

plus importantes du maintien de la température à une valeur invariable, la quantité de liquide sécrété et évaporé étant, dans les conditions normales, d'autant plus considérable que la température ambiante est plus élevée : dès que celle-ci est voisine de 37° les pertes par l'air deviennent très faibles, sinon nulles, et la production de chaleur intérieure continuant, la température s'élèverait nécessairement si l'excès de chaleur n'était utilisé à produire l'évaporation de la sueur. A plus forte raison en serait-il ainsi, si la température devenait supérieure à 37°; le corps tendrait à se mettre en équilibre avec l'air ambiant. C'est l'évaporation qui sert ainsi, dans ces conditions, de régulateur à la température; c'est elle qui explique que l'homme puisse se maintenir à moins de 38°, alors que l'air ambiant atteint et dépasse 40° d'une manière continue; c'est par la même cause que, comme nous l'avons dit, des individus ont pu se maintenir sans accident dans des milieux portés à des températures très élevées.

Mais cette régulation de la température due à l'évaporation ne peut se produire complètement que si ce phénomène peut avoir lieu librement : la quantité de liquide évaporé dépendant de l'état hygrométrique de l'atmosphère, la perte de chaleur subie de ce fait par l'organisme sera d'autant moindre que l'air ambiant sera plus voisin de la saturation. De là le sentiment désagréable, fatigant, accablant même quelquefois, qui se produit dans les temps humides, particulièrement si la température étant quelque peu élevée les pertes par l'air sont faibles; de là certainement l'action nuisible de certains climats intertropicaux dans lesquels se trouvent réunis d'une manière presque continue une température élevée et un état hygrométrique voisin de la saturation.

331. — Nous avons dit que les mammifères ont, d'une manière générale, une température sensiblement invariable : une exception intéressante se présente pour ceux d'entre eux qui sont *hibernants*. Pendant la durée de l'hibernation, en effet, la température de ces animaux s'abaisse, en même temps qu'ils restent endormis, engourdis. Tant que dure l'hibernation, la respiration et la circulation sont ralenties, diminuées considérablement. Les actions chimiques sont donc moindres : elles ne sont plus suffisantes pour conserver à l'animal une température constante; l'animal se comporte par rapport au milieu ambiant comme un corps inorganisé; plus exactement il se comporte comme un animal inférieur, un animal à température variable.

332. **Origine de la chaleur chez les animaux.** — Quelle est la cause de la production de chaleur chez les animaux, production de chaleur que l'on a pu évaluer ainsi que nous venons de le dire? La réponse n'est pas douteuse actuellement, et il est certain que l'origine de cette chaleur doit être cherchée dans les combinaisons chimiques qui se passent au sein de l'organisme.

Pour donner la démonstration que ces combinaisons produisent et pro-

duisent seules toute la chaleur que les animaux perdent à chaque instant, il faudrait connaître exactement la nature des actions chimiques qui ont lieu, et connaître également les quantités de substance entre lesquelles ces réactions se passent.

Lavoisier et les expérimentateurs qui, après lui, se sont d'abord occupés de la question de la chaleur animale, pensaient que la chaleur produite par les animaux provenait de la combustion, par l'oxygène de l'air introduit dans l'organisme par la respiration, du carbone et de l'hydrogène contenus dans les tissus. Il suffit, si l'on admet cette hypothèse, de déterminer le poids d'acide carbonique et le poids de vapeur d'eau formés, ce qui permet de calculer la quantité de chaleur mise en liberté par les combustions correspondantes.

Pour arriver à cette détermination, on fait passer dans le calorimètre où l'animal est placé un courant d'air dont on mesure le volume à l'entrée et qu'on analyse à la sortie en prenant, pour effectuer ces mesures, les précautions nécessaires, dans le détail desquelles il est sans intérêt d'insister. La quantité d'acide carbonique recueillie dans les gaz expirés permet de conclure la quantité de chaleur produite à raison de 8000 calories par gramme de carbone brûlé, soit pour 3^{es}, 67 d'acide carbonique recueilli. La quantité d'oxygène compris dans cet acide carbonique peut être aisément déduite (1 vol. d'oxygène pour 1 vol. d'acide carbonique); en la retranchant du volume d'oxygène introduit on a le volume de l'oxygène qui, dans l'hypothèse faite, a servi à la combustion de l'hydrogène. On peut donc calculer le poids d'eau formée et la quantité de chaleur produite, à raison de 1910 calories par gramme d'eau.

Lavoisier, en opérant sur des cochons d'Inde, est arrivé à conclure que la chaleur produite par les animaux est due à ces combustions; il énonce ainsi ses conclusions :

« En rapprochant ces réflexions des résultats qui les ont précédées, on voit que la machine animale est principalement gouvernée par trois régulateurs principaux : la respiration, qui consomme de l'hydrogène et du carbone, et qui fournit du calorique; la transpiration, qui augmente ou diminue suivant qu'il est nécessaire d'emporter plus ou moins de calorique; enfin la digestion, qui rend au sang ce qu'il perd par la respiration et la transpiration. »

333. — Ces idées de Lavoisier qui furent admises après lui par les savants qui s'occupèrent de la question jusqu'à ces dernières années ne peuvent être acceptées entièrement; le carbone et l'hydrogène n'existent pas dans l'organisme à l'état de liberté, et le passage de ces corps à l'état d'acide carbonique et d'eau ne dégage pas autant de chaleur lorsque l'oxygène brûle ces corps libres ou existant à l'état de combinaison.

En réalité, la question est moins simple, et de nombreuses réactions se produisent dans l'organisme entre les matières diverses qui s'y trou-

vent et entre celles-ci et l'oxygène qui, introduit dans le sang par la respiration et porté dans tous les points du corps par la circulation, va exercer partout son action. Sans qu'il soit nécessaire de donner l'indication des réactions qui ont lieu certainement ou probablement, nous nous bornerons à dire qu'elles peuvent donner lieu, soit à un dégagement, soit à une absorption de chaleur. Mais la somme des quantités de chaleur dégagée est supérieure à la somme des quantités de chaleur absorbée et la différence représente la quantité de chaleur rendue libre et qui sert à maintenir la température de l'animal constante, malgré les pertes qu'il éprouve.

Non seulement le rôle de comburant attribué à l'oxygène dissous dans le sang est nécessaire dans cette théorie, mais il a été vérifié directement : des mesures prises à l'aide de sondes thermo-électriques fonctionnant comme thermomètre différentiel ont montré que le sang veineux est plus chaud que le sang artériel, la différence pouvant atteindre un demi-degré ; le sang, en passant dans les capillaires, y a apporté de l'oxygène, des combustions se sont produites dans les tissus voisins et ont dégagé de la chaleur qui a élevé la température du liquide sanguin.

Telles sont les grandes lignes de la solution ; mais le problème n'est pas complètement résolu en réalité, car on ne sait pas exactement quelles sont les substances entre lesquelles se passent ces réactions ni quelles sont ces réactions et, par suite, on ne peut vérifier si, à l'état de repos, la quantité de chaleur produite dans l'organisme d'un être vivant par les réactions chimiques qui s'y passent est égale à la quantité de chaleur perdue par cet être.

Cette vérification rigoureuse ne présente pas d'ailleurs un intérêt capital ; la question n'est plus de savoir si, comme Lavoisier l'a démontré, la chaleur animale est due à des actions chimiques : le fait est admis certainement sans restriction, et c'est là le point important ; si les détails nous échappent encore en partie, nous voyons nettement l'ensemble de la question.

334. Origine du travail mécanique chez les animaux. — Dans les recherches que nous venons de résumer sommairement, les animaux restaient à l'état de repos, au moins sensiblement, pendant la durée de l'expérience, tout au moins ne produisaient-ils pas de travail mécanique. Telles ne sont pas les conditions normales : les animaux se déplacent, développent des efforts, produisent du travail mécanique : quelle est l'origine de ce travail, de cette énergie sous forme mécanique, énergie qui ne peut être créée plus qu'elle ne peut être détruite et qui ne peut que passer d'un corps à un autre directement ou en changeant de forme ?

Le travail mécanique produit doit avoir nécessairement son origine dans les actions chimiques qui se passent dans l'organisme, car là seulement se produisent des modifications susceptibles de faire apparaître de l'énergie actuelle. La question paraît d'ailleurs résolue, d'après un certain

nombre d'observations dont nous signalerons les principales, et le point sur lequel il reste une réelle indétermination consiste à savoir si ces actions chimiques produisent directement de la chaleur qui se transforme ultérieurement en travail mécanique ou si, sans passer par la forme chaleur, l'énergie qu'elles mettent en liberté, fournissent immédiatement du travail mécanique. Enfin, on peut également admettre que le passage de l'action chimique au travail mécanique se fait par une action spéciale d'une autre nature.

335. — Nous venons de dire que le travail mécanique produit par les êtres vivants doit résulter des actions chimiques, c'est-à-dire que l'animal, l'homme, qui travaille doit être le théâtre de réactions plus vives, plus énergiques que l'animal qui est au repos. Ce premier fait est mis hors de doute par des expériences de Hirn. Dans une caisse en bois, fonctionnant comme un calorimètre à température stationnaire, se trouve un homme qui peut y rester pendant un temps assez long, soit immobile, au repos, soit produisant un travail mécanique, l'ascension de son corps sur une roue à palettes qui tourne sous l'action de son poids. Les mesures des quantités de chaleur perdue sont faites comme nous l'avons indiqué, et, d'autre part, la quantité d'oxygène introduite dans l'organisme et utilisée à y produire des combustions est déterminée par la mesure et l'analyse des gaz qui pénètrent dans l'appareil et par celle des gaz qui en sortent. Sans donner le détail des expériences, nous dirons seulement que Hirn a reconnu que pour une même quantité de chaleur recueillie dans l'appareil, produite par l'homme par conséquent, le poids de l'oxygène introduit et fixé dans l'organisme est plus grand quand l'homme travaille que lorsqu'il est au repos.

Sans nous arrêter aux diverses expériences qui ont été faites, nous signalerons seulement encore les mesures prises par M. Chauveau : cet habile expérimentateur a mesuré les quantités de sang qui traversaient le muscle masséter d'un cheval, lorsque ce muscle était au repos ou lorsqu'il travaillait pendant la mastication. Il trouva que pendant le travail, la quantité de sang qui traverse ce muscle est 2,5 ou 3 fois plus grand qu'à l'état de repos ; que les quantités d'oxygène absorbé et d'acide carbonique varient dans le rapport de 1 à 3,5 dans les mêmes conditions ; que la quantité de glycose disparue de la totalité du sang change également dans le même rapport. De même, l'analyse du muscle à l'état de repos, puis après une demi-heure de travail, montre que pour 1000 grammes de muscle, on trouve au repos 1^{gr},774 de glycogène, et seulement 1^{gr},396 après l'action : il a donc disparu 0^{gr},378 de glycogène en même temps que le muscle travaillait. Ces résultats, qui ont été confirmés par d'autres recherches sur le muscle releveur de la lèvre du cheval, sont probants : ils montrent que l'activité chimique augmente lors de la production d'un travail mécanique.

336. — Si nous pouvons admettre, d'après ce qui précède, que le travail mécanique produit chez l'animal a pour origine les actions chimiques qui se passent dans l'organisme, comment se fait la formation? est-elle directe ou non?

Quelques expériences tendraient à prouver que le travail produit résulte de la transformation de chaleur en travail mécanique, c'est-à-dire que l'action chimique produirait de la chaleur et que celle-ci, au moins en partie, serait transformée en travail mécanique. C'est ce que tendent à prouver des expériences de J. Béclard qui a déterminé la température du biceps brachial : 1° à l'état de contraction statique; 2° dans le cas où il exécutait un travail mécanique, en soulevant un poids; 3° dans le cas où, au contraire, il recevait du travail mécanique en soutenant un poids qui descendait d'une certaine hauteur; 4° en élevant et soulevant alternativement le même poids. Sans entrer dans le détail, nous dirons qu'il a trouvé que dans le deuxième cas la température du muscle était moins élevée que dans le premier : il y avait production de travail mécanique et disparition de chaleur. Dans le troisième cas, la température du muscle était plus élevée que dans le premier; il y avait du travail mécanique fourni au muscle et apparition d'une certaine quantité de chaleur. Enfin dans le quatrième cas, il n'y avait pas de changement de température; le travail produit pendant la montée du poids étant égal au travail fourni pendant la descente, il devait, en effet, y avoir compensation.

Ces résultats sont intéressants; mais il convient de dire avec M. Chauveau qu'ils ne sont pas à l'abri de la critique.

D'autre part, Hirn dans les expériences que nous avons indiquées, a trouvé que lorsque l'homme abaisse son propre poids, il y a bénéfice de chaleur, c'est-à-dire que la quantité de chaleur recueillie est plus grande que celle qui, pour la même quantité d'oxygène consommé, aurait été produite à l'état de repos.

Cette expérience est d'accord avec l'élévation de température du muscle observée par Béclard lorsqu'il soutient un poids qui descend. Mais il faut remarquer que si ces faits montrent que lorsqu'on fournit du travail mécanique à un être vivant, ce travail est transformé en chaleur, on ne saurait en conclure que, nécessairement, lorsque cet être produit du travail mécanique, celui-ci provient de la transformation d'une certaine quantité de chaleur.

Des recherches ont été faites par Heidenhain et par Fick, sur les muscles isolés de la grenouille, et il semble résulter de leurs expériences qu'il y a absorption de chaleur lorsqu'il y a production de travail mécanique.

Enfin nous signalerons des recherches de M. Chauveau sur le muscle releveur de la lèvre du cheval; par l'emploi d'artifices ingénieux, il put mesurer la température de ce muscle pendant que l'animal mangeait,

soit lorsque ce muscle se contractait *utilement*, en produisant du travail, soit lorsqu'il se contractait *à vide* sans production de travail. Les résultats qu'il a obtenus sont d'accord avec ceux que nous venons de citer rapidement : la température du muscle qui travaille est moins élevée que celle du muscle qui ne travaille pas.

337. — Nous pouvons donc admettre qu'un muscle qui travaille, c'est-à-dire qu'un muscle qui produit un travail mécanique par suite de contractions, est à une température moins élevée que si, tout en étant contracté ou se contractant, il ne produit pas de travail mécanique. Mais, d'autre part, des expériences nombreuses ont montré qu'un muscle contracté sans produire de travail, qu'un muscle qui subit une contraction statique, suivant une expression consacrée, s'échauffe, qu'il s'y développe de la chaleur. Si donc lorsqu'il travaille, la quantité de chaleur qui apparaît est moindre, il semble naturel de penser que cette chaleur qui fait défaut et qui aurait été produite s'il n'y avait pas eu de travail effectué, a été transformée et a, par sa transformation, donné naissance à ce travail.

Nous devons reconnaître que, en réalité, la démonstration n'a pas été faite; que, notamment, on n'a pu mettre en évidence que la transformation supposée avait lieu conformément au principe de l'équivalence. Mais les conditions sont très complexes, les expériences délicates, et cette démonstration sera certainement très difficile à faire si même on y parvient.

Ajoutons que des objections ont été faites à cette idée de la transformation de la chaleur en travail mécanique dans l'organisme. L'une d'elles a été présentée par M. Bergonié¹, puis par M. Gautier²; elle repose sur l'application du principe de Carnot (269). Appliquant à l'homme l'équation du rendement que nous avons indiquée, équation dans laquelle on connaît la valeur du rendement chez l'homme et la température la plus élevée, on peut calculer quelle devrait être la température la plus basse pour que l'équation fût satisfaite. Le rendement a été évalué par divers observateurs et paraît compris entre $\frac{1}{2}$ (Heidenhain) et $\frac{1}{5}$ (Helmholtz et

Fick); la valeur $\frac{1}{3}$, intermédiaire entre ces extrêmes, a été indiquée par Fick également, et plus récemment par M. Gautier. L'une des températures entre lesquelles fonctionnerait l'organisme considéré comme machine thermique est connue, l'équation du rendement permettrait de calculer l'autre.

On arrive ainsi à des valeurs incompatibles avec les conditions de la vie, et M. Bergonié, ainsi que M. Gautier, conclut que l'organisme ne peut fonctionner en obéissant au principe de Carnot, et que par conséquent le travail mécanique qui y est produit ne saurait être la conséquence de la transformation de la chaleur.

1. *Leçons sur la chaleur et la thermodynamique animales*, Bordeaux, 1888.

2. *Traité de chimie biologique et Rev. scientif.*, 30 oct. 1891.

Nous ne sommes pas convaincu par ce raisonnement, car l'équation du rendement n'est pas applicable à ce cas où, comme le montre une analyse même sommaire, on ne trouve pas les conditions pour lesquelles elle a été établie.

338. — Pour M. Chauveau, qui s'est beaucoup occupé de la question, l'énergie produite dans l'organisme par les actions chimiques n'est pas transformée en chaleur, elle est utilisée à la *création de l'élasticité de contraction*, ce que nous exprimerons autrement en disant qu'elle passe à l'état d'énergie potentielle d'une nature particulière; ce serait cette énergie potentielle qui, lors de la production d'un travail mécanique, se transformerait en énergie actuelle. « La production de la chaleur, dit ce savant, n'intervient pas dans le mécanisme intime de la contraction musculaire, comme un commencement, mais comme une fin. La chaleur sensible qui apparaît est un résidu, une sorte d'*excretum*, résultat de la transformation thermique du travail physiologique représenté par la création de l'élasticité de contraction. »

Nous ne pouvons discuter les conclusions que M. Chauveau tire de ses expériences, conclusions qui ne nous semblent pas cependant à l'abri de toute objection; mais nous ne pouvons pas ne pas les indiquer, car elles présentent la question sous une nouvelle face et s'appuient sur des expériences multipliées.

En résumé, il n'est pas douteux que les combustions qui se passent dans l'organisme ne soient, par l'énergie qu'elles abandonnent, la source de la chaleur dégagée par les êtres vivants et qu'elles ne soient également l'origine de l'énergie que ces êtres peuvent manifester sous forme de travail mécanique. Mais on ne saurait affirmer actuellement si l'énergie dégagée par les actions chimiques peut fournir du travail mécanique par une transformation directe ou si la transformation ne peut se faire que d'une manière indirecte, l'énergie dégagée par les actions chimiques devant passer, soit par la forme chaleur, soit par une autre (création de l'élasticité de contraction?) avant de produire du travail mécanique.

339. — Les actions chimiques qui se passent dans l'organisme des êtres vivants ont donc à subvenir, d'une part, aux pertes de chaleur variables dont nous avons parlé et aussi, directement ou indirectement, au travail mécanique produit par ces êtres; elles doivent donc être incessamment variables et doivent se proportionner, au moins sensiblement, aux dépenses d'énergie effectuées: il faut donc qu'il y ait un moyen de régulation. Sans insister, car la question sort du domaine de la physique, nous dirons que la grandeur des actions chimiques est liée à la quantité de sang qui circule dans les organes, quantité qui varie suivant les circonstances et se trouve ainsi sous la dépendance du système nerveux par l'intermédiaire duquel se fait la régulation de la production d'énergie dans l'organisme.

LIVRE III

OPTIQUE. — RADIATIONS

CHAPITRE PREMIER

OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

ART. I. — NOTIONS PRÉLIMINAIRES. — PROPAGATION. — DIFFUSION

340. **De la sensation lumineuse ou lumière.** — On désigne sous le nom de *lumière* la sensation spéciale qui résulte de la mise en activité de l'organe de la vision, de l'œil; on la nomme également souvent sensation lumineuse.

On ne peut pas définir cette sensation qui est, comme toutes les sensations, un phénomène subjectif, et l'on peut seulement, pour la faire connaître à ceux qui l'ont déjà éprouvée, rappeler dans quelles circonstances ils l'ont ressentie. Diverses actions peuvent nous procurer cette sensation: ce sont, par exemple, l'influence de certains états cérébraux, non définis matériellement, l'ingestion de quelques substances médicamenteuses ou toxiques, les actions mécaniques ou électriques auxquelles on soumet directement le nerf optique. Mais ce sont là des effets exceptionnels qui ne représentent pas les conditions normales de la mise en activité de l'organe de la vision.

Dans les conditions ordinaires de la vision, la cause des sensations lumineuses que nous éprouvons est extérieure à nous, elle est objective, elle réside dans les corps que nous voyons, c'est-à-dire dont nous avons connaissance grâce à elle. Au début, dans l'enfance, les indications fournies par l'organe de la vision doivent être corroborées, vérifiées, corrigées par le sens du toucher; mais, à partir d'un certain âge, l'éducation de l'œil est faite à ce point de vue et les notions que cet organe fournit suffisent par elles-mêmes, en général.

Nous nous occuperons seulement des sensations lumineuses qui ont des causes objectives.

341. — En cherchant à analyser les sensations lumineuses produites