

les deux membres postérieurs de l'animal, les rendent solidaires l'un de l'autre.

Nous nous sommes donc servi, dans le principe, d'aiguilles construites sur les données de M. Becquerel, c'est-à-dire d'aiguilles à soudure médiane (fer et cuivre), tout en leur donnant plus d'épaisseur, car les aiguilles trop fines apportent au courant un obstacle qui diminue les déviations galvanométriques, de telle sorte que les différences minimales de température sont alors difficiles à saisir. Nos aiguilles, construites par M. Duboscq, avaient 8 centimètres de longueur et 2 millimètres d'épaisseur ; mais, après un certain nombre de tentatives, nous avons été obligé d'y renoncer, parce que, dans les muscles *en mouvement* dont nous cherchions à apprécier la température, ces aiguilles, qui suivent le mouvement des muscles, se déplacent sans cesse, si bien que la soudure, glissant dans la plaie, se présentait souvent au dehors, et tous les résultats se trouvaient renversés.

Les aiguilles à soudure *termino-latérale*<sup>1</sup>, employées par M. Dutrochet, offraient les mêmes inconvénients.

Dès lors nous avons fait construire de petits *hameçons* à deux tiges (fer et cuivre), dont la soudure correspond à l'ardillon (Voy. fig. 71).

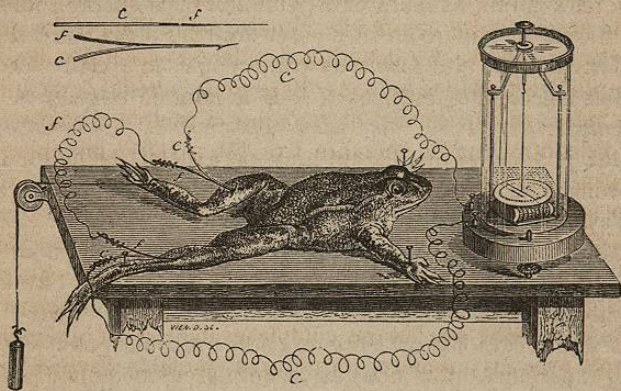


Fig. 71.

*Nota.* A la partie supérieure de cette figure, on voit : 1<sup>o</sup> une aiguille thermo-électrique (cuivre et fer, à soudure médiane); 2<sup>o</sup> une aiguille thermo-électrique (cuivre et fer), en hameçon, à soudure terminale.

Une fois introduites dans les muscles, nos aiguilles en hameçon ne sont pas sensiblement déplacées dans les divers mouvements de l'animal.

Ces aiguilles ont sur les aiguilles à soudure médiane encore un autre avantage, c'est qu'elles demeurent à poste fixe dans le circuit galvanométrique, et qu'il n'est pas nécessaire de rompre le circuit à chaque

<sup>1</sup> Les aiguilles à soudure termino-latérale sont composées de deux métaux, cuivre et fer : mais les deux pièces, au lieu d'être soudées par leur partie moyenne, le sont à l'une de leurs extrémités. C'est cette *extrémité-soudure* qui, affilée en pointe, est enfoncée dans les tissus.

expérience (pour introduire les aiguilles dans les parties), et de le rétablir ensuite. Le circuit est toujours fermé ; c'est ce qu'on concevra facilement en jetant les yeux sur la grenouille en expérience représentée dans la figure 71.

Je me bornerai à indiquer ici le procédé d'expérience le plus démonstratif ; il consiste à solliciter les deux modes de contraction *simultanément* sur le même animal. La grenouille n'est soumise à aucune mutilation ; elle est fixée solidement par les deux membres antérieurs. L'un des membres postérieurs est maintenu fixé dans l'extension, tandis que l'autre est libre, et peut mouvoir un poids léger. Les hameçons thermo-électriques, faisant partie du circuit galvanométrique, sont introduits dans chaque mollet (Voy. fig. 71).

La contraction musculaire des deux membres postérieurs est sollicitée par le courant d'une pile, de la même manière que précédemment. L'aiguille du galvanomètre accuse ici d'une *manière directe* l'excès de l'une des températures sur l'autre, et cet excès est en faveur du *membre fixé*, c'est-à-dire que la température s'élève plus dans le membre qui se contracte étant fixé que dans celui qui peut *mouvoir* et *soulever* un poids.

Mais, en examinant avec attention les données de ces expériences, il est facile de se rendre compte de l'impossibilité d'apprécier ainsi la véritable valeur relative des quantités de chaleur produites dans les deux états de contraction des muscles. Il se peut, en effet, que sur les grenouilles mises en expérience, et quoique la source d'excitation fût la même, la contraction du membre fixé fût parfois plus énergique que celle du membre chargé d'un poids, la grenouille proportionnant, en quelque sorte, l'énergie de la contraction musculaire à la résistance à vaincre. En second lieu, et c'est là surtout ce qui ne permet pas de tirer de ces expériences des résultats précis, le phénomène du poids qui *monte* et qui *descend* détermine dans le muscle qui le *soulève* et qui le *soutient à la descente*, des actions complexes dont il est impossible de tenir compte avec les animaux, et qu'il n'est possible d'apprécier que sur l'homme.

On peut, ainsi que l'ont fait MM. Becquerel et Breschet dans leurs expériences, introduire des aiguilles thermo-électriques dans les muscles de l'homme ; mais, si ce genre d'expérience peut être tenté par hasard<sup>1</sup>, il n'est réellement pas pratique quand il s'agit de répéter les expériences un grand nombre de fois. Cette introduction, assez difficile par elle-même, peut n'être pas sans danger, et nous ne pouvions évidemment pas l'essayer avec nos hameçons thermo-électriques, qui ne sauraient être retirés des tissus sans de profondes dilacérations.

Dès lors, nous nous sommes demandé si la température des muscles

<sup>1</sup> M. Becquerel a répété trois fois cette expérience, en introduisant son aiguille à soudure médiane dans le muscle biceps brachial. M. Becquerel fils et M. Burguières, ancien médecin sanitaire en Égypte, se sont prêtés à l'expérience.

ne pouvait être appréciée que dans leur épaisseur; s'il n'était pas possible de la constater à leur surface, ou même au travers de la peau, surtout quand celle-ci est fine et peu ou point doublée de graisse. Or, en appliquant sur la peau, à la surface du biceps brachial, au niveau de sa région moyenne, un thermomètre dont le réservoir était engagé sous les vêtements, et maintenu par une bande épaisse de laine enroulée autour du bras, nous avons constaté que ce thermomètre peut accuser, au bout de quelques minutes, des élévations de température de 1 et même de 2 degrés centigrades, lorsqu'on contracte énergiquement ce muscle; nous nous sommes dès lors trouvé en possession d'une méthode qui nous a permis de faire un grand nombre d'expériences dans les conditions les plus variées.

On comprendra aisément l'avantage qu'il y a à expérimenter sur l'homme. Dans les expériences sur les animaux, en effet, la contraction, *suscitée* dans les muscles par l'application d'un excitant, peut à tout instant être troublée ou compliquée par des contractions *volontaires*, sur lesquelles nous n'avons pas de prise. En outre, dans les expériences sur les animaux, l'excitant de la contraction musculaire est nécessairement le courant d'une pile ou celui d'une bobine d'induction; dans les expériences sur l'homme, au contraire, le principe d'activité, c'est la volonté elle-même, c'est-à-dire l'excitant par excellence de la contraction, et en même temps le plus délicat. Chez l'homme, l'intensité de l'action musculaire peut être directement et rigoureusement mesurée par la quantité connue des résistances, c'est-à-dire par des poids; elle peut être *graduée, accélérée, retardée, etc.*

Les thermomètres dont nous nous servons dans nos recherches ont été construits de telle sorte que l'échelle de leurs excursions est comprise entre  $+ 31^{\circ}$  et  $+ 37^{\circ}$  centigrades. Chaque degré présente 50 divisions. La contraction musculaire étant capable, suivant son énergie et sa durée, d'élever la température du muscle (prise à la surface de la peau) de 60, de 80, ou même de 100 divisions de nos thermomètres, l'étendue de ces excursions fournit un champ suffisamment vaste à nos expériences de comparaison.

Les expériences que nous avons entreprises se composent toutes de deux parties constituant les deux termes de comparaison entre l'état statique et l'état dynamique de la contraction musculaire. Notre méthode consiste à tenir en équilibre, dans une expérience, et dans l'autre à mouvoir, avec des vitesses variées, et suivant des procédés particuliers, des poids égaux, à l'aide de l'avant-bras fléchi sur le bras, en tenant compte du temps écoulé à l'aide d'un chronomètre à secondes <sup>1</sup>.

S'agit-il d'une expérience *dynamique*? l'équilibre de température étant obtenu dans le bras entouré de sa bande et pourvu de son thermomètre,

<sup>1</sup> Il est un certain nombre de conditions dont la rigoureuse observation est indispensable. Nous renvoyons le lecteur à notre mémoire original. (Voyez l'indication bibliographique à la fin du chapitre.)

l'expérimentateur se place sur la chaise d'expérience, saisit avec sa main droite la manette D, et avec sa main gauche la manette G, ainsi que le représente la figure 72. La température de départ étant notée et le métronome mis en marche, un aide enlève la cale *d* qui supporte le poids P;

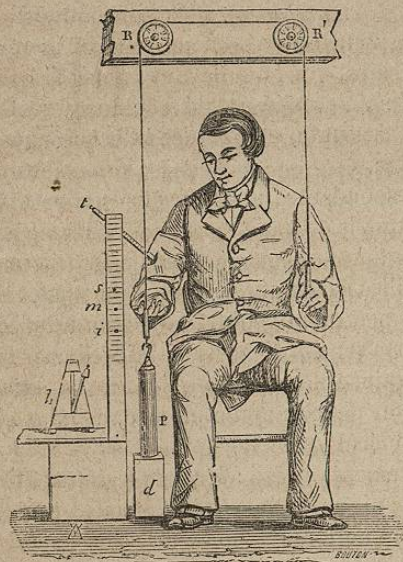


Fig. 72.

- R, R', poulies.  
*l*, thermomètre engagé jusque sur la peau, au travers des vêtements. Le bras est en outre recouvert d'une bande épaisse de laine.  
 P, poids.  
*d*, cale.  
*smi*, échelle graduée à laquelle sont rapportés les mouvements du bras. Le point *m* correspond à la flexion à angle droit de l'avant-bras sur le bras.  
*h*, métronome, ou chronomètre sonore.

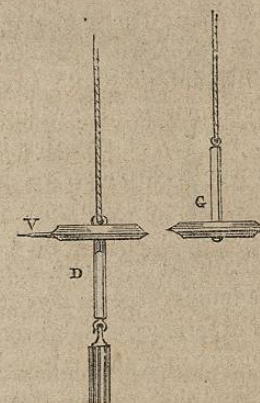


Fig. 73.

- Cette figure représente les manettes en partie cachées par les mains de l'expérimentateur dans la figure 72.  
 G, manette du côté gauche.  
 D, manette du côté droit.  
 V, index à l'aide duquel l'expérimentateur gradue le mouvement du bras.

cette cale est d'une hauteur telle, qu'au moment où la main saisit la manette D, l'index V de cette manette correspond au point *i* de la règle graduée. Alors l'expérimentateur soulève le poids P en lui faisant parcourir une excursion de 16 centimètres, mesurée sur la règle graduée (que l'expérimentateur ne perd pas des yeux), entre les points *i* et *s*. Aussitôt que l'index est arrivé en *s*, la main gauche, qui était restée inactive, *soutient* alors le poids à la descente, de manière que le bras droit s'abaisse *à vide*, tout en conservant sa position. Quand l'index de la manette D est revenu au point *i*, le bras droit redevient actif, et soulève de nouveau le poids P de *i* en *s*, et ainsi de suite, pendant un intervalle de temps de cinq minutes. L'expérimentateur compte avec le plus grand soin le nombre des mouvements de montée et de descente du poids, et il leur donne une constante régularité en les harmonisant, à l'aide de l'o-

reille, avec les battements du métronome <sup>1</sup>; puis l'expérimentateur se replace dans le repos, et il attend que l'excursion thermométrique soit achevée.

Pendant un intervalle de temps de cinq minutes, la main droite a donc soulevé un poids d'une certaine hauteur, puis elle l'a abandonné (tandis que la main gauche le soutenait à la descente), puis elle l'a repris, à la partie inférieure de sa course, pour le remonter encore, et ainsi de suite, c'est-à-dire, en d'autres termes, que la puissance musculaire du bras droit a été employée à *monter* un certain nombre de fois le même poids, sans avoir à le soutenir à la descente, et avec des intervalles réguliers et égaux d'activité et d'inaction.

Dans l'expérience statique correspondante (qui, pour être comparable, doit être intermittente aussi), le poids est maintenu en équilibre par la contraction musculaire dans la position correspondante au point moyen *m* (Voy. fig. 72), et avec des intervalles égaux et réguliers d'inaction, mesurés par le chronomètre, le tout pendant une durée de cinq minutes.

Le procédé d'expérience que nous venons d'esquisser brièvement consiste donc, en définitive, à déterminer dans les muscles de la région antérieure du bras une contraction de commune mesure, pendant le même temps, *avec* ou *sans* travail mécanique extérieur.

Ces expériences établissent nettement ce fait: lorsque la contraction musculaire exécute un travail mécanique, il se produit dans le muscle une quantité de chaleur plus faible que lorsqu'une contraction de *même mesure* n'est point accompagnée d'effets mécaniques extérieurs.

D'autres expériences ont été faites à l'aide d'un poids *libre* soutenu dans la main à l'aide d'une manette (Voy. fig. 74); elles ont consisté à maintenir en équilibre, non plus d'une manière intermittente, mais d'une *manière continue* et pendant un certain laps de temps (cinq minutes), un certain poids. Les expériences de comparaison ont consisté à exécuter avec l'avant-bras, chargé du même poids, et pendant le même temps, un mouvement de *va-et-vient*. Dans ce mouvement de va-et-vient, la main n'abandonne le poids à aucun moment de l'expérience; elle ne descend pas à vide, comme dans les expériences précédentes, mais elle *soulève* ce poids à la montée et elle le *soutient* à la descente.

Lorsque l'expérimentateur veut procéder à une expérience d'équilibre, il se place sur la chaise d'expérience, en tenant compte des précautions indiquées; il engage sa main sous la manette, tandis qu'un aide enlève la cale *d* (Voy. fig. 74); puis il soutient le poids *P* pendant cinq minutes consécutives, comptées par le métronome.

<sup>1</sup> Ces mouvements de descente et de montée peuvent être exécutés, soit rapidement, soit lentement. On peut, par exemple, les faire coïncider avec la seconde; on peut, si l'on veut, et en réglant autrement le métronome, exécuter un mouvement de montée qui dure deux secondes, et un de descente qui dure le même temps, etc. Mais il importe, quel que soit le mode d'expérience auquel on s'arrête, que les temps d'*activité* et d'*inactivité* soient égaux entre eux, afin que les expériences soient comparables entre elles.

L'expérimentateur, les yeux fixés sur la règle divisée, maintient l'index de la manette en regardant du point *m*, de manière que la flexion à angle droit de l'avant-bras sur le bras reste la même pendant toute la durée de l'expérience. Au bout de cinq minutes, l'aide replace la cale *d*, et l'expérimentateur passe sur le fauteuil de repos, pour attendre l'excursion finale du thermomètre d'expérience.

Pour procéder à l'expérience dynamique de comparaison, l'expérimentateur, après avoir pris place sur la chaise d'expérience et fait enlever la cale *d*, imprime à la main chargée du même poids, pendant cinq minutes consécutives, une suite de mouvements d'élevation de *i* en *s*, et de mouvements de *s* en *i*, c'est-à-dire une succession de mouvements de bas en haut et de haut en bas.

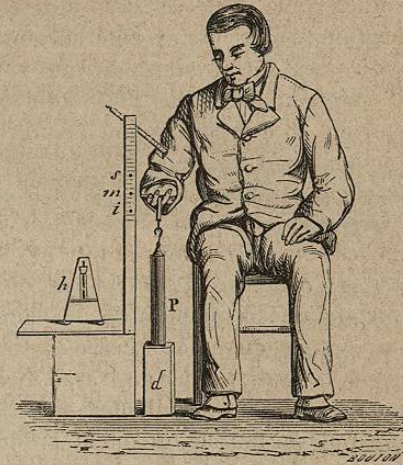


Fig. 74.

Ce qui ressort clairement de ces dernières expériences, c'est que la chaleur développée dans les muscles et perçue par le thermomètre d'épreuve a été *la même*, soit que le bras restât en équilibre de contraction, soit qu'il fût animé de mouvements.

Dans le mode d'expériences mis ici en usage, il s'est donc produit dans les muscles des quantités égales de chaleur. Au premier abord, les résultats de cette seconde série d'expériences paraissent en contradiction avec ceux de la première série; mais, pour peu qu'on y réfléchisse un instant, il est facile de se convaincre qu'ils en sont au contraire la confirmation la plus décisive, et qu'ils constituent, par une autre voie, une démonstration non moins claire du principe précédemment établi; c'est ce qu'il nous sera aisé de faire comprendre en peu de mots.

Si, d'un côté, la montée du poids, pendant deux minutes et demie, a tendu à diminuer la température musculaire dans la proportion du travail mécanique produit; d'un autre côté, la descente du même poids (descente qui n'est pas libre, soutenue qu'elle est par le muscle contracté) détermine dans les muscles un effet *précisément opposé*, qui tend à augmenter la température musculaire suivant une proportion équivalente à la *destruction* d'une quantité égale de travail mécanique. D'un côté, il y a tendance à l'élevation de la température, de l'autre, il y a tendance à l'abaissement; ces deux effets, mesurés par le même poids, se compensent; on doit avoir, et on a en effet, dans l'expérience de mouvement, une température égale à celle de l'expérience d'équilibre. On peut exprimer plus brièvement ce qui se passe ici, en disant que, pendant la moitié de la durée de l'expérience qui correspond à l'éleva-

tion du poids, le travail mécanique extérieur est *positif*, et que pendant l'autre moitié (correspondant à la descente du poids) le travail mécanique extérieur est *négalif*. Ces deux valeurs, étant égales, se détruisent et le travail utile est égal à 0, c'est-à-dire qu'il est nul.

En résumé, cette seconde série d'expériences prouve que le mouvement de va-et-vient, exécuté suivant le procédé indiqué, produit successivement un travail mécanique positif et un travail mécanique négatif qui s'annulent; de telle sorte que la contraction de mouvement équivaut ici à la contraction d'équilibre, et que ces deux modes de contraction (étant d'ailleurs d'égale mesure, puisque le poids est le même) développent des quantités égales de chaleur.

Des expériences qui précèdent et d'autres encore, dans le détail desquelles nous ne pouvons entrer ici, il résulte qu'en se plaçant dans de bonnes conditions d'expériences, on peut constater sur les muscles de l'homme que la quantité de chaleur développée par la contraction est plus grande quand le muscle exerce une contraction statique, c'est-à-dire non accompagnée de travail mécanique, que lorsque cette contraction produit un travail mécanique *utile*. La quantité de chaleur qui disparaît du muscle, quand il produit un travail mécanique extérieur, correspond à l'effet mécanique produit.

La contraction musculaire ne doit donc pas être envisagée (au point de vue de la production de chaleur) comme on l'a fait jusqu'ici en physiologie. Il n'y a que cette partie de l'action musculaire non utilisée sous forme de travail mécanique extérieur qui apparaisse sous forme de chaleur, en d'autres termes, la chaleur musculaire n'est que complémentaire du travail mécanique *utile* produit par la contraction.

Les effets de la contraction musculaire, c'est-à-dire la chaleur musculaire et le travail mécanique extérieur, sont *ensemble* les expressions des métamorphoses chimiques dont le muscle est le théâtre.

Les faits que nous signalons doivent entrer en ligne de compte dans les divers calculs relatifs à la production de la chaleur animale. Le dosage exact des produits définitifs de la nutrition, c'est-à-dire des produits exhalés (acide carbonique, vapeur d'eau) et sécrétés (urée, acide urique, principes biliaires des excréments, sécrétions cutanées), ne saurait suffire, tout en tenant compte des chiffres de combustion du carbone et de l'hydrogène, et même en supposant connues les quantités de chaleur développées dans la formation des autres produits, ne saurait suffire, dis-je, pour établir sur des bases positives le calcul relatif aux quantités de chaleur produites en un temps donné; le travail moléculaire d'oxydation dont les muscles sont le siège pouvant se traduire par des quantités de chaleur variables *suivant le jeu* de l'appareil musculaire <sup>1</sup>.

<sup>1</sup> De ses recherches sur les métamorphoses organiques (voyez chapitre Nutrition), M. Frankland tire cette conclusion, que la graisse et l'amidon brûlent dans le sang lui-même, et qu'elles produisent, par leur combustion, soit de la chaleur, soit du travail.

Les substances azotées, par leurs métamorphoses, peuvent aussi devenir des sources

Tous ceux auxquels l'étude des sciences physiques est familière comprendront, sans qu'il soit besoin d'insister, l'importance des faits sur lesquels nous venons d'appeler l'attention: il s'agit en effet de la transformation et de la corrélation des forces, l'une des plus grandes questions de la science moderne, et ces faits rattachent l'animal par un nouvel anneau à l'ensemble de l'univers <sup>1</sup>.

de force, mais il ne faut pas oublier qu'elles ont en outre la propriété de devenir temporairement la substance même du muscle.

La production de la *chaleur* et la production du *travail musculaire* sont pour ainsi dire inséparables. D'après les vues de M. Frankland, qui est venu tout récemment ajouter à notre travail le poids de ses belles recherches, le sang contiendrait à la fois et la matière combustible et le comburant (l'oxygène). Mais ces deux substances (le combustible et le comburant) n'agiraient l'une sur l'autre dans l'épaisseur même du muscle que quand celui-ci passe de l'état de repos à l'état d'activité, c'est-à-dire quand le nerf moteur commande l'oxydation *dans le sang* du muscle. C'était là aussi, à peu près, la conclusion générale des recherches de MM. Fick et Wislicenus, du moins en ce qui concerne le *lieu* de la combustion. M. Frankland a particulièrement insisté sur ce point que les oxydations organiques du mouvement ne commencent dans le muscle que sous l'influence des nerfs moteurs, et que c'est par une sorte de polarisation que l'oxygène devient en ce moment actif sur les matières qui l'avoisinent. M. Ranke avait émis de son côté une opinion analogue. En somme, suivant cette manière de voir, les globules du sang apportent l'oxygène, les nerfs l'excitation, et le travail chimique de la nutrition qui était chaleur devient mouvement.

Au reste, que l'oxydation d'où dérive immédiatement, soit la chaleur, soit le mouvement dans le muscle, que cette oxydation ait lieu dans les vaisseaux du muscle ou dans le tissu musculaire, il est bien certain, ainsi que l'a justement fait observer M. Playfair, que ces oxydations qui fournissent la chaleur et la puissance musculaire ont lieu en définitive aussi bien sur les matières albuminoïdes que sur les aliments hydrocarbonés.

Des chiens exclusivement nourris pendant des mois entiers avec de la chair complètement privée de graisse jouissent de toute leur puissance musculaire.

<sup>1</sup> Depuis la publication de nos recherches, quelques faits du même ordre et qui se rattachent à la même cause, ont été observés. M. Lecoq a noté que les sphinx que nous voyons le soir se maintenir *immobiles* au-dessus des fleurs dont ils pompent le suc, à l'aide d'un mouvement extrêmement rapide des ailes, acquièrent en ce moment une température générale très-supérieure à leur température de repos. M. Lecoq a vu dans ces conditions la chaleur du corps de ces insectes s'élever jusqu'à 40°. La contraction musculaire exagérée et rapide des sphinx ressemble à une sorte de contraction tétanique; elle appartient évidemment à cet ordre de contractions que nous avons désigné sous le nom de *contraction musculaire statique*. L'animal en effet est *immobile*; toute la force dépensée par le système musculaire est employée à maintenir le corps *en équilibre*, et à lutter contre la pesanteur qui tend à l'entraîner par en bas. Le corps tout entier de l'animal agit pour se soutenir lui-même, par les contractions des muscles, de la même manière que le bras qui, dans nos expériences, soutient un poids *en équilibre*.

M. Wunderlich a observé, en 1861, que peu avant la mort par le *tétanos*, la température du corps s'était élevée chez un malade à 45°,3, et chez un autre à 42°,4. M. Leyden (en 1863) a vu que la température va s'élevant sans cesse pendant les contractions du *tétanos*. Dans un cas elle était, 20 minutes avant la mort, de 43°,9 sous l'aisselle et de 44°,4 dans le rectum. Dans un autre cas elle était de 42°,8 immédiatement avant la mort; elle continua à s'élever (c'est-à-dire à *se répandre des muscles vers les autres parties*) après la mort. En effet sept minutes après la mort elle était montée à 44°,2; onze minutes après, elle était de 44°,5; enfin elle était de 44°,6 au bout de quinze mi-