

De la chaleur (animale) au travail (humain) : une certaine idée de l'activité corporelle mesurée au calorimètre (1780-1901)

From (animal) Heat to (human) Labor: a Precise Idea of Bodily Activity, Measured with a Calorimeter (1780-1901).

Barthélemy Durrive



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/ephaistos/4599>

DOI : [10.4000/ephaistos.4599](https://doi.org/10.4000/ephaistos.4599)

ISSN : 2552-0741

Éditeur

IHMC - Institut d'histoire moderne et contemporaine (UMR 8066)

Ce document vous est offert par Université de Bordeaux



Référence électronique

Barthélemy Durrive, « De la chaleur (animale) au travail (humain) : une certaine idée de l'activité corporelle mesurée au calorimètre (1780-1901) », *e-Phaïstos* [En ligne], VII-1 | 2019, mis en ligne le 30 avril 2019, consulté le 10 février 2022. URL : <http://journals.openedition.org/ephaistos/4599> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/ephaistos.4599>

Ce document a été généré automatiquement le 29 septembre 2020.

Tous droits réservés

De la chaleur (animale) au travail (humain) : une certaine idée de l'activité corporelle mesurée au calorimètre (1780-1901)

From (animal) Heat to (human) Labor: a Precise Idea of Bodily Activity, Measured with a Calorimeter (1780-1901).

Barthélemy DURRIVE

- 1 On rappelle volontiers en France que les intuitions de Lavoisier sur la chaleur animale font de lui un précurseur de l'énergétique biologique¹. Mais la contribution de l'illustre chimiste ne se limite pas, sur ce sujet, à un énoncé de principe : c'est aussi au niveau de la technique expérimentale que ses recherches ont joué un rôle de modèle. On voudrait suggérer ici comment l'intuition heuristique a évolué avec l'instrument de mesure – chez Lavoisier, mais aussi chez tous ceux qui ont travaillé dans son sillage². Pour suivre le développement historique de la technique dite de « calorimétrie », il faut commencer par définir cet objet. On peut par exemple le faire en citant une distinction clairement établie (en 1898) à « Chaleur » du *Dictionnaire de physiologie* dirigé par Charles Richet : pour mesurer la quantité de chaleur produite par un organisme vivant,

« on peut opérer par deux méthodes différentes : soit en mesurant directement le rayonnement, soit en appréciant indirectement la quantité de chaleur dégagée par la mesure des combustions chimiques effectuées »³. Ainsi, « ce sont des méthodes calorimétriques indirectes qui, de concert avec les méthodes calorimétriques directes, donnent le vrai chiffre de la calorification animale⁴ ».

- 2 Du point de vue strictement technique – l'entrée du dictionnaire le rappelle bien –, la technique de la « calorimétrie directe » précède historiquement celle de la « calorimétrie

indirecte » ; à l'invention de la première, on associe généralement le nom de Lavoisier, et à la seconde celui de Berthelot. Mais du point de vue disciplinaire, ces deux inventions relèvent du même champ de recherche fondamentale : ce qu'on appellerait aujourd'hui la thermochimie biologique. Dans le présent article, on propose d'étudier comment ces deux dispositifs expérimentaux ont été utilisés par deux chercheurs du XIX^e siècle (d'ailleurs en débat l'un avec l'autre) pour poser une question tout à fait différente de celle que se posait Lavoisier : comment mesurer la part d'énergie métabolique (alors appelée la « force chimique » issue de la digestion) qui est allouée à la production de travail mécanique par l'agitation des membres ?

- 3 C'est donc en un sens l'histoire d'un détournement que l'on se propose ici de retracer brièvement – un détournement légitime sans doute (puisqu'il a préfiguré le test d'effort métabolique actuellement utilisé dans la surveillance du diabète, par exemple), mais un détournement tout de même, d'ailleurs d'autant plus riche en enseignements qu'on le reconnaît comme tel. En traversant les décennies, un instrument de mesure, développé dans un contexte particulier en réponse à une préoccupation précise (quantifier les échanges thermiques pour mieux décrire le phénomène de chaleur latente), a été utilisé pour répondre à une question non pas simplement différente mais issue littéralement d'un tout autre univers conceptuel : quantifier l'énergie métabolique dépensée par un sujet dans la production de travail mécanique. C'est la disproportion entre les changements – minimes – apportés à l'outil expérimental sur la période et les changements – radicaux – subis (dans la même période) par les théories au service desquelles on a mis cet outil qui nous pousse à parler de détournement. Lorsque cet instrument – issu de la physique – commence à être utilisé comme test d'effort, la communauté scientifique se divise sur la question de savoir si, en passant de l'aliment ingéré au travail mécanique fourni, l'énergie passe (ou non) par une forme thermique, comme dans le moteur à combustion interne. Cette vision naïve de l'être vivant comme moteur à explosion joue un rôle de médiation important dans l'évolution de l'utilisation du calorimètre sur la période : on a commencé à mesurer l'activité corporelle au calorimètre sans savoir au juste ce que l'on mesurait – c'est patent chez Hirn, qui le reconnaît et le revendique – mais en partant du principe qu'elle se comportait comme la chaleur. L'emprise d'une telle analogie (attachée à cet instrument de mesure comme son ombre) n'a pu être déjouée que par Chauveau, qui parvient à se demander ce que mesure exactement le calorimètre, grâce à une hypothèse audacieuse quant à la nature ultime de l'énergie métabolique. Or, à la même époque, les découvertes des biochimistes anglais clarifient définitivement la différence entre processus métaboliques et combustion, et il devient dès lors possible de traiter le déchet mesuré par le calorimètre pour ce qu'il est : un sous-produit parmi d'autres des réactions chimiques constituant le métabolisme intermédiaire.
- 4 En se concentrant sur le long siècle séparant 1780 de 1901, nous cherchons à décrire la période de flottement conceptuel où un instrument de mesure a non seulement été utilisé hors du référentiel théorique où il a été conçu mais où il a été aussi utilisé dans des théories fausses parce que trop imprégnées de métaphores. Ce seront seulement des découvertes obtenues dans un autre domaine (la biochimie) avec d'autres techniques expérimentales qui pourront fixer les conditions d'application légitime des techniques de calorimétrie à l'organisme.

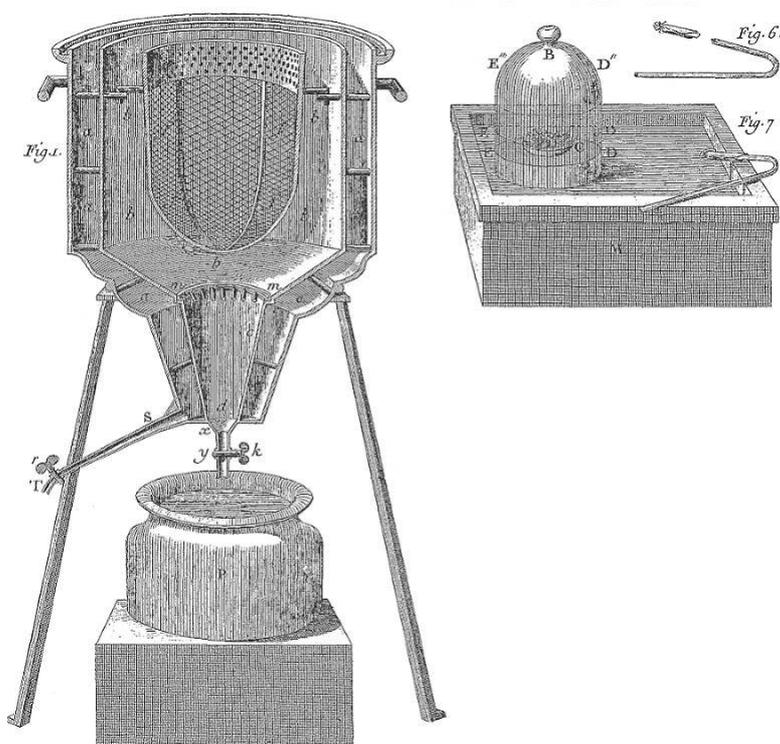
À l'origine : le calorimètre à glace de Lavoisier et Laplace (1780)

- 5 En mai et septembre 1777, Lavoisier présente à l'Académie deux mémoires qui se fondent à chaque fois sur la corrélation entre deux faits bien établis : d'une part, les mammifères entretiennent une température interne constante ; et d'autre part, une fraction de l'« *air pur* » (O_2) inspiré est transformée en « *air fixe* » (CO_2) avant d'être expiré. C'est ce qui lui permet de proposer l'analogie suivante :

« L'air pur, en passant par le poumon, éprouve donc une décomposition analogue à celle qui a lieu dans la combustion du charbon ; or, dans la combustion du charbon, il y a également dégagement de matière du feu ; donc il doit y avoir également dégagement de matière du feu dans le poumon dans l'intervalle entre l'inspiration et l'expiration, et c'est cette matière du feu sans doute qui, se distribuant avec le sang dans toute l'économie animale, y entretient une chaleur constante de 32,5 degrés au thermomètre de Réaumur. Cette idée paraîtra hasardée au premier coup d'œil ; mais avant de la rejeter ou de la condamner, je prie de considérer qu'elle est appuyée sur deux faits constants et incontestables [...]. Mais ce qui confirme encore que la chaleur des animaux tient à la décomposition de l'air dans le poumon, c'est qu'il n'y a d'animaux chauds dans la nature que ceux qui respirent habituellement, et que cette chaleur est d'autant plus grande que la respiration est plus fréquente – c'est-à-dire qu'il y a une relation constante entre la chaleur de l'animal et la quantité d'air entrée ou au moins convertie en air fixe dans ses poumons. »⁵

- 6 Ce qui n'est encore ici qu'une analogie fondée sur des corrélations qualitatives (où l'on voit pourtant déjà pointer l'idée de proportionnalité) va jouer le rôle d'hypothèse heuristique quantifiable dans l'expérimentation de l'hiver 1779 réalisée avec Laplace et relatée par ce dernier dans le « Mémoire sur la chaleur » co-signé avec Lavoisier. En effet, après avoir construit un calorimètre à glace – représenté ci-dessous à la figure 1 – dans le but de mesurer les « *chaleurs spécifiques*⁶ » de différentes substances (pures ou bien issues de mélanges), les auteurs se proposent d'utiliser ce dispositif expérimental pour mesurer la production de chaleur par un être vivant.

Figure 1 : Deux instruments utilisés par Lavoisier et Laplace dans les expériences du Mémoire sur la chaleur. Figure tirée de : Antoine-Laurent de LAVOISIER, « Mémoire sur la combustion en général », Histoire de l'Académie royale des sciences, année 1777, Paris, Imprimerie Royale, 1780, p. 599.



À gauche, le « calorimètre à glace » présenté par Lavoisier et Laplace dans le mémoire de 1780 (p. 408). La couche externe du récipient est remplie de glace pilée pour isoler la partie centrale de l'extérieur. Une once de charbon puis un cochon d'Inde sont placés dans le panier central, lui-même entouré de glace pilée. Les robinets permettent de récupérer la glace fondue au terme de chaque expérience, et mesurer ainsi la chaleur produite dans les deux cas. À droite, la cloche utilisée pour mesurer les proportions d'« air vital » transformées en « air fixe » par la combustion d'une once de charbon et par la respiration d'un cochon d'Inde dix heures durant.

Crédit. GALLICA. Bibliothèque nationale de France.

- 7 Dans une première étape, ils mesurent la quantité d'« air fixe » que produit (sous la cloche de la figure 1, emplie d'« air pur ») la combustion complète d'une once de charbon ; le résultat est de 3021 pouces. Dans une deuxième étape, ils mesurent la quantité d'« air fixe » qu'y produit cette fois la respiration d'un cochon d'Inde en dix heures de temps ; le résultat est de 224 grains. Dans la troisième étape, ils placent l'once de charbon à l'intérieur du calorimètre à glace, puis mesurent la quantité de glace fondue récupérée aux robinets une fois le charbon totalement consommé ; le résultat est de six livres et deux onces. Une première règle de trois leur permet de connaître la quantité de glace que ferait fondre la combustion du charbon le temps de produire une once d'« air fixe ». En appliquant alors une seconde règle de trois, ils peuvent prédire la quantité de glace que ferait fondre un cochon d'Inde placé dans le panier du calorimètre pendant dix heures (soit le temps de produire 224 grains d'« air fixe ») si sa respiration était parfaitement comparable à la combustion du charbon :

« On a vu précédemment que, dans la combustion du charbon, la formation d'une once d'air fixe peut fondre 26,69 onces de glace ; en partant de ce résultat, on trouve que la formation de 224 grains d'air

fixe doit en fondre 10,38 onces. Cette quantité de glace fondue représente donc conséquemment la chaleur produite par la respiration d'un cochon d'Inde durant dix heures⁷ ».

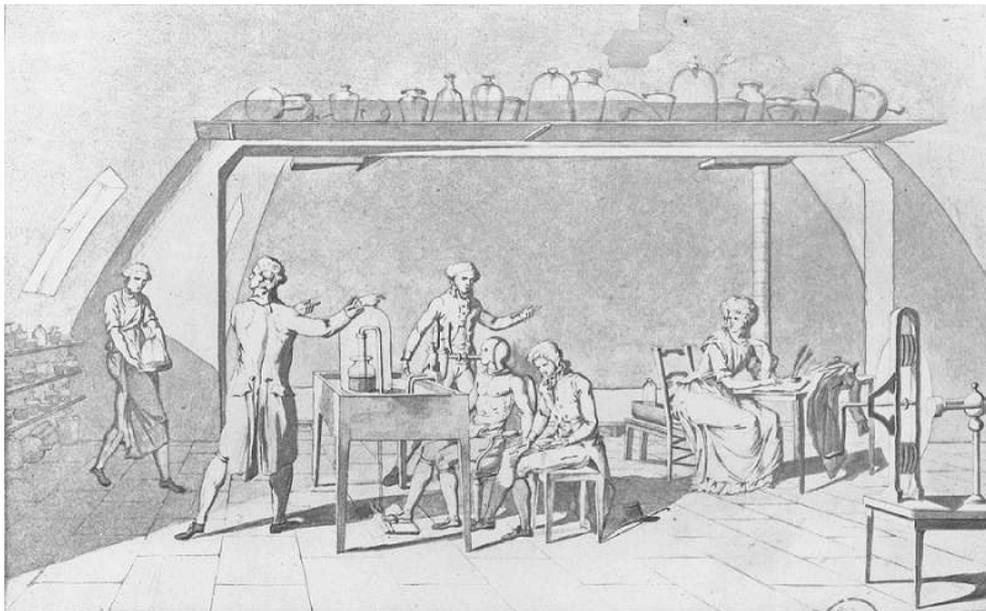
- 8 Une telle prédiction (que l'on remarque à la modalisation : « *doit fondre* ») est enfin mise à l'épreuve par une mesure directe dans la quatrième et dernière étape de l'expérience, qui amène la conclusion :

« On sait que la chaleur intérieure des animaux est toujours à peu près la même : sans le renouvellement continu de sa chaleur, toute celle qu'il avait d'abord se serait insensiblement dissipée, et nous l'aurions retiré froid de l'intérieur de la machine, comme tous les corps inanimés que nous y avons mis en expérience ; mais ses fonctions vitales lui restituent sans cesse la chaleur qu'il communique à tout ce qui l'environne, et qui (dans notre expérience) s'est répandue sur la glace intérieure dont elle a fondu 13 onces en dix heures. Cette quantité de glace fondue représente donc à peu près la chaleur renouvelée dans le même intervalle de temps par les fonctions vitales du cochon d'Inde. Il faut peut-être la diminuer d'une ou deux onces, ou même davantage, par cette considération que les extrémités du corps de l'animal se sont refroidies dans la machine quoique l'intérieur du corps ait conservé à peu près la même température [...]. En diminuant [*donc*] de deux onces et demie environ cette quantité de glace, on aura la quantité fondue par l'effet de la respiration de l'animal sur l'air ; or si l'on considère les erreurs inévitables dans ces expériences et dans les éléments dont nous sommes partis pour les calculer, on verra qu'il n'est pas possible d'espérer un plus parfait accord entre ces résultats. Ainsi l'on peut regarder la chaleur qui se dégage dans le changement de l'air pur en air fixe par la respiration comme la cause principale de la conservation de la chaleur animale, et si d'autres causes concourent à l'entretenir, leur effet est peu considérable. La respiration est donc une combustion, à la vérité fort lente mais d'ailleurs parfaitement semblable à celle du charbon. »⁸

- 9 Aux incertitudes de mesure près, donc, les deux savants estiment avoir obtenu la même chaleur pour la même production d'« *air fixe* » dans le cas du charbon et dans celui du cochon d'Inde. Lavoisier tire argument de ce résultat chiffré pour affirmer que son hypothèse de 1777 se révèle plus littérale que ne le laissait penser le lexique analogique dans lequel elle avait été d'abord formulée : il est possible qu'il s'agisse du même processus à l'œuvre dans le monde inerte comme dans les organismes vivants.
- 10 On peut sans aucun doute constater une très forte continuité entre cette conclusion de 1780 et l'expérimentation centrale du « Premier mémoire sur la respiration des animaux » de 1789. Comme Lavoisier l'explique lui-même⁹, en effet, la volonté de préciser cette relation de proportionnalité – notée dès 1777 – entre la fréquence des inspirations (liée notamment au degré d'activité physique) et la quantité d'« *air fixe* » produit va le conduire à expérimenter sur l'homme (un sujet dont on peut régler facilement les mouvements). Sur le plan de la technique expérimentale, par contre, le mémoire de 1789

diffère sensiblement de celui de 1780 puisqu'il n'y est plus question de calorimètre. Chaleur et mouvement sont deux réalités que Lavoisier n'associe pas, si bien que le dispositif expérimental utilisé – décrit à la figure 2 – ne comporte aucune prise de température. C'est à la seule élévation de poids qu'est corrélée, ici, la plus ou moins grande production d'« air fixe ».

Figure 2 : L'expérience de Lavoisier et Seguin sur laquelle se fonde le mémoire de 1789. Figure tirée de : Édouard GRIMAUX, *Lavoisier (1743-1794) d'après sa correspondance, ses manuscrits, ses papiers de famille et d'autres documents inédits*, Paris, Alcan, 1888, p.118.

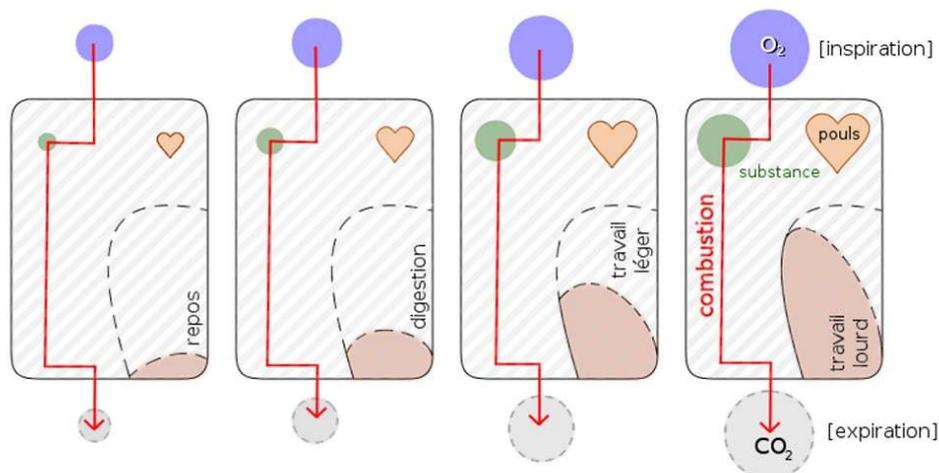


Il s'agit d'un fac-similé d'un dessin de Mme Lavoisier (qui s'est représentée elle-même en train de prendre les minutes de l'expérience). Le sujet d'expérimentation (ici Armand Seguin) soulève des sacs d'une main pendant qu'on lui prend le pouls, qu'un respiromètre mesure le volume de gaz expiré et que celui-ci est recueilli afin d'en analyser la proportion d'« air fixe ».

Crédit IRIS (bibliothèque numérique en histoire des sciences) : <http://iris.univ-lille1.fr/>

- 11 Nous avons synthétisé les résultats de cette expérimentation sur l'homme dans le schéma de la figure 3. L'intérêt épistémologique du propos de Lavoisier est double. D'une part, le rapport de proportionnalité qu'il établit est si précis que le savant n'hésite plus à voir (dans la co-variation du pouls, du quotient respiratoire et des efforts) un lien de causalité direct : c'est désormais la combustion de la substance même du corps qui fait mouvoir les membres¹⁰. D'autre part, il n'a été possible au savant d'établir ce rapport de proportionnalité qu'après avoir dimensionné tous les mouvements du corps comme des élévations de poids à une certaine hauteur ; autrement dit, à la suite de plusieurs auteurs du XVIII^e voire du XVII^e siècle¹¹, Lavoisier anticipe le concept actuel de travail mécanique¹².

Figure 3 : Schéma récapitulatif des corrélations supposées ou établies par Lavoisier dans l'expérience de 1789.



On constate une proportionnalité entre la quantité d'oxygène inspiré, la quantité de dioxyde de carbone expiré et le pouls. Or cette proportionnalité est établie non seulement entre ces trois éléments, mais elle l'est également avec l'intensité de l'activité physique – au repos, pendant la digestion (que Lavoisier considère explicitement comme un travail, du fait du mouvement des entrailles), lors d'un effort léger puis lors d'un effort important. Considérant donc que la respiration est une combustion, Lavoisier conclut alors que celle-ci « consomme à chaque instant une portion de la substance de l'individu ». Le savant précise que cette consommation est également proportionnelle à l'intensité des efforts fournis.

Crédit personnel de l'auteur

- 12 Mais pour la suite de notre propos, ce que ne fait pas Lavoisier est peut-être au moins aussi intéressant que ce qu'il est en train de faire. Il est en effet difficile au lecteur contemporain de suivre le raisonnement de Lavoisier (de découvrir que la cause des mouvements corporels est une combustion) sans que s'impose immédiatement à son esprit l'image de la machine à vapeur. Or c'est là, précisément, une analogie que ne fait pas Lavoisier. En 1770, l'Académie l'avait chargé d'une mission dans le Nord de la France et en Angleterre pour étudier les « *pompes à feu* » (machines de Newcomen) qui y servaient alors à puiser l'eau hors des mines¹³. Quand près de vingt ans plus tard – et après avoir conclu que l'origine de la chaleur animale était une combustion –, le savant conclut que la cause des mouvements corporels est une combustion, ces deux idées n'apparaissent jamais mises en lien *via* le modèle analogique que représenterait potentiellement la « *pompe à feu* ». Les historiens des sciences ont souvent souligné le fait que l'invention des machines à vapeur précède l'élaboration de la théorie scientifique permettant véritablement de les comprendre¹⁴ ; aussi paraît-il raisonnable de penser que, tant que la chaleur et le mouvement (conçu comme travail) apparaissent comme deux réalités incommensurables, l'analogie entre le corps et un moteur thermique ne présente aucune valeur ajoutée explicative.
- 13 C'est précisément l'évolution de ce point théorique – un peu plus de cinquante ans après l'exécution de Lavoisier – qui va ouvrir ce qu'on a parfois appelé « *l'ère du moteur humain* »¹⁵ (du début des années 1840 au début des années 1920), c'est-à-dire la période où l'assimilation de l'organisme à un moteur thermique va fonctionner à plein et prendre un sens de plus en plus littéral, jusqu'à son dépassement par les avancées dans l'étude du métabolisme intermédiaire (à partir de la découverte du cycle de l'acide lactique par

Archibald Hill en 1922). Or la calorimétrie a joué un rôle décisif dans cette « ère du moteur humain » : c'est ce que l'on tentera de montrer maintenant.

Au tournant : le calorimètre hybride de Gustave-Adolphe Hirn

- 14 Si Julius Robert Mayer est pris (de son vivant même) dans une querelle de priorité avec James Joule pour la première formulation de l'équivalent mécanique de la chaleur et avec Hermann von Helmholtz pour celle du principe de conservation de l'énergie, il est plus facile de lui attribuer en propre une troisième priorité, cette fois incontestable : il est en effet le premier à avoir l'idée d'utiliser les équations de la thermodynamique naissante pour tenter d'établir le bilan énergétique d'un organisme fournissant un effort. En 1845, c'est sous la forme d'une expérience de pensée quantitative qu'il s'efforce de prouver que les performances physiques d'un cheval de trait et d'un robuste ouvrier (la quantité de kilogrammètres qu'ils fournissent en une journée) peuvent être déterminées à partir d'une analyse chimique de leur ration alimentaire. En effet – raisonne Mayer¹⁶ –, puisque le bilan énergétique (rapport des entrées et des sorties) doit être équilibré, si l'on multiplie la masse de chaque ingrédient ingéré par son pouvoir calorifique spécifique, on obtiendra la quantité totale de « *force thermique* » qu'un animal au repos dépensera en calorification ; mais puisque cette « *force thermique* » n'est qu'une forme prise par la « *force chimique* » développée par les « *processus d'oxydation ayant lieu dans les capillaires* »¹⁷, si l'organisme quitte l'état de repos et effectue des mouvements, alors une partie de cette « *force chimique* » ne se convertira pas en « *force thermique* » (et donc *in fine* en chaleur), mais en « *force mécanique* » (et donc *in fine* en travail). Mayer cite explicitement le modèle de la machine à vapeur, allant jusqu'à se demander si les fibres musculaires jouent le rôle de combustible ou bien d'organe de transmission¹⁸.
- 15 Cette analogie enfin établie, sa fonction heuristique va faciliter non seulement les recherches théoriques, mais aussi l'inventivité expérimentale, car il n'est peut-être pas sans intérêt de remarquer que c'est un spécialiste des machines à vapeur – l'ingénieur et industriel alsacien Gustave Adolphe Hirn – qui, en tant que savant amateur et lecteur enthousiaste du mémoire de Mayer, va tenter de rendre expérimentale « *l'équation de Mayer* », et ainsi établir définitivement « *l'intuition de Lavoisier* ». Aussi bien Mayer que Hirn placent en effet leurs recherches sous le patronage du chimiste français, et de fait le dispositif expérimental mis en place par Hirn (présenté ci-dessous à la figure 4) n'est de son propre aveu qu'une adaptation du calorimètre de Lavoisier¹⁹.

Figure 5 : L'équation de Mayer (au centre, encadrée de gris) dimensionnée par Hirn afin d'être rendue expérimentale.

$$\begin{array}{c}
 \text{oxygène consommé} \times \text{pouvoir calorifique} \\
 \underbrace{\hspace{10em}} \\
 \boxed{x' = y' + z'} \\
 \underbrace{\hspace{10em}} \\
 \text{travail mécanique fourni} \\
 \text{équivalent mécanique de la chaleur}
 \end{array}$$

poids d'oxygène (en grammes)
calories générées par la combustion d'un gramme d'oxygène
traduction de l'élévation de température (mesurée) en calories
kilogrammètres rapportés à des kilogrammètres par calorie

Dans cette équation x' représente la quantité de « force chimique » issue de la digestion ; elle est supposée égale dans les deux étapes de l'expérience (qui sont réalisées à plusieurs jours d'intervalle). y' représente la « chaleur libre », c'est-à-dire la chaleur émise par le corps et mesurée aux thermomètres du dispositif expérimental ; elle varie entre les deux étapes de l'expérience, et c'est cette variation qu'il s'agit de mesurer. Enfin z' représente la proportion de « force chimique » allouée à la production de travail mécanique ; nulle lors de la première étape de l'expérience, elle prend une valeur connue lors de la seconde étape. Hirn choisit de tout exprimer ici en calories : x' est ainsi en $g \times (\text{cal} / g) = \text{cal}$; y' est exprimé directement en cal ; et z' est en $\text{kgm} / (\text{kgm} / \text{cal}) = \text{kgm} \times (\text{cal} / \text{kgm}) = \text{cal}$.

Crédit personnel de l'auteur.

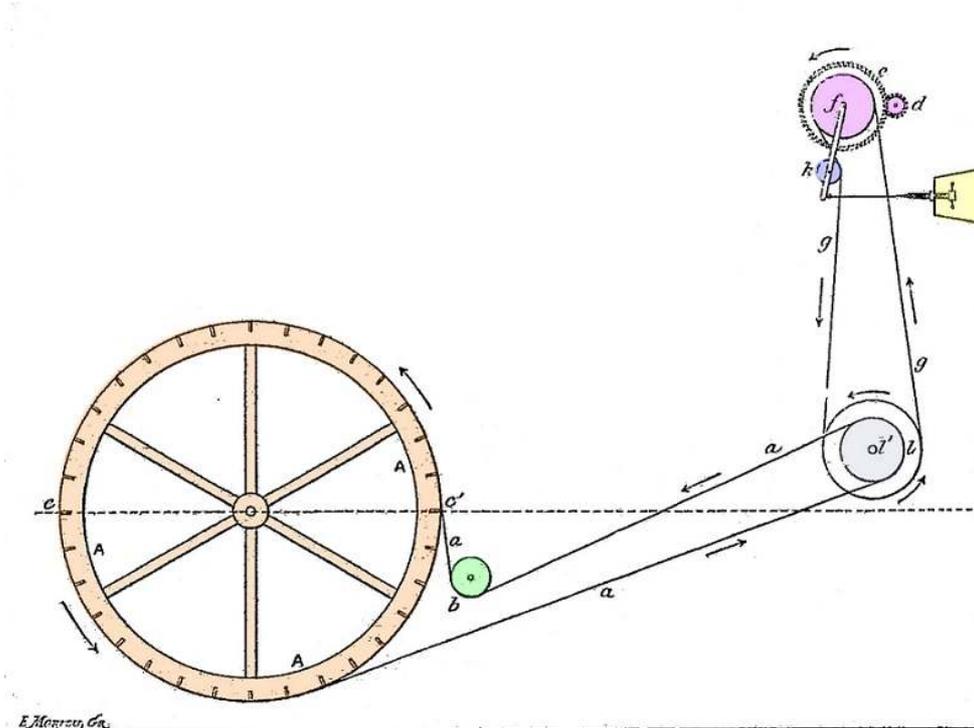
- 17 Une seconde différence entre les calorimètres de 1780 et 1857 tient au rôle qu'y joue le dioxyde de carbone. Lavoisier utilisait ce sous-produit de la respiration comme un indice permettant de quantifier l'intensité des combustions intra-organiques : d'une façon assez sommaire en 1780 – et Lavoisier précise d'ailleurs qu'il soupçonne que le froid augmente l'activité respiratoire du cobaye, ce qui fausse l'équivalence supposée des dix heures passées sous la cloche ou dans le calorimètre – puis de façon fine et différentielle en 1789. Au contraire, Hirn ne tient pas compte du CO_2 dans l'expérience qu'il réalise, puisque les gazomètres *E* et *F* ne sont là que pour faire office de poumons artificiels (une réserve d'air atmosphérique) afin que le sujet ne suffoque pas dans la guérite hermétiquement close. Cette différence de technique nous paraît intéressante car la mise au point des méthodes de calorimétrie indirecte (à la fin des années 1880) reviendra en quelque sorte à la façon lavoisienne, par-delà l'impasse où s'est enfoncé Hirn.
- 18 Enfin, une troisième différence entre les deux protocoles expérimentaux peut sans doute contribuer à expliquer pourquoi – au contraire de Lavoisier qui valide les théories qu'il a mises à l'épreuve – Hirn est forcé de considérer son expérience de 1857 comme un échec. Au lieu de constater, au moment du travail, un abaissement sensible de la chaleur y' dégagée par le corps – ce que prédisait la théorie – le savant mesure tout au contraire un accroissement sensible de cette chaleur perdue : la température de la guérite augmente, dans la seconde étape, par rapport à la première. Ce qui lui apparaît alors comme un paradoxe obsèdera le physiologiste Auguste Chauveau pendant plus de quinze ans (de 1888 à 1904) car, pour les deux auteurs, le principe de Mayer doit nécessairement être vrai – puisque le vivant ne peut pas faire exception aux lois de la thermodynamique. Il leur faut donc expliquer pourquoi, expérimentalement, le corps a tendance à s'échauffer pendant l'exercice. Comme l'indique la figure 5, Hirn emprunte à Mayer une sorte de raccourci méthodologique consistant à considérer que, dans un bilan énergétique, la

valeur des entrées (ici x' : les « *forces chimiques* », donc l'énergie issue de la digestion) nous est donnée directement par la mesure des sorties (ici y' et z'). Le raisonnement – explicite d'ailleurs chez ces deux auteurs – est le suivant : toute énergie qui entre dans le système doit nécessairement en sortir, sous une forme ou sous une autre, à un moment donné²⁰. Rien de tel n'était supposé par Lavoisier : dans l'expérience de 1780, seule l'utilisation du comburant (qui est instantanée) était prise en compte, et dans l'expérience de 1789, la « *substance* » du corps du sujet restait une inconnue dont on disait seulement qu'elle se consumait et qu'il fallait par conséquent la « *réparer* » en s'alimentant. Or c'est une intuition décisive de Claude Bernard (dont Chauveau est un disciple) que l'idée selon laquelle l'organisme ne peut utiliser comme combustible que ce qu'il a lui-même préalablement synthétisé comme tel²¹ ; la nuance est d'une telle importance que Claude Bernard préfère parler de « *fermentation* » plutôt que de « *combustion* » à propos du processus catabolique. Chauveau ne s'y trompera pas : le premier et principal reproche qu'il adresse à Hirn tient à ce que, raisonnant en pur physicien, il néglige l'ensemble du métabolisme intermédiaire et traite l'organisme comme un simple lieu de transfert d'énergie. Or c'est à nouveau la modification de la technique du calorimètre – quoique cette fois à partir de celui de Hirn – qui va amener Chauveau à résoudre l'énigme du physicien.

***In fine* : la rectification de Chauveau grâce à la calorimétrie indirecte**

- 19 Dès la parution (en 1888) de son mémoire intitulé *Du travail physiologique et de son équivalence*, Chauveau désigne nommément Hirn comme son adversaire car il en fait le représentant de tendance des physiciens intéressés par le vivant à négliger le métabolisme intermédiaire²². Pourtant le mémoire n'a pas de visée critique : bien au contraire, la thèse défendue est une hypothèse constructive pour apporter une solution à l'énigme posée par Hirn. À cette époque, Chauveau propose surtout une hypothèse théorique – et même simplement heuristique : il faut distinguer (dit-il) du travail fourni extérieurement par le muscle (travail mécanique) une autre forme de travail, appelé le « *travail physiologique* » (ou « *travail interne* ») qui n'est pas du travail mécanique mais une sorte de « *travail chimique* »²³. L'audace théorique de Chauveau est remarquable puisque son mémoire tente une démonstration (plus rhétorique qu'expérimentale, pour l'instant, il faut l'avouer) de l'idée suivante : à côté de la chaleur, de l'électricité ou du travail mécanique, il faut supposer l'existence d'une forme *sui generis* de l'énergie, une forme qu'elle ne prend qu'à l'intérieur des organismes vivants ; à moins de cela, il est en effet impossible de comprendre pourquoi le simple soutien d'une charge nous coûte de l'énergie (alors que nous n'y développons aucun travail mécanique).
- 20 Chauveau a donc très tôt cette intuition que le principe de Hirn est vrai tout en étant mal appliqué : une fois que l'on aura complété le bilan énergétique qu'il propose, tous les paradoxes auxquels il arrive seront levés. Or pour progresser dans cette voie, le physiologiste recrée et améliore le dispositif expérimental de Hirn – comme on peut le voir à la figure 6 – et va expérimenter avec ce système au moins jusqu'en 1901.

Figure 6 : La « roue de Hirn » telle que Chauveau l'a modifiée, ici en 1901. Figure tirée de : Auguste CHAUCHEAU, « Analyse de la dépense du travail moteur de la machine qui soulève le poids de l'homme occupé à faire du travail résistant sur la roue de Hirn. Comparaison de la dépense qu'entraîne ce même travail moteur accompli par l'homme en soulevant lui-même son poids sur la roue », Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences, vol. 132, 1901, p. 940.



Un moteur hydraulique (en haut à droite) actionne un jeu de pignons et de poulies permettant de régler finement la vitesse de rotation de la roue à aubes (notée A). Le sujet se place à l'extérieur de la roue, au point c (à gauche) pour remonter l'escalier infini, ou bien au point c' (à droite) pour le descendre. L'installation se situe à l'air libre, car c'est désormais par une méthode de calorimétrie indirecte que l'on mesure le taux de combustions intraorganiques du sujet : celui-ci place en bouche une soupape respiratoire permettant de quantifier le CO₂ expiré.

Crédit GALLICA. Bibliothèque nationale de France.

- 21 L'échec de son expérience avait été attribué par Hirn à la difficulté des mesures. Convaincu que la théorie de Mayer était vraie, il en avait tiré trois conclusions qui, bien que visiblement paradoxales, devaient selon lui amener le scientifique qui les testerait à valider effectivement la théorie. En vertu du principe de conservation de l'énergie, la production de travail positif (gravir l'escalier infini) s'accompagne d'un refroidissement de l'organisme ; en vertu de ce même principe, la production de travail négatif (le fait de descendre l'escalier infini) s'accompagne au contraire d'un échauffement du corps ; enfin – et toujours en vertu du même principe –, dans le simple soutien d'une charge, aucune dépense énergétique n'a lieu, et l'impression d'effort (que l'on peut ressentir) n'est due qu'à une forme d'échauffement du corps.
- 22 C'est sur la fausseté de cette dernière proposition que Chauveau va concentrer sa démonstration expérimentale. La mise au point de la « bombe calorimétrique » par Berthelot vient en effet de permettre de connaître la chaleur de combustion de chaque classe d'aliments : mesurer la quantité de gaz carbonique produite par le sujet dont on connaît le régime alimentaire donne donc désormais une information précise et fiable quant au taux de combustions instantané qui ont effectivement lieu dans l'organisme en

plein effort. La « *calorimétrie indirecte* » était née. Fort de ce moyen de mesure, le physiologiste utilise le dispositif de la figure 6 pour établir que, lorsqu'au moyen du jeu de pignons on baisse la vitesse du moteur jusqu'à égaler exactement l'effort fourni par le sujet, on crée une situation d'équilibre où la force développée par le marcheur et la force développée par le moteur hydraulique se compensent exactement. Or (remarque Chauveau) la calorimétrie indirecte nous montre que, dans cette situation, le sujet a effectivement une dépense énergétique importante : contre les physiciens, Chauveau décide de baptiser « *travail statique* » cette situation où – sans qu'il y ait déplacement du point d'application de la force – la force développée par les muscles consomme de l'énergie, loin d'être assimilable (comme chez Hirn) à la réaction normale d'une table où serait posé un poids.

- 23 La note présentée par Chauveau à l'Académie²⁴ d'où est tirée la figure 6 défend la notion de « *travail statique* » contre l'accusation d'oxymore (qu'y voit le physicien) en faisant la remarque suivante : dans la situation d'équilibre précédemment décrite, le moteur hydraulique dépense lui aussi de l'énergie, alors même qu'il ne produit pas non plus de travail mécanique au sens strict. Aussi, progressivement – à travers des étapes qu'il n'est pas possible de retracer ici – Chauveau précise sa notion initiale de « *travail physiologique* » en identifiant le mécanisme de *contraction musculaire* comme étant la source de la dépense énergétique dans le « *travail statique* » : le gonflement des muscles représente un travail mécanique au niveau des fibres musculaires et c'est précisément l'impossibilité de communiquer ce travail mécanique à l'extérieur (par le déplacement de la charge) qui entraîne sa dissipation sous forme de chaleur à travers le tissu musculaire. Généralisant enfin au « *travail positif* » et au « *travail négatif* » ce qu'il a trouvé dans le cas du « *travail statique* », Chauveau explique que la contraction musculaire représente une dépense énergétique qui sous-tend toute production d'effet mécanique par les membres : on comprend désormais pourquoi le corps s'échauffe pendant le travail, au lieu de se refroidir comme le croyait Hirn.

Conclusion : les conditions d'un détournement légitime

- 24 À la fin de sa vie (ou du moins à la fin de sa carrière scientifique), Chauveau en est arrivé à une formulation définitive de sa pensée. Comme l'écrit en 1912 son élève Jules Lefèvre :

« L'énergie totale d'une transformation musculaire est la somme algébrique des quatre énergies que cette transformation tient séparément du jeu de ses éléments réversibles et du jeu de ses éléments irréversibles. [...] La formule de Chauveau sera finalement :

énergie totale de contraction =										
équivalent calorique travail	du	+	énergie de contraction charge	de sans	+	énergie du soutien de la charge	+	énergie de vitesse	+	énergie des excitations

Cette nouvelle forme pourra prendre le nom d'équation de Chauveau. »²⁵

- 25 L'énigme de Hirn est ainsi définitivement levée : les paradoxes du physicien ne tenaient en réalité qu'au fait qu'il ne prenait en compte que le seul premier facteur de l'équation. Ce facteur constitue un « *élément réversible* » au sens où – comme l'avait effectivement compris Hirn – il s'agit de la dimension strictement thermodynamique de l'activité musculaire : l'énergie dépensée par l'organisme, sur ce seul facteur, pendant du « *travail positif* » est effectivement réabsorbée par l'organisme pendant du « *travail négatif* », sur ce facteur-ci. Les trois facteurs suivants relèvent du phénomène de la contraction des fibres musculaires, et le dernier facteur concerne l'influx nerveux.
- 26 Il devient finalement possible de voir comment l'évolution des techniques de la calorimétrie physiologique entre 1780 et 1901 a constitué un détournement qui – pour devenir légitime – a dû revenir sur un raccourci méthodologique. Aux origines, en effet, Lavoisier avait bien séparé deux techniques pour deux problèmes : la calorimétrie était destinée à élucider la question de l'origine de la chaleur animale, tandis que la mesure du pouls et du CO₂ expiré visait à montrer l'intensité supposée des combustions intra-organiques. Si la proportionnalité entre ces deux grandeurs était alors supposée, elle ne pouvait pas être étudiée en tant que telle puisque ces deux grandeurs n'étaient pas encore conçues comme commensurables. Au contraire, les premières tentatives pour appliquer la thermodynamique aux êtres vivants amènent Hirn à adapter le principe du calorimètre de Lavoisier à la lumière du paradigme énergétiste. L'idée que l'on pouvait décrire adéquatement le travail corporel en le considérant comme un simple transfert d'énergie était fondée, chez Hirn, sur la conviction que toute énergie mise en jeu dans les processus physiologiques finit par quitter l'organisme sous forme de chaleur – *délectable au calorimètre*. N'étant pas lui-même physiologiste, il estime que la mesure des sorties (*y'* au repos) lui fournira une mesure exacte quoiqu'indirecte des entrées (*x'*, soit l'énergie métabolique issue de la digestion). Mais un tel raisonnement – outre le fait qu'il ne reconnaît pas l'existence de stocks énergétiques dans l'organisme, et traite par conséquent le corps comme une machine qui fonctionnerait à flux tendu – a le défaut de niveler des processus de nature différente (mécanique, thermique, chimique) en les mesurant tous ensemble par leur effet dernier. Mesurer au contraire la dépense énergétique – donc la *source*, et non plus le *déchet* de l'activité organique – ouvre la voie, chez Chauveau, à une utilisation plus différenciée de la technique de calorimétrie indirecte : avoir mesuré l'irréductibilité de la dépense dans l'effort statique lui a en particulier permis d'isoler le facteur propre à la contraction musculaire – c'est-à-dire ce qu'on appellera désormais le métabolisme intermédiaire.

NOTES

1. Ainsi, par exemple : « *Désormais, après Lavoisier, toute fonction a dans son accomplissement une dimension de labeur du fait de son coût énergétique. Le travail n'est pas quelque chose qui vient au corps de*

l'extérieur, comme une exigence surimposée par la contrainte sociale, mais il est désormais le principe d'intelligibilité de tout agir [...] ; le travail est présent dans [...] l'activité cardiaque la plus régulière. » (FOREST Denis, « Fatigue et normativité », *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, vol. 191, n°1, 2001, p.12).

2. Tous les scientifiques cités dans le présent article se réclament explicitement de Lavoisier, et le citent.

3. ATHANASIU Ioan et CARVALLO Joachim, « Chaleur », in RICHET Charles (dir.), *Dictionnaire de physiologie*, vol. III, Paris, Félix Alcan, 1898, p.127.

4. *ibid.*, p.85.

5. LAVOISIER Antoine-Laurent de, « Mémoire sur la combustion en général », *Histoire de l'Académie royale des sciences, année 1777*, Paris, Imprimerie Royale, 1780, p.599-600.

6. LAVOISIER Antoine-Laurent de et LAPLACE Pierre-Simon de, « Mémoire sur la chaleur », *Histoire de l'Académie royale des sciences, année 1780*, Paris, Imprimerie Royale, 1784, p.361.

7. *ibid.*, p.404-405.

8. *ibid.*, p.405-406.

9. « Ces premières expériences [de 1780] donnaient déjà des idées générales sur la respiration : nous avons même entrevu qu'elle s'accélérait pendant la digestion, et que les animaux consumaient alors une plus grande quantité d'air. Nous avons également aperçu que le mouvement et l'agitation augmentaient encore ces effets – mais nous étions loin encore du but que nous nous étions proposé d'atteindre, et d'ailleurs après avoir opéré sur des animaux, nous désirions de faire des applications plus particulières à ce qui se passe dans la respiration humaine. » (LAVOISIER Antoine-Laurent de et SEGUIN Armand, « Premier mémoire sur la respiration des animaux », *Histoire de l'Académie royale des sciences, année 1789*, Paris, Imprimerie royale, 1789, p.574).

10. Ainsi : « Maintenant que l'expérience nous apprend que la respiration est une véritable combustion, qui consume à chaque instant une portion de la substance de l'individu ; que cette consommation est d'autant plus grande que la circulation et la respiration sont plus accélérées ; qu'elle augmente à proportion que l'individu mène une vie plus laborieuse et plus active, une foule de considérations morales naissent comme d'elles-mêmes de ces résultats de la physique. Par quelle fatalité arrive-t-il que l'homme pauvre qui vit du travail de ses bras, qui est obligé de déployer pour sa subsistance tout ce que la nature lui a donné de forces, consomme plus que l'homme oisif, tandis que ce dernier a moins besoin de réparer ? » (*ibid.*, p.578).

11. Voir, par exemple, sur ce point, la thèse de Yannick Fonteneau, *Développements précoces du concept de travail mécanique (fin XVII^e - début XVIII^e)*, soutenue le 27 juin 2011 à l'Université Lyon I.

12. Ainsi : « Nous sommes parvenus à constater deux lois de la plus haute importance. La première, c'est que l'augmentation du nombre des pulsations est assez exactement en raison directe de la somme des poids élevés à une hauteur déterminée [...]. La seconde, c'est que la quantité d'air vital consommé est [...] en raison composée des inspirations et des pulsations, c'est-à-dire en raison directe du produit des inspirations par les pulsations. Nous ne parlons en ce moment que de rapports. [...] Mais il n'en est pas moins vrai qu'il existe pour chaque personne une loi qui ne se dément pas, lorsque les expériences sont faites dans les mêmes circonstances et à des intervalles de temps peu éloignés. Ces lois sont même assez constantes pour qu'en appliquant un homme à un exercice pénible, et en observant l'accélération qui résulte dans le cours de la circulation, on puisse en conclure à quel poids, élevé à une hauteur déterminée, répond la somme des efforts qu'il a faits pendant le temps de l'expérience. » (LAVOISIER Antoine-Laurent de et SEGUIN Armand, « Premier mémoire sur la respiration des animaux », *op. cit.*, p.576).

13. LAVOISIER Antoine-Laurent de, « Calculs et observations sur le projet d'établissement d'une pompe à feu pour fournir de l'eau à la ville de Paris », *Histoire de l'Académie royale des sciences, année 1771*, Paris, Imprimerie Royale, 1774, p.17-44.

14. François Vatin souligne ainsi que le concept opératoire de travail mécanique est utilisé par la « *mécanique pratique* » d'ingénieurs plus d'un siècle avant d'être explicité et formalisé par la « *mécanique rationnelle* » de physiciens (VATIN François, « Physique du travail et économie de la production », dans *Le travail : économie et physique.*, Paris, Presses universitaires de France, 1993, p.11-15).
15. Une telle métaphore est brillamment analysée par Anson Rabinbach tout au long de son ouvrage : *The human motor : energy, fatigue, and the origins of modernity*, Berkeley, University of California Press, 1990.
16. MAYER Julius Robert, *Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhange mit dem Stoffwechsel*, Heilbronn, C. Drechsler, 1845. La seule traduction française disponible – MAYER Julius Robert, *Mémoire sur le mouvement organique dans ses rapports avec la nutrition*, Louis PÉRARD (trad.), Paris, Masson, 1872 – s'éloignant beaucoup de l'original, on pourra se reporter à la traduction en anglais de Robert Bruce Lindsay : MAYER Julius Robert, *The motions of organisms and their relation to metabolism*, dans LINDSAY Robert Bruce (éd.), *Julius Robert Mayer, prophet of energy*, Oxford, Pergamon Press, 1973, p.75-145.
17. *ibid.*, p. 98 dans l'original allemand, p. 99 dans la traduction française et p. 135 dans la traduction en anglais.
18. *ibid.*, p. 52 dans l'original allemand, p. 53 dans la traduction française et p. 110 dans la traduction en anglais.
19. Hirn réalise cette expérimentation en avril et mai 1857, et publie son protocole et ses résultats dans : HIRN Gustave-Adolphe, *Recherches sur l'équivalent mécanique de la chaleur*, Colmar, Bureau de la Revue d'Alsace, 1858.
20. Par exemple : « Chez ces hommes [les « hommes de peine » devant servir comme sujet de l'expérience], il ne peut pas se faire d'accumulation de ce que M. Sanson (par une extension jusqu'ici inusitée en thermodynamique) appelle « énergie ». Les aliments, pris en quelque sorte au fur et à mesure des besoins du mécanisme, sont utilisés continuellement à la calorification et à la réparation de ce que le travail mécanique use et fait éliminer de l'organisme. Chez ces hommes, tout est actuel, il ne s'opère aucune perte de poids qui ne soit réparée au moment opportun : rien n'est tiré d'un magasin qui puisse s'épuiser à la longue. Il y a, en ce sens, non sans doute similitude mais ressemblance très nette avec nos moteurs, auxquels aussi nous sommes obligés de fournir constamment les matériaux nécessaires à leur fonctionnement normal. » (HIRN Gustave-Adolphe, « La thermodynamique et le travail chez les êtres vivants », *Revue scientifique*, vol. 39, n° 22-25, 1887, p. 780-781).
21. Ainsi : « L'erreur presque inévitable au temps de Lavoisier fait encore loi pour beaucoup des contemporains : elle consiste à assimiler les oxydations et les processus chimiques qui se font dans l'organisme aux combustions directes ou aux actions chimiques qui se produisent en dehors de l'être vivant, dans nos foyers, dans nos laboratoires. Il en est tout autrement. [...] Il a régné dans la science une doctrine qui attribuait aux végétaux seuls le pouvoir de faire la synthèse des principes immédiats que les animaux détruisaient ensuite. Cette doctrine absolue ne pouvait pas subsister : les phénomènes de synthèse sont seulement prédominants chez les végétaux (où les manifestations fonctionnelles sont moins énergiques) tandis que les phénomènes de destruction ou de dépense vitale sont prééminents chez les animaux. Mais les deux ordres d'actions se rencontrent dans tous les êtres vivants : ils sont la contrepartie l'un de l'autre, ils se conditionnent et se complètent. » (BERNARD Claude, *Leçon sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*, vol. II, Paris, Baillière, 1879, p. 480-481).
22. « Au moment même où le grand principe de la conservation de la force faisait son apparition dans le monde scientifique, les physiciens en ont transporté l'application dans le champ de la biologie. L'un d'eux, même – M. Hirn – a institué la première expérience physiologique – restée, du reste, unique en son genre – sur l'équivalence thermique du travail de la machine animale. Mais les physiciens n'ont guère voulu prendre en compte considération que le point de départ et

le point d'arrivée, l'état initial et l'état final de l'énergie mise en œuvre par la plante ou l'animal vivant. » (CHAUVEAU Auguste, *Du travail physiologique et de son équivalence*, Paris, Administration des deux revues, 1888, p. 2).

23. *ibid.*, p. 3.

24. La figure 6 est ainsi tirée de : CHAUVEAU Auguste, « Analyse de la dépense du travail moteur de la machine qui soulève le poids de l'homme occupé à faire du travail résistant sur la roue de Hirn. Comparaison de la dépense qu'entraîne ce même travail moteur accompli par l'homme en soulevant lui-même son poids sur la roue », *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, vol. 132, 1901, p. 940.

25. LEFÈVRE Jules, « La bioénergétique musculaire », *Revue générale des sciences pures et appliquées*, vol. 23, 1912, p. 754.

RÉSUMÉS

L'évolution des techniques de mesure constitue un révélateur intéressant pour mettre en évidence l'évolution des conceptions scientifiques au service desquelles elles furent utilisées. Cet article propose un aperçu de deux grandes étapes (1789 et 1858) dans l'histoire de l'énergétique biologique, en les envisageant à travers l'évolution de la technique calorimétrique qui y a été à chaque fois utilisée. Le but est de voir comment un instrument, d'abord conçu pour la physique, a été adapté pour étudier un phénomène biologique – l'activité corporelle.

Evolutions in scientific theories often appear through the correlated evolutions in the measuring devices they rely on. This paper highlights two important steps (1789 and 1858) in the history of biological energetics, by presenting the technical differences between the calorimetry techniques which were involved each time. Such a comparison aims to show in what specific ways a scientific device first developed by physicists was adapted to measure a biological phenomenon: the bodily activity.

INDEX

Mots-clés : histoire des techniques, XIXe siècle, Europe, technique de mesure, physiologie du travail, énergétique

Index géographique : Europe

Index chronologique : XIXe siècle

Keywords : history of technology, 19th century, Europe, measuring techniques, work physiology, energetics

AUTEUR

BARTHÉLEMY DURRIVE

Agrégé de philosophie, docteur en philosophie et histoire des sciences, Barthélemy Durrive enseigne actuellement la philosophie dans le secondaire. Après une thèse consacrée à l'histoire

de la constitution du programme de recherches intitulé « physiologie du travail » en France au tournant du XX^e siècle, ses recherches portent actuellement sur l'histoire et l'épistémologie de l'ergonomie. Il est chercheur associé à l'IHRIM - Institut d'Histoire des Représentations et des Idées dans les Modernités (UMR 5317)