tous les physiciens et remplacée par l'hypothèse des *ondulations*.

Les dernières molécules des corps sont animées d'un mouvement vibratoire de très faible amplitude, mais très rapide, *d'où résulte la chaleur;* ce mouvement est transmis à distance par l'intermédiaire d'un milieu infiniment élastique, l'*éther*, le même dont les phénomènes lumineux nous ont démontré l'existence. L'éther, répandu dans tout l'univers, et remplissant les espaces intermoléculaires, aussi bien que les espaces interplanétaires, est choqué par les molécules vibrantes des corps, et ce choc y fait naître des ondulations qui transmettent le mouvement et par suite la chaleur, de même que les ondes sonores de l'air propagent le son. En sorte que, dans la théorie des ondulations (ou *théorie dynamique*, ou *thermodynamique*), tous les phénomènes calorifiques sont ramenés à une cause unique, le *mouvement*, les corps les plus chauds étant ceux dont les molécules vibrent avec la plus grande vitesse et la plus grande amplitude, et les corps qui s'échauffent ou se refroidissent ne faisant que gagner ou perdre du mouvement.