Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles

Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles

Band: 23 (1887-1888)

Heft: 96

Artikel: Le travail musculaire dans ses rapports avec la loi de l'équivalence thermodynamique

Autor: Herzen, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-261383

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

LE TRAVAIL MUSCULAIRE

dans ses rapports avec la loi de l'équivalence thermodynamique,

par A. HERZEN

Communication faite à la Société vaudoise des Sciences naturelles, dans sa séance du 20 février 1884.

L'organisme vivant étant une machine apte à produire du travail mécanique, il s'agit de savoir si cette machine est soumise à la loi universelle de l'équivalence thermodynamique, c'est-à-dire, si elle *consomme* de la chaleur pour fournir un travail positif (une ascension par exemple) et si elle en *accumule* pendant le travail négatif (une descente).

Le problème s'applique spécialement à l'organe du mouvement, au tissu musculaire; or, il est de mode dans ces derniers temps de nier que le muscle soit un moteur à calorique, qui, à l'instar des autres moteurs semblables, transformerait la chaleur en travail; il n'est pas possible, dit-on, que la chaleur dégagée au sein du muscle par les réactions chimiques dont il est le siège, se transforme en travail mécanique, parce que *la condition nécessaire* à cette transformation manque dans la machine animale; l'énergie mécanique de celle-ci doit, par conséquent, avoir une autre source que la chaleur. Il existe actuellement à cet égard un accord presque général parmi les physiciens et les physiologistes; et pourtant il me semble que ce raisonnement est fondé sur une comparaison erronée : « la condition nécessaire » dont on parle ne l'est que pour les machines à vapeur perfectionnées, pour celles qui, grâce à un mouvement de va et vient du piston, transformé en mouvement circulaire, doivent fournir un travail continu; cette condition : c'est *la grande chute de température* entre la chaudière et le condenseur, qui n'a d'autre but que celui de favoriser et d'accélérer le retour du piston, après l'accomplissement de son excursion, due à l'entrée de la vapeur dans le cylindre; c'est un perfectionnement très utile au point de vue industriel, mais ce n'est pas le principe fondamental de la machine : le piston peut parfaite-

ment être poussé en avant par la vapeur dilatée dans la chaudière et fournir du travail mécanique, en l'absence du condenseur et c'est tout ce qu'il faut pour constituer une machine simple, élémentaire. Or le muscle n'est pas une machine perfectionnée; le piston musculaire n'a pas de mouvement de va et vient et ne peut se mouvoir que dans une seule direction; pour revenir sur l'excursion accomplie dans un sens donné, il faut une autre chaudière, un autre cylindre et un autre piston, qui travaillent en sens inverse, sans quoi le retour ne saurait avoir lieu; bref, le muscle est une machine imparfaite, une machine à travail pour ainsi dire *unilatéral :* le biceps peut fléchir l'avant-bras sur le bras et c'est tout; son action est épuisée par ce travail et il ne peut pas étendre de nouveau le bras qu'il a fléchi; il faut pour cela que le triceps entre en action, lequel, à son tour, ne peut qu'étendre le bras et nullement le fléchir. On le voit dans tous les cas où la machine vivante a besoin d'accomplir deux mouvements en sens inverse l'un de l'autre (ce qui a toujours lieu lorsqu'elle doit fournir un travail continu, marche, vol ou natation), elle en est réduite à employer deux machines indépendantes l'une de l'autre, dont aucune ne possède le perfectionnement indiqué tout à l'heure et dont chacune accomplit son travail en l'absence de tout arrangement comparable à l'action synergique de la chaudière et du condenseur; c'est exactement comme si, pour obtenir le rapide va et vient du piston en l'absence du condenseur, on avait deux chaudières fonctionnant de façon à ce que la vapeur de l'une le pousse en avant et celle de l'autre en arrière. Il s'ensuit que tous les raisonnements fondés sur la nécessité d'un considérable écart de température entre les deux organes essentiels des machines perfectionnées et tendant à démontrer l'impossibilité de la transformation de la chaleur en travail mécanique au sein de la machine vivante et spécialement du muscle, manquent complètement de base. Il me semble au contraire que toutes les données expérimentales que nous possédons relativement à l'activité musculaire démontrent que cette transformation a réellement lieu, pour le moins dans les cas où l'activité du muscle fournit du travail mécanique extérieur, et peut-être aussi dans les cas où elle n'en fournit point. Le simple fait de la contraction d'un muscle, même si ce dernier est séparé de toutes ses attaches et s'il ne soulève aucun poids, n'est-il pas en effet un travail mécanique? S'il n'y a pas déplacement d'une masse

étrangère au muscle, du moins la masse du muscle lui-même est déplacée; et même si le dispositif de l'expérience est tel que le muscle n'ait rien à soulever, n'a-t-il pas, au moment de sa contraction, à vaincre la résistance des enveloppes de la substance active, à comprimer ou à distendre des tissus élastiques? Enfin le changement moléculaire intime, qui constitue la contraction du muscle, n'est-il pas à lui seul un travail interne s'accomplissant aux dépens d'une certaine quantité de chaleur? Cela doit être, si l'analogie entre les propriétés physiques du tissu musculaire et celles du caoutchouc est aussi grande que les recherches modernes semblent l'indiquer : le muscle, comme le caoutchouc, s'échauffe quand il est étiré et se refroidit quand il se rétracte; or la contraction active du muscle n'est pas autre chose qu'une brusque augmentation de rétractilité. Le muscle en se contractant devrait donc se refroidir; mais en énonçant cette idée nous nous heurtons, dès le début, à une objection apparemment très grave : dans la très grande majorité des cas, les expériences thermométriques indiquent, dans l'intérieur du muscle actif, une *augmentation* et non une diminution de la température; cependant cette objection est moins grave qu'elle n'en a l'air de prime abord : la méthode thermométrique ne peut, en effet, nous révéler autre chose que l'état thermique momentané de l'objet en expérience; aussi l'échauffement qu'elle indique peut-il parfaitement être le résultat, la somme algébrique, d'un échauffement beaucoup plus considérable, neutralisé en partie par un refroidissement simultané, mais moindre; l'échauffement du muscle actif, observé dans la plupart des cas, *mais nullement toujours*, peut donc être interprété dans ce sens qu'au moment de l'activité il se dégage en général assez de chaleur dans l'intérieur du muscle pour couvrir et pour dépasser même le refroidissement simultané, si tant est que ce refroidissement existe; or, les recherches de ces dernières années ne laissent plus guère de doute sur son existence.

D'après cette manière de voir, la contraction musculaire serait en même temps un phénomène *physique* absorbant de la chaleur et un phénomène *chimique* produisant de la chaleur, de telle sorte que, si le premier pouvait avoir lieu sans le dernier, le muscle actif devrait toujours devenir plus froid, tandis que, si le dernier pouvait avoir lieu sans le premier, le muscle devrait s'échauffer plus qu'il ne le fait dans l'accomplissement normal d'une contraction; et cela exactement de la quantité de chaleur

qui est consommée par le processus intime constituant la contraction. C'est là sans doute un cas hypothétique et nous n'avons aucun moyen de séparer et d'isoler ainsi les deux phénomènes qui constituent l'activité musculaire; mais il y a des expériences qui montrent qu'ils se laissent plus ou moins disjoindre, assez pour prouver qu'ils ne sont pas absolument solidaires.

Sans vouloir m'arrêter trop longtemps sur les expériences faites sur l'organisme tout entier, au moyen de la méthode thermométrique ou calorimétrique, je ne puis pourtant pas les passer entièrement sous silence, d'autant plus qu'elles ont, malgré tout, donné des résultats intéressants.

MM. Lortet et Marcet ont été les premiers, je crois, à essayer de constater si pendant l'effort considérable qu'exige une ascension rapide et prolongée il se produit un abaissement de la température interne du corps; et ils ont, en effet, observé un léger abaissement; mais ils s'étaient servi de la thermométrie buccale dont l'exactitude a été contestée par M. F.-A. Forel; il a, à son tour, entrepris des ascensions dans le même but, mais en se servant de la thermométrie rectale et il n'a jamais constaté autre chose qu'une élévation de sa température intérieure; mais si la thermométrie buccale offre des inconvénients, la thermométrie rectale n'en est pas tout à fait exempte, et pour être moins nombreux, ils me paraissent être plus graves. Il s'agit en effet d'observer pendant l'*acte même* de l'ascension, ce qui est possible pour la bouche, impossible pour le rectum; il est vrai que l'arrêt inévitable pour l'introduction du thermomètre, etc., est de courte durée; mais, d'après les observations de MM. Marcet et Lortet, il est suffisant pour faire disparaître l'abaissement de température et pour faire remonter celle-ci au-dessus du niveau initial. La rapidité de ce renversement parle en faveur de la thermométrie buccale, car la respiration, fortement accélérée par l'acte de l'ascension, ne revient pas à son rythme normal en un délai aussi bref; cependant, la source d'erreur continuant, l'erreur devrait persister, elle aussi, ce qui n'est pas. Il est indispensable de s'adresser à des régions qui ne soient pas exposées au refroidissement par la ventilation respiratoire, et qui permettent l'observation pendant l'*acte* de l'ascension. Voici comment a procédé M. le Dr Marc Dufour, de Lausanne [1] :

[1] Thèse de l'Université de Zurich, 1865, p. 57 et suiv.

il a introduit la boule du thermomètre dans le creux de l'aisselle et a enveloppé de coton toute la région par où elle eût pu recevoir l'impression de la température extérieure; il gravissait alors rapidement un escalier de 17 mètres de hauteur; à la première montée il y eut une diminution de 0°.2, à la seconde de 0°.1; *dès que la montée cesse,* la température commence à s'élever, et continue à s'élever pendant 7 à 9 minutes après que tout mouvement a cessé; *la descente* ne produit rien de semblable. M. le professeur Fick a observé le même fait sur lui-même, par la méthode buccale. M. Dufour pense que s'il avait eu à sa disposition une rampe beaucoup plus longue, il aurait obtenu un abaissement plus considérable; je ne le crois pas, parce que le résultat des quelques observations que j'ai pu faire ne confirme pas cette supposition; l'abaissement est très passager et se trouve bientôt couvert et dépassé par l'échauffement dû aux phénomènes accessoires qui résultent d'un violent exercice:

En 1883, ayant à ma disposition un homme et un chien, tous deux munis de fistules gastriques de 3 centimètres de diamètre, j'en ai profité pour fixer un thermomètre dans l'estomac, de façon à pouvoir l'observer à chaque instant. Or, pendant l'ascension rapide d'un très long escalier, représentant un dénivellement d'environ 50 mètres, l'homme m'a plusieurs fois donné, le matin, à jeun, un abaissement de 2 à 3 dixièmes de degré, une fois de 0°.4, *au commencement de la montée,* — mais qui disparaissait déjà et était remplacé par une élévation avant l'achèvement de la montée, élévation provenant de l'*excès* de chaleur dû aux réactions chimiques, mais précédée par un *déficit,* dû, sans doute, au travail mécanique considérable.

Lorsque le patient prenait un petit verre immédiatement avant l'expérience, cet abaissement ne se manifestait pas; cette modification de la méthode eut auprès de lui un tel succès, qu'il se mit à l'appliquer avec un zèle digne d'une meilleure cause et me rendit impossible le retour à la méthode non modifiée. C'est alors que je m'adressai à mon chien, qui me donna à plusieurs reprises un résultat assez net dans le même sens; je n'ai pas pu multiplier les observations, car chacune d'elles me coûtait régulièrement le thermomètre employé, que le patient quadrupède réussissait toujours à briser; l'abaissement m'a paru plus marqué chez le chien; une fois il a atteint 8 à 9 dixièmes de degré, pendant une ascension très rapide; la descente et la marche horizontale au pas accéléré ne le produisaient point.

Il paraît donc qu'au moment où l'organisme est appelé à passer tout à coup du repos à une forte activité entraînant un travail positif à valeur P × H très considérable, les phénomènes chimiques qui accompagnent habituellement l'activité musculaires ne suffisent pas pour dégager une quantité de chaleur suffisante pour couvrir le déficit correspondant au travail.

La méthode thermométrique a été appliquée par M. Béclard, non pas à l'organisme entier, mais aux membres mis en activité, aux muscles du bras. Il a trouvé que toutes les fois qu'il mettait ces muscles en activité le bras s'échauffait, mais qu'il s'échauffait un peu moins dans le cas où ces contractions servaient à accomplir un travail mécanique positif, que dans celui où elles servaient simplement à tenir un poids immobile ou bien alternativement soulevé et abaissé, ce qui anéantissait le travail mécanique et restituait, pendant l'abaissement du poids, la chaleur consommée pendant son soulèvement. Il n'est donc pas exact de dire, comme M. Gautier le disait dans un récent article, que les expériences de M. Béclard démontrent que l'activité du muscle est corrélative de son refroidissement; elles démontrent au contraire que le muscle actif s'échauffe toujours, mais un peu moins lorsque son activité sert à soulever un poids que lorsqu'elle n'effectue aucun travail extérieur.

On peut se demander si, en général, des expériences quelconques pratiquées sur l'organisme entier, ou sur une extrémité qui reçoit encore le courant sanguin, méritent quelque confiance; on sait, en effet, combien l'exercice modifie rapidement et profondément le rythme et la profondeur de la respiration, la rapidité du pouls, l'innervation vasculaire superficielle et l'évaporation cutanée, — phénomènes qui rendent impossible de calculer les facteurs multiples et variables des légères variations thermiques dans un sens ou dans un autre que l'on observe pendant l'exercice; l'objection est assurément très grave quand il s'agit d'ascensions prolongées en plein air, comme celles de MM. Lortet et Marcet, F.-A. Forel et autres; mais je ne crois pas que toutes ces circonstances défavorables et toutes ces sources d'erreurs puissent entrer en ligne de compte dans des expériences comme celles de MM. Fick et Marc Dufour et les miennes, non plus que dans celles de M. Béclard. Mais il est certain que pour arriver à un résultat absolument sûr il faudrait pouvoir déterminer exactement qualitativement et quantitativement les réactions chimiques qui ont lieu pendant l'obser-

vation, ainsi que le nombre de calories qui correspond à ces réactions et voir ensuite si l'activité musculaire avec ou sans travail extérieur fait disparaître une partie de ces calories; bref, il faudrait recourir à la méthode calorimétrique accompagnée de la détermination quantitative des produits de décomposition. De telles expériences ont été tentées par M. A. Hirn, de Colmar, il y a une trentaine d'années; on a, à plusieurs reprises, critiqué sa manière de déterminer l'oxygène absorbé et l'acide carbonique exhalé et même la manière dont il déterminait les calories dégagées; quoi qu'il en soit, ces expériences ont donné un résultat très curieux, un déficit énorme de chaleur toutes les fois que le sujet accomplissait un travail mécanique positif et un surplus de chaleur insignifiant ou nul toutes les fois que le travail était négatif, aussi M. Hirn tire-t-il de ses recherches la conclusion que l'organisme vivant ne saurait être comparé à un moteur à calorique, car il faudrait pour cela non-seulement qu'il consommât de la chaleur pour fournir un travail positif, mais qu'il en accumulât lorsqu'il fournit un travail négatif. Or, dit M. Hirn, « c'est ce que l'expérience dément formellement » [1]. Ce résultat m'a vivement frappé lorsque, il y a longtemps déjà, j'étudiais l'ouvrage de M. Hirn; il me paraissait inadmissible que la machine vivante ne fût pas soumise comme toute autre machine à la loi universelle de l'équivalence thermodynamique et je me demandais s'il n'y avait pas un facteur caché qui serait la cause de cette exception apparente; il me vint alors à l'idée que si un déficit de chaleur constant avait lieu, aussi bien pendant le travail positif que pendant le travail négatif, il viendrait s'ajouter au déficit correspondant au premier et en faciliter la constatation en en augmentant la valeur, tandis que pendant le second, il viendrait neutraliser, en

[1] *Recherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur.* Paris 1858, page 110. Il est curieux que dans un autre ouvrage beaucoup plus répandu que le premier : *Théorie mécanique de la chaleur,* Paris 1875, à la page 50, M. Hirn dise : « Pour le mécanicien donc, l'homme qui élève un fardeau doit faire disparaître du calorique et celui qui résiste à un fardeau qui descend *doit produire* du calorique, et *c'est ce que l'expérience confirme.* » Cependant dans ce second ouvrage il n'est point fait mention de nouvelles expériences, faites peut-être avec de nouvelles méthodes, qui eussent donné un résultat différent, opposé à celui que les expériences décrites dans le premier ouvrage ont donné lorsque le travail était négatif; de sorte qu'on ne voit pas sur quoi est fondée la nouvelle assertion de M. Hirn.

partie du moins, le surplus qui doit se produire et rendre ainsi très difficile ou impossible la constatation de ce surplus; mais à quoi pouvait être due une consommation de chaleur commune aux deux cas opposés du travail positif et négatif? Au facteur physiologique qui est lui aussi commun à ces deux cas : à la contraction musculaire. Malheureusement cette supposition de l'existence d'un refroidissement de contraction dans les muscles actifs n'avait alors aucun appui expérimental, sauf celui que lui fournissait justement les expériences de M. Hirn et quelques faits isolés, épars dans la littérature physiologique et généralement répudiés : Solger, Meyerstein et Thiry avaient vu, dans leurs observations thermo-galvanométriques, une légère déviation dans le sens du refroidissement de la masse musculaire au début de la contraction; d'autres expérimentateurs n'ayant pas réussi à confirmer cette observation, elle fut attribuée à un défaut de la méthode expérimentale et il n'en fut plus question; cependant, les recherches subséquentes, faites avec les soins les plus minutieux, ont montré qu'il est bien réel et que dans certaines conditions il se manifeste avec toute la netteté désirable. S'il reste quand même difficile à constater et si, comme tout le monde l'admet, le muscle qui entre en activité s'échauffe dans la très grande majorité des cas, cela est dû, peut-être, à ce que l'on s'attache en général à expérimenter sur des muscles *aussi frais que possible*, c'est-à-dire bien nourris et saturés par conséquent de substances à décomposer, de sorte que la chaleur dégagée par les réactions chimiques accompagnant la contraction est plus que suffisante pour masquer le refroidissement dont il s'agit; s'il en est ainsi, le refroidissement en question doit être plus facile à observer sur des muscles moins frais, *plus ou moins épuisés* par une privation prolongée de la circulation du sang ou par des excitations fortes et fréquentes, qu'ils auraient subies avant l'expérience thermométrique. C'est en effet ce qui semble ressortir indirectement des expériences classiques de Heidenhain.

Heidenhain a constaté, en effet, qu'en faisant une série nombreuse d'expériences sur le même muscle qui, naturellement, se fatigue de plus en plus, on voit la quantité de chaleur dégagée pendant l'activité et mesurée par la déviation du galvanomètre, *décroître beaucoup plus rapidement* que l'énergie de la contraction, mesurée par le travail effectué; ainsi, par exemple, dans une de ses séries il indique à la première expérience 19.05 cen-

tigrammètres pour le travail et 6.5 degrés de l'échelle de son galvanomètre pour l'échauffement ; dans la dernière expérience sur le même muscle, le travail est encore 11.7, tandis que l'échauffement n'est plus que 1. Dans une autre série, dans la première expérience le travail est de 51.7 et l'échauffement de 7.5 ; à la dernière expérience de la même série le travail est encore 32.4, tandis que l'échauffement n'est plus que 2.5. Dans une troisième série, à la première expérience le travail est 108 et l'échauffement 12 ; à la dernière le travail est encore 38 et l'échauffement n'est plus que 2.5. En outre, toutes les fois que le muscle subit, entre une expérience et l'autre, une tétanisation qui le fatigue plus ou moins, il y a une *chute rapide* de l'échauffement, sans qu'il y ait toutes les fois une chute correspondante du travail. On voit, en somme, que l'échauffement, dans les dernières expériences de chaque série, est extrêmement faible, tandis que le travail est encore très appréciable, le tiers ou même la moitié environ de ce qu'il était au commencement. Si Heidenhain avait prolongé ses séries beaucoup plus qu'il ne l'a fait, n'est-il pas probable qu'à un moment donné, l'échauffement serait devenu nul et se serait peut-être même transformé en un refroidissement? Cela est d'autant plus vraisemblable que, dans ces expériences, il y a réellement, malgré l'*apparent* échauffement, un refroidissement *réel* mais masqué, ainsi que M. Marc Dufour l'a très bien fait ressortir; en effet, à chaque expérience, Heidenhain faisait exécuter au muscle trois contractions consécutives, de sorte que le poids était trois fois soulevé et nécessairement trois fois abaissé; il s'ensuit que le travail négatif annulait le travail positif et restituait au muscle la chaleur consommée par celui-ci; or, si on soustrait de la chaleur constatée par Heidenhain l'équivalent thermique indûment restitué, on obtient vers la fin de ses séries *des chiffres négatifs,* ce qui signifie que si le travail positif n'avait pas été annulé, le galvanomètre aurait indiqué un léger refroidissement du muscle au moment de son activité. A la rigueur, on devrait soumettre les chiffres de Heidenhain à une deuxième soustraction, car il a été démontré plus tard que toute extension d'un muscle l'échauffe, précisément comme le caoutchouc ; de sorte que la chute du poids soulevé par la contraction devait nécessairement produire dans ses expériences, non-seulement l'échauffement correspondant au travail négatif, mais encore l'échauffement correspondant à l'extension du muscle. C'est à éviter ces deux

surplus de chaleur, étrangers au processus de l'activité du muscle, que s'est attaché Danilewsky, dans son travail publié en 1880 dans le vol. XXI des archives de Pflüger. Ce qui n'était qu'une possibilité théorique, ou, si l'on veut, une probabilité dans les expériences de Heidenhain, est devenu une réalité dans celles de Danilewsky. Il s'est arrangé de manière à ce que toute l'influence de la chute du poids s'exerce sur un mince fil de caoutchouc au lieu de s'exercer sur le muscle et il a trouvé que, dans ces conditions, l'échauffement est toujours *beaucoup moins considérable*, à tel point que, dans quelques-unes de ces expériences, il a positivement et directement constaté le *refroidissement* du muscle; mais il trouve ce fait paradoxal et l'attribue à une circonstance indépendante de la contraction du muscle. Mais les recherches de Blix, publiées trois ans plus tard dans la *Zeitschrift für Biologie,* démontrent qu'il n'en est pas ainsi et que le refroidissement est dû bien réellement à l'activité du muscle; Blix a observé ce refroidissement avec une netteté et une constance parfaites, grâce à sa méthode expérimentale, qui lui permettait de calculer les variations thermiques du muscle d'après la première excursion du galvanomètre et qui le forçait de faire les expériences sur des muscles ayant séjourné beaucoup plus longtemps que d'habitude dans la chambre humide, afin d'obtenir d'abord un parfait équilibre thermique; c'est là une condition éminemment favorable, puisque ces muscles avaient, en attendant, consommé une grande partie des substances décomposables qu'ils contenaient, ce qui devait réduire au minimum les réactions chimiques, calorifiques, accompagnant leur activité; ils étaient dans un état analogue à celui des muscles des dernières expériences dans les séries de Heidenhain.

Blix a constaté que toutes les fois que le muscle en expérience se contractait sans accomplir le travail mécanique, le galvanomètre indiquait un léger échauffement, tandis que toutes les fois que sa contraction effectuait un travail positif, le galvanomètre déviait en sens contraire et indiquait ainsi un *refroidissement.*

Peut-on, après cela, douter que le muscle est un véritable moteur à calorique, qui transforme la chaleur en travail mécanique? Cependant, tout cela ne démontre pas encore que la *contraction* musculaire elle-même est un phénomène qui absorbe de la chaleur, même lorsqu'il ne sert pas à produire du travail positif. Il se peut que des recherches ultérieures réussiront à

dévoiler un refroidissement des muscles actifs se contractant *à vide;* il se peut aussi que, tant que le tissu musculaire conserve son irritabilité et est encore capable de se contracter, il contienne encore assez de substance décomposable pour que le refroidissement de contraction soit masqué par la chaleur provenant des réactions chimiques simultanées. Il y a cependant, dans les expériences de Danilewsky, une indication précieuse, favorable à l'existence réelle de ce refroidissement; il a trouvé, en effet, un équivalent thermique *trop élevé* relativement au travail positif que les muscles accomplissaient pendant ses observations, ce qui signifie que le muscle consomme plus de chaleur qu'il n'en faut pour fournir le travail accompli et qu'une perte de chaleur qui ne correspond à aucun travail extérieur vient s'ajouter au véritable équivalent thermique de ce travail; à quoi cette perte peut-elle donc correspondre, sinon *au travail moléculaire intérieur qui constitue la contraction musculaire?*

Cette question ne pourra assurément recevoir sa réponse définitive que lorsque nous aurons réussi à connaître dans tous leurs détails les réactions chimiques qui accompagnent l'activité musculaire, à déterminer exactement la quantité de chaleur qui leur correspond et à constater, au moyen de la méthode, non plus thermométrique, mais *calorimétrique*, si toute cette chaleur se retrouve comme telle au moment où le muscle se contracte, même sans accomplir de travail mécanique positif. Il n'est malheureusement guère probable que nos moyens d'investigation atteignent dans un avenir rapproché une perfection qui nous permette d'arriver à ce but.