

## M É M O I R E

*Sur la propagation de la Chaleur, et sur un moyen simple et exact de mesurer les hautes températures.*

Par M. Biot, Membre de l'Institut.

LE Mémoire que j'ai l'honneur de soumettre à la Classe (1), a pour objet de déterminer par l'expérience et par le calcul les lois et la propagation de la chaleur dans les corps solides.

Je n'aurais peut-être pas dû publier ces recherches dans l'état d'imperfection où elles sont encore ; mais comme elles contiennent des résultats qui peuvent être utiles à ceux qui s'occupent des propriétés de la chaleur, j'ai cru pouvoir dès ce moment les présenter à l'indulgence des physiciens. Je les offre au Comte de Rumford, qui nous a entretenus depuis quelque tems d'un grand nombre de belles découvertes sur cette matière, et je le fais avec d'autant plus de plaisir, que c'est à ses exhortations que je dois l'avantage de m'être occupé de cette partie de la physique qu'il a depuis si long-tems illustrée par ses travaux.

Je ne dois pas non plus laisser ignorer à la Classe, qu'ayant communiqué mes premiers résultats à M. La Place, je ne tardai pas à reconnaître qu'il avait aussi porté dès long-tems ses vues sur ce sujet. Mais loin de me découvrir

(1) Ce Mémoire a été lu à la Classe des Sciences mathématiques et physiques de l'Institut.

une vérité qui m'aurait sans doute empêché de continuer ces recherches, il m'engagea beaucoup à les suivre. Et c'est à mesure que j'avais qu'il m'a fait part des méthodes qu'il avait employées. Je dois donc les lui rapporter entièrement, et c'est la seconde fois qu'ayant été assez heureux pour me rencontrer avec lui, j'éprouve de sa part cette obligeante réserve.

Je n'examinerai pas ici si la chaleur est un corps, ou si elle n'est que le résultat du mouvement intérieur des particules de la matière, mais en admettant que ses effets, lorsqu'elle devient sensible, sont mesurables par le thermomètre, je chercherai les lois de sa propagation.

J'ai fait mes premières expériences sur une barre de fer d'environ deux mètres et deux décimètres de longueur (7 pieds), et de trois centimètres d'épaisseur, (1 pouce  $\frac{1}{2}$ ); elle était recourbée par un bout sur une longueur de vingt-trois centimètres, de manière à pouvoir être plongée par cette extrémité dans une source constante de chaleur. On avait percé sur cette barre six trous qui allaient un peu plus loin que son centre, et qui étaient éloignés les uns des autres de quatre décimètres. Ces trous remplis de mercure recevaient autant de thermomètres, et le tout était supporté par deux pieds de bois sec.

Il est clair qu'en mettant l'extrémité de la barre en communication avec une source constante de chaleur, les différens thermomètres devaient indiquer la loi de sa distribution. Il fallait seulement avoir soin d'entretenir un courant d'air dans le lieu de l'expérience, et

observer les variations de température qui pouvaient y survenir.

J'ai d'abord employé pour source constante de chaleur un vase rempli d'eau à 60°. de Réaumur, entretenu constamment à cette température par le moyen d'une lampe; il était recouvert de manière que les vapeurs humides ne pouvaient pas se porter sur la barre et la mouiller.

On sait, par des expériences journalières, que le fer est un mauvais conducteur du calorique; cependant j'étais encore bien loin de soupçonner à cet égard toute son imperfection. Les thermomètres ne s'ébranlèrent qu'avec une extrême lenteur, et quoique la température fût entretenue au même degré pendant dix heures entières, il me fut impossible d'étendre ses effets au-delà des deux premiers thermomètres, c'est-à-dire, environ à dix décimètres de la surface de l'eau. Encore le second thermomètre s'était-il à peine élevé sensiblement.

Je compris alors à quel point le fer est mauvais conducteur du calorique. Je fis percer des trous en plus grand nombre, à un décimètre de distance les uns des autres, sur-tout du côté de la barre qui devait s'échauffer le plus. Et je répétai l'expérience avec du mercure chauffé à 82°. de Réaumur, et maintenu à cet état pendant cinq heures au moyen d'un quinquet.

Trois de mes élèves observaient avec moi de minute en minute avec une montre à secondes la marche des thermomètres.

Après quatre heures d'échauffement, ils parvinrent à un état stationnaire. On les laissa ainsi

pendant une heure pour s'assurer qu'ils ne devaient plus monter.

Alors l'état des thermomètres se trouva tel que le représente le tableau ci-joint et numéroté *A*. Les accroissemens de température au-dessus de la température de l'air, allaient en diminuant depuis le premier thermomètre jusqu'au septième, éloigné du niveau du mercure de dix décimètres. Celui-ci était monté d'un peu moins de 1°. Les thermomètres suivans demeurèrent absolument insensibles. En sorte qu'il restait douze décimètres, c'est-à-dire, plus de la moitié de la barre qui n'avait pas éprouvé d'accroissement appréciable dans sa température.

La lenteur du refroidissement répondit à celle de l'échauffement ; et les thermomètres suivirent la même marche dans leurs indications ; le plus voisin de l'extrémité de la barre qui était monté plus vite descendit plus vite, et ainsi des autres. Celui du milieu a mis une fois près d'une heure avant d'être descendu sensiblement.

En faisant ces expériences, il faut avoir soin d'attendre long-tems pour être sûr que les thermomètres ont atteint l'état où ils doivent rester stationnaires. Si l'on se laisse tromper par la lenteur de leur marche, et qu'on retire trop tôt la source constante de chaleur, les thermomètres plongés dans l'intérieur de la barre et éloignés de ce foyer, continuent de monter pendant quelque tems, après quoi ils deviennent stationnaires, et redescendent ensuite.

Il s'agissoit de trouver la loi de ces expé-

riences, c'est-à-dire, la relation qui existe entre les accroissemens de température des différens thermomètres, et leurs distances au foyer commun.

En comparant avec soin ces accroissemens, je m'aperçus qu'on pouvait les représenter très-exactement par une logarithmique, dont ils seraient les ordonnées, les abscisses étant les distances au foyer commun ; les nombres calculés dans cette hypothèse, ne s'écartaient pas des observations de 0°,5 pour aucun des thermomètres. Ayant l'équation de la courbe je pus calculer la température de la barre au niveau du mercure ; je la trouvai égale à celle du mercure même que l'on avait observée au thermomètre : l'erreur n'était pas de 0°,4 en moins.

Je pus aussi juger d'après cette loi pourquoi mes derniers thermomètres n'avaient pas bougé, car en calculant la température qu'il aurait fallu mettre au bout de la barre pour faire monter le dernier thermomètre seulement de 1°, je trouvai qu'elle était égale à 23984°. de Réaumur, c'est-à-dire, quatre fois plus considérable que la chaleur qu'il faut donner aux barres de fer, selon Wedgewood, pour les mettre en état des'incorporer. Ainsi, il est physiquement impossible de chauffer d'un degré l'extrémité d'une barre de fer de deux mètres ou six pieds de longueur en la chauffant par l'autre bout ; car elle se fondrait auparavant.

Ce n'était pas assez de conclure ces résultats par l'expérience, il fallait les trouver par la théorie, car l'expérience seule ne montre que des faits isolés, c'est la théorie qui fait apercevoir leurs rapports.

Pour cela il faut partir de cette loi, que lorsque deux corps de températures différentes sont mis en contact; la quantité de chaleur que le plus chaud communique au plus froid, dans un tems très-court, est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à leur différence de température. Je fais abstraction ici de toute action ou combinaison chimique. Cette loi a été supposée par Newton dans ses essais de la chaleur. Richeman l'a confirmée depuis par ses propres expériences et par celles de Krafft; enfin M. le Comte de Rumford, lui-même, a ajouté par de nouveaux faits un nouveau poids à ces autorisés.

Je sais bien que le Docteur Martine a prétendu que cette loi aurait besoin de quelque correction, et il a voulu y ajouter une progression arithmétique. Mais il a appuyé cette opinion sur des expériences de Musschenbroek, qui ne paraissent rien moins qu'exactes, puisqu'elles donnent plus de 320 degrés de Réaumur pour la température du plomb fondant, qui n'est au plus que de 210, comme je le prouverai tout-à-l'heure par mes expériences. Sans doute l'erreur de Musschenbroek vient de ce qu'il s'est servi d'un pyromètre compliqué de plusieurs pièces, dont le jeu et les dilatations mal connues ont suffi pour causer ces irrégularités; et c'est ici le cas de remarquer que pour mesurer une cause dont les modifications et la manière d'agir sont aussi peu connues que celles de la chaleur, on ne doit employer que des moyens très-simples, et dont l'exactitude, fondée sur des lois géométriques, tienne à la nature même, et non à la perfection de l'instrument.

Enfin, si la loi de Newton sur l'intensité avec laquelle la chaleur se communique, exige quelques corrections, c'est en comparant ses résultats aux observations qu'on pourra les apprécier, mais en l'appliquant à mes expériences, j'ai vu qu'elle y satisfait avec une rigueur pour ainsi dire mathématique.

Pour établir le calcul d'après cette loi, il faut considérer que chaque point de la barre reçoit de la chaleur de celui qui le précède, et en communique à celui qui le suit. La différence est ce qui lui reste à raison de sa distance au foyer, et il s'en perd une partie dans l'air, soit par le contact immédiat de ce fluide, soit par le rayonnement.

Ainsi, dans l'état d'équilibre, lorsque la température de la barre est devenue stationnaire, l'accroissement de chaleur que chaque point de la barre reçoit en vertu de sa position, est égal à ce qu'elle perd par le contact de l'air, et par le rayonnement, perte qui est proportionnelle à sa température.

Et dans l'état de mouvement, où la température de la barre changea chaque instant, la quantité de chaleur reçue par chaque point à raison de sa position, moins la quantité qu'il perd par le rayonnement et le contact de l'air, est égale à la quantité dont s'accroît sa température dans le même intervalle.

La première condition étant réduite en calcul, donne lieu à une équation différentielle du second ordre entre deux variables qui sont l'accroissement de température de chaque point, et sa distance à la source constante de chaleur. Cette équation est linéaire, à coefficients cons-

tans, et peut s'intégrer par les méthodes connues.

La seconde condition où il entre une variable de plus, qui est le tems, conduit à une équation différentielle, partielle du second ordre. Cette équation qui donne l'état de la barre à un instant quelconque, renferme implicitement la précédente.

Le seul cas que je traiterai dans ce Mémoire, est celui d'une barre métallique indéfinie plongée par une de ses extrémités dans une source de chaleur constante, et maintenue dans cet état jusqu'à ce que sa température n'éprouve plus aucun changement.

L'équation différentielle qui s'y rapporte, contient dans son intégrale, deux constantes arbitraires multipliant deux termes exponentiels, et de plus une autre quantité, aussi constante mais non arbitraire, qui dépend du rapport de la conductibilité au rayonnement.

Ces trois constantes doivent être déterminées par les circonstances particulières de l'échauffement de la barre, ou par les observations.

Et d'abord l'extrémité la plus éloignée de la source constante de chaleur, n'en devant éprouver aucun effet sensible, cette partie restera constamment à la température de l'air. Ainsi l'intégrale devra être telle qu'elle devienne nulle quand la distance au foyer est infinie. Cette condition fait disparaître un des termes exponentiels, et la formule n'en renfermant plus qu'un seul de ce genre, représente une courbe logarithmique.

A la rigueur, le cas d'une barre indéfinie ne

se rencontre jamais dans les expériences; mais on peut l'appliquer dès que la longueur de la barre est assez grande pour que ses derniers points n'éprouvent pas d'effets sensibles, ou du moins pour qu'ils n'en éprouvent que de très-faibles. C'est ce qui est toujours arrivé dans mes expériences, où j'ai employé des barres de fer et de cuivre de vingt-deux décimètres (sept pieds) de longueur; pour déterminer la constante arbitraire de l'intégrale, et le rapport de la conductibilité au rayonnement, il suffit de deux observations. Ces quantités une fois connues, la formule donne l'état de tous les thermomètres.

Dans les tableaux que je soumetts à la Classe, j'ai rapporté d'une part les résultats des expériences que j'ai faites avec la barre de fer, sur le mercure à 82°, l'étain et le plomb fondans; et avec la barre de cuivre sur le mercure et le plomb. J'ai placé à côté les résultats du calcul, et j'ai mis les différences du calcul et de l'observation dans une troisième colonne, afin qu'on puisse aisément les apercevoir.

Jamais ces différences ne s'élèvent à 0°,5 de Réaumur pour aucun des thermomètres, et il y a toujours eu six thermomètres qui ont bougé dans la barre de fer; il y en a eu quatorze dans la barre de cuivre, ce métal étant meilleur conducteur que l'autre. La plupart des différences sont même fort au-dessous de 0°,5, et comme elles se trouvent indifféremment en plus ou en moins, il est clair qu'elles sont dues aux erreurs inévitables des observations.

Pour atteindre ce degré d'exactitude, j'ai employé une méthode que M. La Place a donnée

dans la *Mécanique céleste*, pour trouver la courbe qui satisfait le mieux à une série de résultats observés, lorsqu'on a des équations de condition entre les erreurs. J'ai déterminé aussi parmi toutes les logarithmiques, celle qui donne le minimum d'erreur en l'appliquant aux observations des thermomètres; je n'ai pas besoin de faire remarquer combien cette méthode a d'avantage sur les simples constructions graphiques.

On voit par ce que je viens de dire, que la théorie et l'expérience s'accordent avec la plus grande rigueur, pour nous indiquer l'état d'équilibre de la chaleur dans une barre métallique indéfinie qui communique, par une de ses extrémités, avec une source de chaleur constante. Lorsque l'état de la barre est devenu stationnaire, la température de ses divers points décroît suivant une courbe logarithmique en s'éloignant du foyer.

La valeur de la constante qui dépend du rapport de la conductibilité au rayonnement, s'est trouvée à fort peu près la même, pour la même barre, quoique différente d'une barre à l'autre. Il s'ensuit que pour la même barre les différentes températures centrales donnent toujours la même courbe logarithmique sous des échelles différentes. Cette propriété permet de dire quel est le degré marqué par tous les thermomètres dans une barre connue, lorsqu'ils sont parvenus à l'état stationnaire, et que l'on donne la température d'un seul d'entr'eux. Il suffit pour cela d'une simple proportion. J'ai souvent répété cette épreuve.

Je ne crois pas cependant que l'on puisse encore

encore affirmer que le rapport de la conductibilité au rayonnement reste toujours exactement le même, quelle que soit la température de la source constante de chaleur. J'ai trouvé au contraire dans la valeur de cette quantité quelques différences à la vérité fort petites, mais qui se reproduisant toujours dans le même sens, ne paraissent pas devoir être négligées, vu l'extrême exactitude que ces expériences et ces calculs comportent. Je crois même avoir découvert la raison de ces différences, l'affaiblissement de la force de cohésion par l'introduction du calorique; mais comme j'ai projeté sur ce sujet une expérience décisive, qui en mettra les conséquences dans le plus grand jour, j'attendrai qu'elle soit terminée pour en entretenir la Classe.

Au reste, le degré d'exactitude dont ces recherches sont susceptibles est tel, que l'on peut espérer d'en obtenir des résultats très-précis, sur-tout lorsque l'on aura corrigé les petites causes d'erreurs qui restent encore dans l'appareil, et que les expériences y ont fait découvrir. Tel est, par exemple, le contact des supports qui, bien que construits en bois sec, modifient cependant un peu l'état des points avec lesquels ils communiquent. Telle est encore la forme plus ou moins régulière de la barre, sa surface plus ou moins polie, toutes causes qui étant inégales pour les différens point les affectent diversement. Mais l'observation les indique assez bien pour qu'il soit facile de les corriger.

C'est à quoi je travaille en ce moment, afin de pouvoir ensuite mesurer avec une grande

précision toutes les circonstances qui tiennent à la distribution de la chaleur dans les métaux et les autres corps solides, principalement dans le verre qui, de toutes les substances que j'ai éprouvées, est celle qui laisse arriver le plus difficilement la chaleur au thermomètre, comme je m'en suis assuré par plusieurs expériences comparatives; une conséquence naturelle de ces recherches, c'est le calcul exact des modifications que la densité des corps, leur forme, et le poli de leur surface, introduisent dans la quantité de chaleur libre qu'ils dégagent quand on les expose à la même température; c'est une source féconde de résultats intéressans que j'aurai l'honneur de soumettre à la Classe, lorsqu'ils auront acquis toute l'exactitude nécessaire pour lui être présentés.

Je vais maintenant passer à une application de ces mêmes expériences, qui me semble mériter l'attention des physiciens par sa simplicité et par l'utilité qu'elle peut avoir.

On cherche depuis long-tems un moyen simple et exact de mesurer des températures élevées, en parties de l'échelle du thermomètre à mercure. Ce thermomètre lui-même ne peut servir à cet objet, parce qu'à une certaine température le mercure commence à bouillir. Il devient même inexact avant ce terme, parce qu'en général, comme Deluc l'a fait voir, les dilatations des liquides deviennent inégales en approchant de l'ébullition.

Newton avait imaginé pour cela un procédé géométrique fondé sur la loi suivant laquelle les corps se refroidissent dans l'air. D'après

cette loi, que Richeman a depuis démontrée par l'expérience, les tems étant pris en progression arithmétique, les décroissemens de chaleur formaient une progression géométrique; c'est-à-dire, que la courbe qui représenté les décroissemens est une logarithmique, en sorte qu'en connaissant la température du corps à un instant donné, on peut, par les tables de logarithmes, en conclure sa température à un instant quelconque, celle de l'air étant supposée toujours la même.

Pour appliquer ce principe, Newton faisait rougir au feu un morceau de fer assez considérable, et il le suspendait dans l'air. Alors il plaçait sur sa surface diverses substances fusibles, et il observait les instans auxquels ces substances commencent à se congeler par l'effet du refroidissement progressif, et comme il avait préalablement déterminé, par le moyen d'un thermomètre d'huile, la température à laquelle l'étain commence à se fondre, cette donnée lui suffisait pour calculer toutes les autres températures en parties de ce même thermomètre, depuis l'époque où elles avaient été observées.

Ce moyen est sans doute extrêmement simple, mais, s'il m'est permis de le dire, il me semble qu'il n'est pas exempt de quelque inexactitude, parce qu'il doit être fort difficile de saisir l'instant auquel les diverses substances commencent à se geler, et qu'une petite erreur sur le tems peut en occasionner une assez sensible sur l'évaluation de la température, principalement lorsqu'elle est fort élevée. Par exemple, Newton trouve pour la tempé-

rature du plomb fondant  $225^{\circ}$ . de l'échelle de Réaumur, quoiqu'elle ne soit que d'environ  $210^{\circ}$ . comme je le prouverai plus bas.

Cependant les expériences faites de cette manière ne comportent que d'assez légères erreurs, sur-tout lorsqu'elles sont de la main de Newton, et je m'étonne qu'au lieu de chercher à perfectionner ce procédé géométrique, on en ait imaginé de mécaniques beaucoup plus inexacte, comme est, par exemple, le pyromètre de Musschenbroek, et comme sont en général tous les pyromètres métalliques dont on a fait jusqu'à présent usage, lesquels sont nécessairement inexacts, à cause du jeu des différentes pièces qui les composent, et sur-tout non comparables, parce qu'il est certain que les corps fortement chauffés ne reviennent pas toujours exactement aux mêmes dimensions qu'ils avaient d'abord, et ne conservent pas la même dilatabilité; variations très-petites à la vérité, mais dont l'influence sur les résultats est cependant très-considérable, parce qu'elle y entre agrandie et multipliée dans une énorme proportion.

Les expériences que j'ai eu l'honneur de soumettre à la Classe, me paraissaient propres à atteindre ce but d'une manière beaucoup plus sûre, en employant la loi géométrique suivant laquelle la chaleur diminue dans une barre métallique à partir d'un foyer constant.

Car il suffit de mesurer cette température sur la barre à une distance connue du foyer lorsqu'elle est devenue stationnaire, et par un calcul très-simple on en déduit celle du foyer.

Comme on peut répéter cette opération sur chaque thermomètre, chacun d'eux donnera, à raison de sa distance, la température cherchée; et si ces résultats, qui doivent s'accorder tous entr'eux, diffèrent quelque peu les uns des autres, en prenant une moyenne arithmétique entr'eux, on aura le résultat véritable avec beaucoup d'exactitude.

Mais comme cette méthode donnerait autant d'influence aux derniers thermomètres qu'aux premiers, tandis que les accroissemens de ceux-ci sont plus considérables, et par conséquent moins affectés par les erreurs des observations, il me paraît plus sûr de prendre une marche un peu différente; je cherche d'abord, comme je l'ai dit, la logarithmique qui donne le minimum d'erreur entre les premiers thermomètres, j'en déduis comme une vérification l'état des derniers qui doit être représenté; ainsi à fort peu près, et lorsque je me suis assuré par-là que la formule n'est pas en erreur de  $0^{\circ},5$  sur aucun des thermomètres, j'emploie les nombres corrigés, et j'en conclus la température de la source constante de chaleur.

Pour donner un essai de ce calcul, voici les résultats que j'ai obtenus pour la température du plomb fondant.

L'expérience faite avec la barre de fer m'a donné pour cette température  $206^{\circ},40$  de l'échelle de Réaumur.

L'expérience faite avec la barre de cuivre a donné  $210^{\circ},86$ .

La différence de ces résultats, obtenus par deux épreuves tout-à-fait indépendantes l'une

de l'autre, est extrêmement petite; on peut donc les regarder comme très-approchans de la vérité, et ceci justifie la remarque que j'ai faite plus haut sur les incertitudes dont le procédé de Newton est susceptible.

J'ai fait aussi des expériences sur la fonte de l'étain, mais comme je n'ai encore employé pour cela que la barre de fer, je ne puis offrir à la Classe une comparaison aussi certaine. C'est pourquoi je ne rapporterai point les résultats, je me bornerai seulement à dire que tous les thermomètres s'accordèrent très-exactement pour donner à cette température une valeur très-peu différente de celle que l'on assigne ordinairement pour la fonte de l'étain, laquelle est de 168°. suivant Newton.

Il y a sans doute des recherches à faire, pour rendre usuelle la méthode que je viens de proposer; mais voilà le principe; je désire que ceux qui ont plus que moi la connaissance et la pratique des arts, le jugent assez utile pour chercher à l'appliquer.

*TABLEAU des Expériences sur la propagation de la Chaleur et la mesure des températures.*

*A. Première expérience faite avec la barre de fer plongée par le bout dans du mercure à 82°.*

Rangs des thermomètres.	Températ. observées en degrés de Réaumur.	Températ. calculées.	Différences entre le calcul et l'observation.	
	degrés.	degrés.	degrés.	
0	69	68,63	+ 0,37	Température de l'air 13°. Les observations des thermomètres sont comptées à partir de ce terme.
1	23,5	23,5	+ 0	
2	14	14,16	- 0,16	
3	9	9	0	
4	5,75	5,55	+ 0,20	
5	3,75	3,45	+ 0,30	
6	1,75	1,33	+ 0,42	
7	1	0,51	+ 0,49	
8	Insensible.			

Celui qui est numéroté 0, indique le niveau du mercure distant du premier de 2,115.

Distances des thermomètres entre eux,

De 1 à 2. . . . .	
2 à 3. . . . .	0,894
3 à 4. . . . .	0,961
4 à 5. . . . .	0,932
5 à 6. . . . .	1,875
6 à 7. . . . .	1,894

Équation de la logarithmique  $y = T a^x \log'$   
 $a = 0,220074$ .

La logarithmique qui a servi pour calculer ces expériences, n'a point été déterminée de manière à donner le minimum d'erreur, mais simplement de manière à satisfaire aux observations 1 et 3.

On peut demander quelle température il aurait fallu mettre au bout de la barre, pour que tous les thermomètres eussent bougé au moins de  $1^\circ$ , pour cela on remarquera que depuis le thermomètre 7 jusqu'à la fin de la barre, il y a la moitié juste de cette barre, plus 4 décimètres ou 11,556. Ajoutant donc à cette quantité 2,115, qui exprime la distance de 1 au niveau du mercure, on aura en tout  $x = -13,671$ : mettant cette valeur dans l'équation de la courbe, on trouve qu'il faudrait une chaleur égale à  $23971^\circ$  du thermomètre de Réaumur. Température qui excède plus de quatre fois celle des barres de fer chauffées au point de s'incorporer, celle-ci étant de  $5967^\circ$  suivant Wedgwood.

B. Expériences faites avec une barre de fer plongée par le bout dans du plomb fondant.

Rangs des thermomètres.	Températ. observées en degrés de Réaumur.	Températ. calculées d'après la formule.	Différences entre le calcul et l'observation.	
	degrés.	degrés.	degrés.	
1	61,50	62,06	- 0,56	Ces températures sont comptées au-dessus de celles de l'air qui était de $14,5$ de Réaumur.
2	37,75	37,41	+ 0,34	
3	23,50	23,42	+ 0,08	
4	14,25	14,38	- 0,13	
5	8,50	8,90	- 0,40	
6	3,00	3,45	- 0,45	
7	1,25	1,33	- 0,08	

Distances des thermomètres entre eux et au foyer commun, depuis la surface du plomb fondant jusqu'au premier thermomètre. . . . . 2,23077

De 1 à 2. . . . .	1
2 à 3. . . . .	0,88942
3 à 4. . . . .	0,96153
4 à 5. . . . .	0,94711
5 à 6. . . . .	1,8702
6 à 7. . . . .	1,8846

On a pris pour unité la distance de 1 à 2, qui est de 104 millimètres.

L'équation de la courbe est  $y = T a^x$ ; on a trouvé  $\log. a = 0,2197849$ . Cette valeur a été

déterminée de manière à avoir la moindre erreur d'observation possible entre les quatre premiers thermomètres.

Calcul de la température du plomb fondant.

Valeur de  $y$  au niveau du plomb fondant. . . . . 191°,90

Température initiale. . . . . 14,5

Température du plomb fondant. . . . . 206,40

C. *Expériences faites avec une barre de cuivre plongée par le bout dans du plomb fondant.*

Rangs des thermomètres.	Températ. observées en degrés de la division centigrade.	Températ. calculées.	Différences entre le calcul et l'observation.
	degrés.	degrés.	degrés.
1		148,31	
2		121,03	
3		98,77	
4	80,50	80,60	— 0,10
5	65,75	65,78	— 0,03
6	53,75	53,82	— 0,07
7	43,75	43,80	— 0,05
8	35,50	35,75	— 0,25
9	24,00	23,81	+ 0,19
10	15,70	15,85	— 0,15
11	11,00	10,56	+ 0,44
12	7,50	7,03	+ 0,47
13	5,25	4,68	+ 0,57
14	3,75	3,12	+ 0,63

Ces températures sont comptées au-dessus de celles de l'air qui était de 15°,75 division centigrade.

Distances des thermomètres entre eux et un foyer commun, depuis la surface du plomb fondant jusqu'au premier thermomètre. . . . . 2,5

De 7 à 8. . . . . 1

8 à 9. . . . . 2

9 à 10. . . . . 2

10 à 11. . . . . 2

11 à 12. . . . . 2

12 à 13. . . . . 2

13 à 14. . . . . 2

On a pris pour unité la distance de 1 à 2 qui est de 101 millimètres.

L'équation de la courbe est  $y = T a^x$ .

On a trouvé  $\log. a = 0,0882726$ . Cette valeur a été déterminée de manière à avoir le minimum d'erreur entre les thermomètres 4, 5, 6, 7. La température des précédents ayant excédé l'étendue de leur échelle, n'a pu être observée, et on l'a déduite du calcul.

Calcul de la température du plomb fondant.

Valeur de  $y$  au niveau du plomb. . . . . 243°,58

Température initiale. . . . . 20

Température du plomb fondant. . . . . 263,58

Ce qui donne en degrés de Réaumur. . . . . 210,86

D. *Expériences faites avec la barre de cuivre plongée dans du mercure à 95°.*

Rangs des thermomètres.	Températ. observées en degrés de la division centigrade.	Températ. calculées.	Différences entre le calcul et l'observation.
	degrés.	degrés.	degrés.
1	61,50	61,38	+ 0,12
2	51,00	50,85	+ 0,15
3	42,00	42,12	- 0,12
4	35,00	34,90	+ 0,10
5	28,50	28,91	- 0,41
6	23,75	23,96	- 0,21
7	19,37	19,83	- 0,46
8	15,94	16,43	- 0,49
9	11,25	11,27	- 0,02
10	8,12	7,74	+ 0,38
11	5,62	5,31	+ 0,31
12	3,75	3,64	+ 0,11

Les différences d'abscisses sont les mêmes que dans le tableau C.

La logarithmique a été déterminée de même pour le minimum d'erreur entre les quatre premiers thermomètres.

On a trouvé  $\log. a = 0,08171517$ , valeur sensiblement moindre que celle qui résulte du plomb fondant.

## SUIITE DES EXPÉRIENCES

*Sur l'emploi de la houille brute de Rive-de-Giez dans les diverses parties du traitement du fer (1).*

Par M. ROZIERE, ingénieur des mines.

## SECONDE PARTIE.

*Expériences au haut fourneau.*

LA houille brute de Rive-de-Giez ayant remplacé plus que son poids de charbon de bois dans les feux de Renardière, il était intéressant de comparer ce résultat avec son emploi au haut fourneau. M. Etienne, maître de forges très-expérimenté, consentit à l'essayer au fourneau de Cours-l'Evêque, et les mêmes essais furent faits par M. Quillard au fourneau de Château-Villain : on choisit l'époque où l'on touchait à la fin d'un fondage, afin de se mettre à l'abri de tout accident.

La houille fut d'abord employée dans la proportion d'un huitième, c'est-à-dire, que dans chaque charge composée de huit resses de charbon de bois, on en retrancha une que l'on remplaça par un pareil poids de houille ; on ne put, comme au feu de forge, la mêler avec du faisil,

(1) La première partie de ce Mémoire a été insérée dans le N°. 97, page 35.