Zeitschrift: Bulletins des séances de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles

Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles

Band: 5 (1856-1858)

Heft: 42

Artikel: Recherches sur les rapports entre l'intensité magnétique des barreaux d'acier et leur température

Autor: Dufour, L.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-284131

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Siehe Rechtliche Hinweise.

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. Voir Informations légales.

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. See Legal notice.

Download PDF: 26.04.2025

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

MÉMOIRES.

RECHERCHES

SUR

les rapports entre l'intensité magnétique des barreaux d'acier et leur température

PAR M. L. DUFOUR,

professeur de physique à l'Académie de Lausanne.

Le sujet qui fait l'objet de ces recherches a déjà été, en partie au moins, étudié par plusieurs physiciens. L'influence de la température sur le magnétisme de l'acier est trop importante et trop considérable pour ne pas avoir frappé ceux qui s'occupaient du magnétisme en général. La perte de magnétisme qu'on remarque dans le fer rouge a déjà été signalée dans le 16me siècle par Gilbert. Du Fay remarqua l'influence du refroidissement sur l'aimantation des barreaux lorsqu'ils ont une orientation convenable. — Plus tard, de Saussure et Coulomb cherchèrent à déterminer dans quelle mesure la chaleur modifie l'intensité des aimants; Coulomb chauffait ses barreaux en les plongeant dans l'eau à une certaine température. Kupffer a publié des expériences remarquables où l'intensité à diverses températures était mesurée par l'influence du barreau sur un pendule magnétique qui oscillait plus ou moins rapidement; il a annoncé que l'intensité varie assez exactement en raison inverse de l'accroissement de température.

C'est à partir du commencement de ce siècle, et des célèbres observations d'Alexandre de Humboldt dans son voyage aux régions tropicales, qu'on chercha surtout à déterminer les trois éléments du magnétisme terrestre, la déclinaison, l'inclinaison et l'intensité. L'intensité observée dépend de celle des aimants que l'on emploie comme pendules, et cette dernière varie avec leur température; de là, la nécessité de connaître exactement quelle est l'influence de la température afin de faire subir aux observations une correction analogue à celle qu'on fait subir aux indications du baromètre, afin de les rendre comparables.

Depuis ses premiers travaux sur ce sujet (1825), Kupffer a souvent donné des résultats relatifs à la correction qui doit s'appliquer aux aiguilles. — Hansteen, dans ses remarquables recherches sur le magnétisme terrestre, a aussi été amené à étudier de près l'influence de la chaleur. Il faisait varier la température de ses aimants en les chauffant dans un vase par le moyen d'une lampe, et il remarqua, entre autres, que la correction n'est pas la même pour tous les barreaux. Il n'a pas dépassé, dans ses recherches, la température de l'eau bouillante. — Christie a aussi voulu déterminer l'influence des variations de température sur les résultats relatifs au magnétisme terrestre; il a trouvé que la proportionnalité indiquée par Kupffer n'existe que jusqu'à un point peu élevé de l'échelle thermométrique et que, à partir de là, l'intensité magnétique décroît plus rapidement que la chaleur n'augmente. Le même auteur a étudié l'influence du réchauffement, jusqu'au rouge, sur l'acier et le fer, et a cherché comment le magnétisme se distribue dans un barreau, lorsqu'on chauffe fortement certains points de sa masse. — Reinike, afin de corriger les observations d'intensité faites à Archangel, a aussi déterminé l'influence de la température sur ses barreaux; il les plaçait dans une sorte de cage où ils pouvaient être mis en oscillation et dont on pouvait faire changer la température.

Messieurs Moser et Riess ont publié, déjà en 1829, des recherches très-remarquables sur les variations qu'on constate dans les barreaux aimantés lorsque leur température varie. Ils avaient pour but de connaître les rapports entre la chaleur et le magnétisme en ayant égard à l'intensité de la chaleur, la dimension et la nature des barreaux, etc., plutôt que de déterminer la correction de la température en vue de mesures relatives au magnétisme terrestre. Ils remarquèrent avec beaucoup de justesse, qu'il y a lieu de distinguer l'action permanente, définitive que la chaleur exerce sur les aimants et l'action momentanée qui ne se manifeste plus dès que l'élévation de température a cessé. Ils trouvèrent que le coefficient de perte indiqué par Christie est trop faible et ils en donnent un qui ne convient cependant point à tous les barreaux. Ils examinèrent ensuite l'influence de la longueur, de la largeur, de la masse (cylindres creux ou pleins) des aimants expérimentés, puis ce qui peut provenir de la nature même des barreaux employés. Ils annoncèrent que des aiguilles d'acier fortement trempées perdent de leur intensité par le réchauffement et que cette perte continue pendant le refroidissement. Ce fait singulier ne s'est jamais montré dans la suite de mes expériences où j'ai bien souvent eu des barreaux à trempe très-dure. — Les expériences de MM. Moser et Riess sont remarquables à tous égards et comptent assurément parmi les plus précises qui aient été entreprises sur ce sujet.

Un bon nombre de physiciens ont été amenés plus récemment à déterminer l'influence de la chaleur sur l'intensité magnétique de l'acier à propos de recherches sur le magnétisme terrestre. Ces recherches, ayant un but spécial, ils ont plutôt appris à connaître les

variations de l'aiguille particulière dont ils ont fait usage que les rapports généraux entre la chaleur et le magnétisme. C'est ainsi que M. Bravais est arrivé à corriger avec assez de précision les observations de Bossekop. Dans ces dernières années, M. Lamont, à Munich, s'est occupé avec beaucoup d'activité et de persévérance de la détermination des éléments du magnétisme terrestre et a dû fréquemment s'occuper aussi de l'influence de la température. Il a été surtout frappé, et c'est là sûrement une preuve de la précision de ses expériences, de l'irrégularité qu'on remarque d'un barreau à l'autre et de la grande difficulté qu'il y a à fixer un coefficient de correction pour les barreaux dont on se sert.

Les recherches qui suivent n'abordent que quelques-uns des phénomènes où les rapports de la chaleur et du magnétisme se manifestent.

I. — Mode d'expérimentation et appareils.

1. Pour déterminer l'intensité d'un barreau, un des moyens les plus fréquemment employés consiste à faire osciller, sous son influence, une aiguille aimantée, à compter le nombre des oscillations qui se produisent pendant un temps déterminé. L'aiguille joue alors le rôle de pendule magnétique soumis, à la fois, à l'influence de la terre et à celle du barreau que l'on étudie. Si l'on fait primitivement osciller le pendule sous l'influence de la terre seule, puis ensuite sous l'influence de la terre et du barreau, on peut, par une formule simple, en conclure l'intensité du barreau relativement à la terre. Soient I et I′ les intensités de la terre et du barreau; N la durée d'une oscillation due à la terre seule et N′ celle d'une oscillation due à la terre et au barreau. On a évidemment :

$$\frac{I}{I+I'} = \frac{N'^2}{N^2} \quad \text{d'où} \quad I' = I\,\frac{N^2 - N'^2}{N^2}$$

Si l'on prend pour unité l'intensité du magnétisme terrestre agissant sur l'aiguille du pendule, on aura :

$$I' = \frac{N^2 - N'^2}{N^2} = \left(\frac{N}{N'}\right)^2 - 1$$

Cette formule, rapidement calculable, permet ainsi d'obtenir l'intensité du barreau en expérience.

Il s'agissait de pouvoir examiner les barreaux à des températures variables en même temps qu'ils exerçaient leur action sur le pendule magnétique, suspendu avec délicatesse afin de rendre les oscillations très-faciles. — Voici l'appareil auquel je me suis arrêté.

Une caisse en cuivre de 30 centimètres de long et de 10 centimètres de large est pourvue d'un tube *a b c* qui repose sur son fond et qui est

percé, dans le trajet *b c*, de six petites ouvertures s'ouvrant dans la caisse. Deux lames de cuivre *e f* s'appuyant sur les bords de la caisse et présentant la forme que montre la figure 2 supportent, dans l'intérieur, à environ 5,5 centimètres du fond le barreau *m n* en expérience. La caisse étant remplie d'eau jusqu'à 5 millimètres du bord, le barreau se trouve ainsi complétement immergé dans ce liquide et prend la température que possède l'eau elle-même. Le pendule est suspendu horizontalement à environ 18 centimètres du barreau et au-dessus. Il est du reste séparé de la caisse par un écran en bois, *h g*, qui la dépasse notablement dans tous les sens. Ce barreau-pendule est placé dans une espèce d'anneau en cuivre, soutenu par un fin fil de chanvre d'un mètre de longueur, fixé à sa partie supérieure à une tige verticale que l'on peut aisément élever ou abaisser, mais qui demeure fixe pendant la durée d'une même série d'expériences. La tige qui supporte le fil était soutenue par une traverse horizontale complétement indépendante de la table sur laquelle reposait la caisse et placée dans des conditions d'immobilité complète. Un thermomètre *t* plongeait dans la caisse de cuivre de telle façon que sa cuvette se trouvait située immédiatement à côté de la partie moyenne du barreau; sa tige traversait une ouverture convenablement pratiquée dans l'écran en bois et elle était fixée à cet écran par un mastic qui empêchait en même temps les vapeurs d'eau de se dégager au-dessus de la caisse et de former un courant dans le voisinage du fil de suspension.

L'appareil était orienté de telle façon que le pendule se trouvait exactement parallèle à l'aimant, son axe de suspension prolongé passant par le milieu du barreau, ensorte que les deux extrémités *v u* se trouvaient à égale distance de *m* et de *n*. On s'assurait de cette position en regardant, par projection, l'aiguille *u v* sur le barreau *m n* pendant que cette aiguille faisait de petites oscillations dans un plan horizontal.

2. Pour faire une détermination d'intensité, il s'agissait de faire osciller le pendule magnétique dans un plan horizontal. La grande mobilité de la suspension rendait malheureusement très-faciles les oscillations dans un plan vertical comme pendule pondérable et il paraissait difficile, au premier abord, de produire des mouvements exclusivement horizontaux de l'aiguille, mouvements pendant lesquels son centre ne cessât pas d'être situé sur la verticale qui passe par le centre du barreau *m n*. J'eus l'idée de provoquer ces oscillations à l'aide d'un courant galvanique très-faible, dirigé parallèlement à l'aiguille. Au-dessous de la table qui supportait l'appareil, se trouvait un faible couple cuivre et zinc; l'un des fils communiquait à une capsule remplie de mercure et placée sur la table même; l'autre, *d e*, plus long, pouvait être tendu immédiatement au-dessous de *u v*, à deux centimètres environ et dans une situation exactement parallèle, facile à obtenir en visant à l'œil et en tenant l'extrêmité *d*, du fil, avec la main. Cette extrémité étant plongée dans le mercure, il se

produisait un courant qui avait pour conséquence une déviation de l'aiguille *u v* dans un sens ou dans un autre, suivant la direction du courant. Cette déviation une fois obtenue, il suffisait d'enlever le fil avec précaution et les oscillations se continuaient dans un plan horizontal avec une grande régularité. La grandeur de la déviation primitive, et par conséquent l'amplitude de l'oscillation, dépendaient de l'intensité du courant, ou bien de la durée de son action si l'on se contentait de plonger le fil dans le mercure puis de le retirer plus ou moins brusquement. — Il est possible d'obtenir, de cette manière et avec une grande facilité, telle amplitude que l'on veut, d'avoir des oscillations régulièrement horizontales de l'aiguille *u v* et d'éviter toute espèce de balancement du fil de suspension qui demeure exactement vertical. Cette conservation complète de la verticalité du fil était accusée par un petit théodolite placé à 7 mètres de distance et pourvu d'un réticule. En faisant coïncider l'image du fil de suspension avec le fil vertical du réticule avant de produire les oscillations, on pouvait s'assurer que, pendant leur durée, cette coïncidence se maintenait rigoureusement.

Les avantages de cette méthode étaient surtout précieux lorsqu'il s'agissait de faire osciller le pendule sous l'influence de la terre seule, cas dans lequel sa mobilité était infiniment plus grande que lorsqu'un barreau plus ou moins énergique tendait à conserver la verticalité du fil. — J'ai parfois employé, quoique avec moins de succès, le moyen qui consiste à se placer à une assez grande distance, sur le prolongement de *u v*, avec un aimant qu'on tient dans une position horizontale, perpendiculairement à la direction de l'aiguille. Cette dernière se dévie légèrement par suite de l'attraction des pôles de noms contraires, puis, en retournant rapidement l'aimant, la déviation se produit en sens inverse et on peut ainsi augmenter l'amplitude de l'oscillation en opérant plusieurs fois ces retournements rapides.

3. Pour faire varier la température du barreau, il s'agissait de chauffer l'eau au milieu de laquelle il était immergé. Le chauffage direct de la caisse en cuivre présente de sérieux inconvénients. D'abord, le réchauffement de l'eau est très-inégal si tout le fond n'éprouve pas simultanément l'augmentation de température; ensuite, en plaçant une source de chaleur quelconque sous l'appareil, on produit inévitablement des courants ascendants d'air chaud qui montent le long du fil de suspension et l'agitent d'une manière fâcheuse. — J'ai préféré chauffer en faisant arriver un courant de vapeurs dans l'eau, et c'est dans ce but que la caisse est pourvue du tube *a b c*. Un tube de caoutchouc, *p q*, qui s'ajuste exactement en *a*, amène la vapeur d'un générateur situé à une distance convenable de tout l'appareil. La vapeur se dégage par les divers trous pratiqués suivant *b c* et l'eau se réchauffe ainsi graduellement. J'avais déterminé, par des expériences préliminaires, quelle dimension devaient avoir les trous afin que, avec le générateur employé, le cou-

rant de vapeur sortît, autant que possible, sur toute la longueur du tube et chauffât simultanément toute la masse du liquide. La vapeur, du reste, en se dégageant, met l'eau en agitation et la température se répartit d'une manière beaucoup plus satisfaisante que je ne l'avais espéré d'abord. Le tube de caoutchouc était formé de deux parties séparées par un bout de tube en cuivre, pourvu d'un robinet qui permettait de laisser arriver une quantité plus ou moins considérable de vapeur et de chauffer, par conséquent, avec plus ou moins de rapidité.

Le tube de caoutchouc, dont une des extrêmités est en *a*, rend également très-facile l'opération qui a pour but de remplir la caisse en cuivre, ou de la vider, sans la déplacer en aucune façon et sans agiter l'air dans son voisinage. Il suffit, en effet, de placer le tube de telle façon que son autre extrêmité se trouve plus élevée que *a* et de plonger cette autre extrêmité (après avoir fait le vide, dans le tube, par aspiration) dans un vase rempli d'eau, pour obtenir un jeu de siphon qui remplit promptement la caisse. Si, au contraire, c'est l'extrêmité *a* qui est la plus élevée, le courant liquide se produit en sens inverse et la caisse se vide facilement. Ce détail d'opération, tout simple qu'il est, n'est point indifférent et il m'a rendu de grands services. Il m'était possible, de cette manière, de remplir rapidement la caisse avec de l'eau chaude ou froide sans enlever l'écran *h g*, sans m'approcher même de la table sur laquelle reposait l'appareil et, par conséquent, sans produire des ébranlements ou des secousses qui auraient pu agiter le pendule magnétique.

4. La mesure du temps se faisait à l'aide d'un pendule battant exactement la seconde, suspendu près de l'appareil et observé par un aide qui comptait à haute voix les oscillations.

5. Je ne me dissimule point que ces dispositions expérimentales présentent bien des imperfections et ne permettent pas d'obtenir une approximation très-avancée. Ainsi, j'aurais désiré pouvoir mesurer avec plus d'exactitude le rapport entre la durée des oscillations du pendule magnétique et celles du pendule à secondes. En adaptant, perpendiculairement à l'aiguille *u v*, une règle horizontale légère et graduée, en observant cette règle à l'aide d'une lunette, en mesurant le temps par le moyen d'un chronomètre à pointage, j'aurais sûrement obtenu une approximation bien plus avancée. La disposition du laboratoire et d'autres circonstances encore ne m'ont pas permis de réaliser ce perfectionnement.

6. Avant de commencer les recherches dont le détail va suivre, j'ai eu soin de m'assurer quelles étaient les circonstances qui pouvaient agir, indépendamment des barreaux à l'étude, sur les oscillations du pendule magnétique. De nombreux essais montrèrent que l'heure de la journée est complétement indifférente; l'intensité magnétique du globe éprouve des variations trop faibles pour être appréciées avec mon appareil.

L'amplitude des oscillations influe, comme on le sait, sur sa durée. En provoquant des oscillations suffisamment petites, cette influence de l'amplitude devient tout à fait inappréciable. Je recherchai, par divers essais préliminaires, quelles étaient les grandeurs d'amplitude qui devaient être produites pour qu'on pût compter sur l'isochronisme. — En essayant quelle est l'influence d'un balancement oscillatoire, même faible, du fil de suspension, pendant que l'aiguille se meut dans un plan horizontal, je trouvai bientôt que ce double mouvement modifie la durée d'une oscillation magnétique. Il était donc important d'éviter les mouvements du fil et de lui conserver, pendant les déterminations d'intensité, une verticalité parfaite.

En plaçant un barreau aimanté dans la caisse en cuivre, je m'assurai, ce qui était probable a priori, que l'absence ou la présence de l'eau autour du barreau est absolument indifférente.

II. — Variations d'intensité par un premier réchauffement.

7. Les barreaux qui ont été soumis aux premières expériences étaient des cylindres d'acier ayant 20 centimètres de longueur et pesant 212 grammes. On les aimantait en les plaçant sur les pôles d'un énergique électro-aimant et en opérant, sur leur surface, des frictions avec deux autres aimants suivant la méthode de la touche séparée.

8. Les barreaux 1, 2, 3 et 4 ont été aimantés, placés sous le pendule magnétique et successivement examinés, en même temps qu'on faisait varier la température de l'eau à l'aide du courant de vapeur. Les déterminations d'intensité se faisaient, autant que possible, de 10 en 10°. Pendant la durée de cette détermination, c'est-à-dire pendant que le pendule oscillait, je tâchais de rendre la température momentanément stationnaire en ralentissant l'arrivée du courant de vapeur. Il n'était cependant pas toujours possible d'éviter une marche légèrement ascensionnelle du thermomètre. — Pour chaque température, l'intensité était mesurée deux fois, c'est-à-dire que, après avoir compté une première fois les oscillations magnétiques et celles du pendule à secondes, simultanément, on faisait immédiatement une seconde détermination, parfois même une troisième si les deux premiers résultats présentaient une différence supérieure à celles que l'on peut éviter dans une semblable recherche.

La température initiale n'a pas été la même pour ces quatre barreaux. Chacun d'eux a été chauffé jusqu'à 95 ou 96°. Je n'ai pas voulu arriver à une température supérieure, parce que les vapeurs qui se dégagent assez abondamment près de 100° formaient des courants irréguliers, vers les bords de l'écran *h g*, et agitaient ainsi l'air d'une manière préjudiciable à l'immobilité du fil de suspension. En outre, près de 100°, la vapeur qui arrivait par le tube *a b c* se dégageait à travers le liquide, sans se condenser, en bulles assez tumul-

tueuses, pour provoquer des chocs et des soubresauts de toute la caisse.

9. Le tableau I donne le détail des observations.

TABLEAU I.

Température	Nombre des oscillations.	Durée totale.	Durée d'une oscillation.	Intensité, celle de la terre = 1	A
		BARREAU 1.			
17°	100	176″	1″76	8,94	1000
30°	100	179″	1″79	8,63	972
41°	100	183″	1″83	8,19	922
51°	100	187″	1″87	7,81	891
59°	100	189″	1″89	7,63	859
70°	100 60	197″ 120″	1″97 2″00	6,70	779
80° 1/2	100	204″	2″04	6,40	721
89° 1/2	100	210″	2″10	5,98	674
95°	100	214″	2″14	5,73	645
		BARREAU 2.			
24°	100	143″	1″43	14,06	1000
31°	100	146″	1″46	13,45	956
40°	100	149″	1″49	12,88	916
50°	100	153″	1″53	12,16	865
60°	100	157″	1″57	11,19	817
70°	80	130″	1″62	10,77	766
80°	60	100″	1″66	10,09	717
90°	100	172″	1″72	9,41	669
96°	100	175″	1″75	9,06	644
		BARREAU 3.			
15°	50	106″	2″12	5,85	
30°	50	107″ 1/2	2″15	5,65	
40°	50	109″	2″18	5,47	
61°	50	113″ 1/2	2″27	4,97	
70°	50	116″	2″32	4,71	
80°	50	118″ 3/4	2″37	4,45	
90°	50	126″	2″47	4,04	
95°	50	123″	2″52	3,84	

(Suite du tableau I.)

Température	Nombre des oscillations.	Durée totale.	Durée d'une oscillation.	Intensité, celle de la terre = 1	A
		BARREAU 4.			
20°	50	103″½	2″07	6,18	1000
30°	50	104″	2″09	6,05	978
40°	50	106″	2″12	5,85	946
50°	50	108″	2″16	5,60	906
60°	50	111″	2″22	5,25	849
70°	50	114″½	2″29	4,87	788
80°	50	119″	2″38	4,44	718
90°	50	122″	2″44	4,18	676
95°	50	125″	2″50	3,90	631

On voit que tous les barreaux n'avaient pas la même intensité primitive et que tous ont éprouvé une notable diminution d'intensité par l'élévation de température jusqu'à 95°. — Afin de rendre comparables ces diminutions, on a calculé le rapport entre l'intensité à une température quelconque et l'intensité initiale. Cette dernière étant représentée par 1000, on a formé la colonne A.

10. Afin d'apprécier l'influence d'une même température au-dessus du point initial de chacun d'eux, on a calculé les intensités de 10 en 10°, à partir du point de départ, pour 1, 2 et 3, en les déduisant des intensités observées voisines, par une proportionnalité qui est très-approximativement exacte pour des températures rapprochées. C'est ainsi qu'a été formé le tableau II.

TABLEAU II.

BARREAU 1		BARREAU 2		BARREAU 3	
température	intensité	température	intensité	température	intensité
17°	1000	24°	1000	15°	1000
27°	985	34°	941	25°	978
37°	940	44°	897	35°	944
47°	909	54°	846	45°	913
57°	873	64°	798	55°	869
67°	793			65°	828
77°	725			75°	783
87°	683			85°	739
97°	636				

On voit qu'il y a des différences notables, et la même élévation de température au-dessus de l'état initial ne paraît pas avoir produit le même effet sur les barreaux examinés.

11. En prenant les observations relatives à chaque barreau, on peut chercher quel est le coefficient moyen de diminution de magnétisme pour 1°. Ce calcul donne :

Pour le barreau	1	0,00461
Id.	2	0,00494
Id.	3	0,00436
Id.	4	0,00492

A l'aide de ces coefficients moyens, on peut maintenant calculer, pour chaque barreau, l'intensité à une température quelconque et, afin de les comparer les uns aux autres, faire ce calcul pour 9 points de l'échelle thermométrique de 20° à 95°. L'intensité à 20° étant représentée par 1000, pour chacun d'eux, on forme le tableau III.

TABLEAU III.

température	barreau 1	barreau 3	barreau 4	B observé	C calculé
20°	1000	1000	1000	1000	1000
30°	986	987		984	976
40°	939	946	946	944	945
50°	909		906	908	908
60°	871	869	849	863	863
70°	791	823	788	801	813
80°	731	778	718	742	754
90°	680	714	676	690	690
95°	645	665	631	647	656

On voit que, dans certains points de l'échelle thermométrique, les valeurs sont assez semblables, tandis que, dans d'autres, elles présentent des différences notables. — En cherchant le coefficient moyen de variation pour 1° et en prenant des groupes de 10° on trouve :

de 20 à 30°	0,0016
» 30 » 40°	0,0040
» 40 » 50°	0,0036
» 50 » 60°	0,0045
» 60 » 70°	0,0062
» 70 » 80°	0,0059
» 80 » 90°	0,0052
» 90 » 95°	0,0086

Ce tableau ne représente point une diminution régulière; mais il montre, dans son ensemble, que l'intensité magnétique diminue un peu plus rapidement que la température n'augmente.

12. En présence des variations que présentent les divers barreaux, il est peut-être assez inutile de chercher si une formule empirique peut représenter les variations simultanées de la température et de l'intensité magnétique. J'ai cependant essayé jusqu'à quel point les résultats moyens pourraient se représenter par une formule de la forme :

$$(a) \qquad I = a + bt + ct^2$$

I étant l'intensité, t la température, a, b, c des constantes. En déterminant ces constantes à l'aide de 3 observations prises dans la colonne B, on trouve :

$$a = 1027; \qquad b = -0{,}69; \qquad c = -0{,}034;$$

la formule devient :

$$I = 1027 - 0{,}69t - 0{,}034t^2$$

et en la calculant pour toutes les températures de 20 à 95°, on forme la colonne C qui diffère des résultats observés en B moins qu'on aurait pu s'y attendre.

13. On pourrait chercher, ensuite des données ci-dessus, à quelle température l'intensité magnétique devient nulle dans la supposition d'un décroissement uniforme au-dessus de 95°, ou en supposant que le décroissement soit représenté par la formule *(a)*. On trouve, dans le premier cas, 235°, et dans le second 179°. — La suite de ces recherches montrera qu'à ces températures-là, et même à des températures supérieures, le magnétisme des barreaux est loin d'avoir disparu.

III. — Refroidissement après le premier réchauffement.

14. Les barreaux précédents, après avoir été chauffés jusqu'à 95°, se sont refroidis lentement dans l'eau même où leur température s'était élevée. En faisant osciller le pendule à divers moments de leur refroidissement, il était facile de constater que leur intensité magnétique augmentait et ne devenait stable que lorsque la température elle-même n'éprouvait plus de variations. Mais, la quantité de magnétisme qui réapparaît ainsi, par le refroidissement, n'est jamais égale à celle qui avait disparu par le réchauffement; il reste une perte définitive, d'autant plus considérable que le barreau avait été plus réchauffé. — Voici, pour faire voir d'une manière complète ces variations, les phénomènes présentés par le barreau 1 pendant le refroidissement :

TABLEAU IV.

RÉCHAUFFEMENT		REFROIDISSEMENT	
température	intensité	température	intensité
17°	8, 94	95°	5, 73
30°	8, 63	80°	5, 98
41°	8, 19	70°	6, 12
51°	7, 81	65°	6, 55
59°	7, 63	38°	6, 70
70°	6, 70	17°	6, 70
80° 1/2	6, 40		
89° 1/2	5, 98		
95°	5, 73		

Les barreaux 2, 3 et 4 ont donné lieu à des observations analogues. L'intensité de 3 était de 5,85 à 15°, puis 3,81 à 95° et, après le refroidissement, 4,33 à 16°; celle de 4 était 6,18 à 20°, 3,90 à 25°, puis 4,30 après le refroidissement à 20°. — En comparant les chiffres obtenus pour 1, 3 et 4, c'est-à-dire en représentant par 1000 l'intensité primitive de chacun d'eux, on trouve :

BARREAU 1		BARREAU 3		BARREAU 4	
température	intensité	température	intensité	température	intensité
20°	1000	17°	1000	15°	1000
95°	631	95°	645	95°	651
20°	696	17°	755	15°	735

On voit ainsi que le barreau 1 a repris, après le refroidissement, une intensité de 110 sur 355 qui avaient été perdus, ou 0,31 ; le barreau 3 a repris 84 sur 349 perdus, ou 0,24, et le barreau 4, 65 sur 369 perdus, ou 0,18. — Si l'on veut apprécier la quantité de magnétisme qui a été *définitivement perdue*, en la comparant à l'élévation de température, on trouve, en calculant les observations et en représentant par 1000 l'intensité initiale :

TABLEAU V.

Barreaux	A	B	C
1	78°	245	0,00314
3	80°	265	0,00310
4	75°	304	0,00405

La colonne A renferme le nombre de degrés dont la température s'est élevée ; la colonne B, l'intensité définitivement perdue et C, le coefficient moyen de perte pour 1°. On voit que ce coefficient n'a pas été exactement le même pour les divers barreaux. — Des résultats subséquents feront voir à quoi cette différence doit très-probablement être attribuée.

IV. — Influence de réchauffements successifs.

15. L'appareil qui a servi aux expériences précédentes était très-propre à étudier l'influence de nouveaux réchauffements sur un même barreau. Le barreau, en effet, après s'être refroidi, pouvait être réchauffé par la méthode connue et cela à plusieurs reprises et pendant plusieurs jours de suite, aussi longtemps que les expériences pouvaient présenter de l'intérêt.

Les réchauffements successifs se sont faits généralement entre les mêmes limites de température, de telle façon qu'il était facile d'apercevoir l'influence relative de ces diverses variations.—Afin de ne pas multiplier les tableaux numériques, je donnerai, pour le barreau 3 seulements, la série complète des observations.

TABLEAU VI.

1er RÉCHAUFFEMENT 25 juin		2e RÉCHAUFFEMENT 27 juin		3e RÉCHAUFFEMENT 28 juin		4e RÉCHAUFFEMENT 29 juin		5e RÉCHAUFFEMENT 30 juin	
température	intensité	température	intensité	température	intensité	température	intensité	température	intensité
15°	5,85	16°	4,33	18°	4,05	19°	3,97	21°	3,88
30°	5,65	30°	4,20	30°	3,97	30°	3,88	30°	3,86
40°	5,47			50°	3,84	50°	3,78	50°	3,75
61°	4,97	60°	3,97	70°	3,66	70°	3,59	70°	3,38
70°	4,71								
80°	4,45								
90°	4,09								
95°	3,83	95°	3,55	95°	3,41	95°	3,30	95°	3,28

On voit là d'une manière très-nette comment, pendant chaque refroidissement, l'intensité magnétique revient; comment un nouveau réchauffement la diminue plus que celui qui a précédé et, enfin, comment la variation totale occasionnée par un réchauffement est de moins en moins importante à mesure que les variations de température ont déjà été plus nombreuses.

Le tableau VII donne les observations relatives à 1, 3 et 4; celles du barreau 2 ont dû être abandonnées parce qu'elles ne pourraient

point entrer dans les calculs de moyennes : entre le premier et le second réchauffement, un dérangement étant survenu dans la position de la caisse en cuivre, cet aimant ne s'est plus trouvé dans les mêmes conditions relativement au pendule magnétique.

TABLEAU VII.

température	BARREAU 1 réchauffements 1er	2me	3me	4me	BARREAU 3 réchauffements 1er	2me	3me	4me	5me	BARREAU 4 réchauffements 1er	2me	3me	4me
15°					1000						696	662	649
17°	1000	759				735							
18°							693						
19°								675					
20°			735	735						1000			
21°									666				
30°	972		713		966	718	675	663	659	978	676	640	631
40°		729	697		935					946			
41°	922												
50°		713					656	646	641	906	655	623	
51°	891		681	697									600
54°					850	675				849			
60°	859	697			805		626	614	607	788	631	599	
70°	779	681	659	673	761					718			
80°	721	666			698					676			
90°	674	631	624		651	607	581	564	564	631	565	543	543
95°	645	624	617	631									

Avec ces chiffres, il est facile de calculer quel est, pour chaque barreau, le coefficient moyen de variation dans les divers réchauffements. On trouve ainsi :

TABLEAU VIII.

Barreaux	1er réchauff.	2e réchauff.	3e réchauff.	4e réchauff.	5e réchauff.
1	0,0046	0,00167	0,00155	0,00139	
2	0,0049				
3	0,0043	0,00160	0,00145	0,00146	0,00138
4	0,0049	0,00166	0,00150	0,00132	
			moyennes		
	0,00463	0,00164	0,00150	0,00139	0,00138

Le coefficient de perte diminue à partir de la première opération; mais cette diminution devient plus faible de la 3me à la 4me, puis de la 4me à la 5me. Les barreaux semblent ainsi tendre vers un certain état où une même variation de température produit aussi une même variation d'intensité magnétique.

16. Afin de voir quel serait le résultat d'un beaucoup plus grand nombre de variations, j'ai chauffé et refroidi alternativement, une vingtaine de fois, entre 15 et 95°, le barreau 3; puis, j'ai examiné quel était son coefficient de variation. Les résultats ont été :

21e	réchauffement	0,00178
22e	id.	0,00134
23e	id.	0,00137
24e	id.	0,00144

La variation est donc à peu près la même qu'après quatre ou cinq réchauffements et il est probable qu'en poursuivant ces essais, les résultats n'auraient pas changé.

17. Quant à la perte réelle du magnétisme, elle augmente avec les réchauffements; mais elle paraît tendre aussi vers une certaine limite, ou plutôt, sa valeur devient de moins en moins grande dans les réchauffements successifs. C'est ce qu'on aperçoit d'une façon évidente en calculant, pour chaque barreau, à l'aide des coefficients du tableau VIII, la valeur de l'intensité aux deux limites 20 et 95°.

TABLEAU IX.

réchauff.	BARREAU 1		BARREAU 3		BARREAU 4	
	20°	95°	20°	95°	20°	95°
1er	986	645	978	651	1000	631
2me	761	624	730	607	693	565
3me	735	616	691	581	657	543
4me	735	631	674	564	642	543
5me			666	564		

La perte définitive du magnétisme pour 1°, ce qu'on pourrait appeler le *coefficient de perte définitive* de chaque barreau, diminue avec le nombre des élévations de température. Voici la valeur de ce coefficient envisagé comme une fraction de l'intensité magnétique au commencement de chaque réchauffement :

TABLEAU X.

Barreaux	1er réchauff.	2me réchauff.	3me réchauff.	4me réchauff.
1	0,00314	0,000208		
3	0,00331	0,000506	0,000162	0,000079
4	0,00400	0,00029	0,00009	

18. Cette marche de l'intensité magnétique dans les variations successives de température est donc telle, que les aimants tendent vers un certain état, approximativement stable, où un changement déterminé de température produit un changement également déterminé d'intensité. Les barreaux s'approchent de cet état, qui ne paraît pas pouvoir être rigoureusement atteint, par une sorte de variation asymptotique assez susceptible de se représenter par une figure.

Représentons par AB (fig. III) la variation de température de 20 à 95°. Portons sur les deux perpendiculaires AC, BD les valeurs représentant l'intensité (en prenant la moyenne pour les trois barreaux) à 20 puis à 95°, dans les variations successives de température. Les longueurs Am, Am', Am'', Am''' seront les intensités au commencement de chaque réchauffement; Bn, Bn', Bn'', Bn''' les intensités à la fin. Les lignes mn, nm', $m'n'$, $n'm''$, etc., plus ou moins inclinées sur l'axe AB, représentent, par leur inclinaison et leur plus ou moins grand écartement les unes des autres, les variations de l'intensité magnétique et la grandeur relative des pertes successives.

V. — Influence du temps pendant lequel se produit la variation de température.

19. Dans les expériences précédentes, le temps pendant lequel les variations de température se sont produites a toujours été sensiblement le même. Quelle que soit l'importance de cet élément, dans les phénomènes dont il s'agit, j'ai toujours tâché de maintenir le courant de vapeur tel, que les temps fussent à peu près les mêmes. — MM. Riess et Mooser, dans leur précieux travail sur ce sujet, disent que l'influence de la chaleur est instantanée et dépend seulement du degré de température [1]. Dans un travail récent [2] M. Holmgren conclut que la perte due au réchauffement est plus grande lorsqu'on fait passer le barreau d'acier plus lentement par les températures inférieures [3].

20. Afin de connaître l'influence du temps, il m'a semblé convenable de prendre un barreau amené par des réchauffements et refroidissements successifs à cet état à peu près stable où une même variation de température produit une variation presque constante d'intensité. En effet, si on compare, sous ce rapport, des barreaux différents, on ne peut guère conclure avec certitude relativement au temps, puisque les résultats peuvent varier d'une façon assez sensible d'un morceau d'acier à un autre et, si l'on examine un même aimant, l'influence du temps se complique des variations qui se manifestent, comme on l'a vu, du premier au second ou du second au troisième réchauffement.

J'ai donc choisi un barreau qui avait déjà subi plusieurs réchauffements et refroidissements successifs, puis je l'ai soumis à des changements assez brusques de température. Grâce aux dispositions de mon appareil, ce résultat s'obtenait facilement en faisant agir le tube de caoutchouc comme siphon suivant qu'on élève ou abaisse son extrêmité. Je pouvais, de cette manière, introduire dans la caisse en cuivre, sans la toucher, sans la découvrir et sans changer en aucune façon la position de l'aimant, de l'eau froide ou chaude pendant un temps assez court. — Le barreau 1 avait servi aux recherches précédentes où les variations de température entre 20 et 95° duraient généralement de 100 à 120 minutes. Il se trouvait dans un état tel que, lors de la dernière expérience, son intensité était 6,55 à 20° et 5,60 à 95°. Il fut soumis à des variations brusques de température, comme on le voit dans le tableau suivant où se trouvent indiqués les temps, les températures et les intensités.

[1] *Poggendorf's Annalen,* tom. 17, 1829, pag. 410 : « Uebrigens, ist die Wirkung der Wärme instantan, etc. »

[2] Acta regiæ societatis scientiarum upsaliensis, pag. 322.

[3] J'ai eu connaissance des recherches de M. Holmgren il y a peu de temps seulement, alors que mes expériences étaient terminées et pendant que je m'occupais de la rédaction du présent mémoire.

TABLEAU XI.

temps		température	intensité	
				a
2 h. 45′	0′	22°	6,66	
» 54′	9′	84°	5,86	
3 h. 5′	20′	95°	5,58	
» 8′	23′	30°	6,56	
» 13′	28′	30°	6,56	*b*
» 20′	35′	30°	6,56	
» 40′	55′	30°	6,56	
» 45′	60′	85°	5,81	*c*
» 50′	65′	93°	5,66	
4 h.	75′	24°	6,20	*d*
» 11′	86′	24°	6,20	
» 13′	88′	78°	5,45	*e*
» 40′	115′	15°	6,45	

Dans la dernière variation à longue durée (90′) que le barreau avait subie, la diminution d'intensité était de 6,55 — 5,60 pour 75°, ou de 0,0019 de l'intensité primitive (6,55) pour 1°. — Le tableau précédent montre *(a)* qu'un changement de 62°, en 9′, donne une variation de 0,80 ou, pour 1°, de 0,00194 de l'intensité primitive (6,66). En *(c)*, il s'est produit un changement de 55° en 5′ et une variation de 0,65, ce qui donne, pour 1°, 0,00209. — On voit ainsi qu'à deux reprises, il a suffi de 9′ et de 5′ pour produire sensiblement la même variation que celle qui avait été obtenue pendant un réchauffement de 90′.

21. De semblables recherches ont été faites avec le barreau 4. Ce cylindre avait déjà été soumis à quatre réchauffements et refroidissements; lors de sa dernière épreuve, il avait été chauffé pendant 75′ et avait présenté un coefficient de variation de 0,0020. Le tableau XII montre les variations nouvelles auxquelles il a été soumis.

TABLEAU XII.

temps		température	intensité	
2 h. 30′	0′	22°	4,70	
3 h. 15′	45′	85°	4,09	*a*
» 22′	52′	24°	4,61	*b*
» 38′	68′	24°	4,61	
» 43′	73′	78°	4,13	*c*
» 48′	78′	22°	4,66	
4 h. 4′	94′	80°	4,13	*d*
» 10′	100′	80°	4,13	
» 14′	104′	22°	4,61	
» 20′	110′	22°	4,61	

On voit *(a)* qu'une première variation s'est faite en 45′; la perte a été de 0,61 pour 63°, ou de 0,0020 de l'intensité primitive pour 1°. En *c*, il y a eu, en 5′, un changement de température de 54° et une perte de 0,48, ou de 0,0019 par 1°; en *d*, en 16′, une variation de 58° et une perte de 0,53, ou 0,0019 pour 1°. — Encore ici, les diminutions d'intensité magnétique ont été sensiblement les mêmes pendant des réchauffements rapides et pendant des réchauffements lents.

Il paraît résulter assez évidemment de ces chiffres que le temps pendant lequel la variation de température agit n'influe guère sur la quantité dont le magnétisme est diminué, dans le cas, au moins, où l'on a des barreaux qui sont déjà arrivés, par des réchauffements plusieurs fois répétés, à un certain état approximativement stable. Dans les expériences de M. Holmgren, les barreaux examinés étaient-ils soumis pour la première fois aux variations de température, ou sont-ce les mêmes qui avaient déjà servi à de précédentes expériences?... L'auteur ne l'indique pas.

VI. — Influence du refroidissement au-dessous de la température à laquelle l'aimantation a lieu.

22. Lorsqu'on a chauffé un barreau au-dessus de la température à laquelle il a été aimanté, puis qu'on le laisse ensuite refroidir, une partie du magnétisme réapparaît. Dans les expériences précédemment décrites et dans celles des auteurs qui se sont occupés de la même question, ce refroidissement ne s'est guère prolongé au-delà des limites à partir desquelles on a primitivement chauffé, limites où, généralement, l'aimantation avait eu lieu.

J'ai voulu voir quelle est l'influence d'un refroidissement à partir de la température d'aimantation et avant que le barreau ait été préalablement porté à une température supérieure. En faisant cet essai, je m'attendais un peu à voir l'intensité augmenter et, afin de pouvoir produire une variation de température assez notable, j'ai cherché à aimanter les barreaux à un point déjà élevé de l'échelle thermométrique.

23. Les barreaux précédemment employés ont été chauffés au rouge sombre, puis trempés de manière à les ramener à l'état naturel; de nouveaux barreaux semblables aux premiers ont été mis en usage. Pour les aimanter, j'ai employé une petite caisse en cuivre mince, un peu plus longue que les barreaux eux-mêmes; cette caisse pouvait être placée sur les deux pôles d'un gros électro-aimant et remplie d'eau à une température déterminée; c'est dans son intérieur que les barreaux étaient aimantés. Pendant qu'ils subissaient l'influence de l'électro-aimant, on les soumettait à des frictions convenables suivant la méthode de la touche séparée et ils demeuraient, durant cette opération, dans une eau maintenue en général de 50

à 60°. Lorsqu'ils avaient acquis une intensité suffisante, on transportait rapidement la petite caisse qui les contenait près de celle qui se trouvait placée sous le pendule magnétique. Dans cette dernière, se trouvait préparée de l'eau, à la même température. Le barreau était porté aussi promptement que possible d'une des caisses à l'autre et, à l'aide d'un courant de vapeur convenable, on maintenait la température de l'eau qui l'entourait aussi constante que possible pendant le temps nécessaire pour que le pendule magnétique, forcément un peu agité pendant cette opération, fût devenu parfaitement immobile. On déterminait alors l'intensité et on suivait les variations pendant le refroidissement.

Dans la plupart de ces expériences, j'ai tâché de provoquer un refroidissement jusque dans le voisinage de 0°, en introduisant, vers la fin de l'expérience, uue certaine quantité d'eau glacée, par le moyen du tube-siphon de caoutchouc.

24. Lors de la première épreuve (barreau 6), je trouvai que, pendant le refroidissement, l'intensité magnétique diminuait d'une manière continue, comme pendant un réchauffement. La variation fut la suivante :

température	durée d'une oscillation	intensité
55°	2″04	6,39
30°	2″08	6,12
12°	2″10	5,96
5°	2″12	5,85

Je pensai que le barreau avait été aimanté au-delà de son point de saturation et que la diminution observée dépendait de cette circonstance et non de la variation de température. — Un nouveau cylindre (4) fut aimanté à 60°, avec toutes les précautions précédemment décrites et très-faiblement, afin d'être à coup sûr bien loin du point de saturation. Il donna les résultats suivants :

température	durée d'une oscillation	intensité
60°	3″36	1,72
42°	3″41	1,63
23°	3″49	1,53
3°	3″59	1,37

Un autre barreau (5) fut aimanté plus faiblement encore. Voici sa marche pendant l'abaissement de la température :

température	durée d'une oscillation	intensité
60°	4″30	0,66
30°	4″33	0,63
23°	4″40	0,58
2°	4″47	0,53

Le phénomène se présentait ainsi toujours le même avec des ai-

mants très-inégalement intenses. Ce qui montre bien que l'abaissement de température était la seule cause de la diminution d'intensité, c'est que le barreau 5 fut maintenu, pendant une demi-heure, à 23° et son intensité ne changea pas; cinq déterminations consécutives donnèrent 0,58; 0,58; 0,61; 0,58; 0,58. — En cinq minutes, on les refroidit brusquement à 2° et trois déterminations donnèrent: 0,53; 0,53; 0,53. — Une tentative analogue fut faite sur un autre cylindre (2). Il fut aimanté de 53 à 58° et présenta alors une intensité de 1,228. On le maintint à cette température, sous le pendule magnétique, à l'aide d'un courant de vapeur convenable, depuis 2 heures 40 minutes à 4 heures 5 minutes (une heure et demie). Des déterminations d'intensité faites à divers intervalles donnèrent: 1,228; 1,229; 1,228; 1,227; 1,227. On le refroidit alors brusquement et on trouva :

temps	température	intensité
4 h. 15′	28°	1,219
» 20′	15°	1,213
» 35′	0°	1,208

Je citerai encore une expérience dans laquelle je voulus m'assurer que cette influence du refroidissement ne tenait point à ce que l'aimantation avait eu lieu au-dessus des temperatures ordinaires. Un barreau fut aimanté le 18 novembre, à une temprature ambiante de 6 à 8°. On l'abandonna pendant un mois à l'air libre. Le 18 décembre, il fut placé sous le pendule magnétique où il demeura 12 jours pendant lesquels il fut soumis à un certain nombre de déterminations. Jusqu'au 30 décembre, la température demeura à peu près constante et on trouva :

temps	température	intensité
18 décembre	2°	5,11
20 id.	0°5	5,08
26 id.	2°	5,10
30 id. (1 h.)	4°	5,08

On introduisit alors, avec précaution, dans la caisse et autour du barreau, un mélange réfrigérant qui abaissa sa température jusqu'à — 22° et même — 25°. La détermination d'intensité répétée quatre fois donna :

— 22 à — 25°	4,90
id.	4,90
id.	4,90
id.	4,90

25. Ainsi, la perte de magnétisme par le refroidissement au-dessous de la température d'aimantation ne saurait être mise en doute. — Il en résulte que l'état magnétique d'un barreau et sa temprature sont intimément liés et que, à partir de l'aimantation, un refroidissement diminue l'intensité aussi bien que le réchauffement. On peut

donc énoncer une loi plus générale que celle que l'on admet ordinairement pour ce genre de phénomènes et dire : *Un barreau d'acier étant aimanté à une température quelconque, toute variation de température diminue son intensité magnétique.* — L'intensité magnétique dépend d'une façon bien intime de l'état moléculaire du corps aimanté, et tout changement dans cet état moléculaire, écartement ou rapprochement des molécules (dans la première variation au moins qui succède à l'aimantation) détermine une perte de force magnétique.

26. Il s'agit maintenant de voir dans quelle mesure se fait la perte par refroidissement. — Afin de rendre comparables les résultats des divers barreaux, on a représenté par 1000 l'intensité au moment de l'aimantation, puis on a calculé quel chiffre représente cette intensité dans les températures plus basses que celles-là. Les calculs appliqués aux barreaux 1, 3, 4, 5, 6 donnent les résultats du tableau XIII.

TABLEAU XIII.

température	barreau 1	barreau 3	barreau 4	barreau 5	barreau 6
60°	—	—	—	1000	—
53 à 58°	—	1000	—	—	1000
55 à 60°	1000	—	1000	—	—
45°	—	—	—	939	—
42°	—	—	953	—	—
40°	—	973	—	—	990
30°	934	—	—	—	—
23°	—	—	900	879	958
17°	—	878	—	—	—
12°	898	—	—	—	932
5°	—	—	—	—	916
3°	—	—	807	—	—
2°	—	—	—	803	—
1°	—	806	—	—	—

A l'aide de ces données, il est facile d'obtenir le coefficient moyen de variation; c'est-à-dire, la fraction de l'intensité primitive qui disparaît pour 1°. On trouve ainsi :

TABLEAU XIV.

barreaux	variation de tempér.	intensité perdue	coefficient
1	46°	102	0,0022
2	55°	20	0,0004
3	56°	194	0,0035
4	55°	193	0.0035
5	58°	197	0,0034
6	50°	84	0,0017

On aperçoit des différences assez notables; le barreau 2, surtout, présente un coefficient beaucoup plus faible. Cet écart considérable tient à des circonstances que je ne saurais indiquer, et il convient peut-être d'éliminer ce résultat-là pour obtenir le coefficient moyen qui se trouve alors :

0,00286.

Si l'on compare les chiffres du tableau XIV avec ceux du tableau VIII, relatifs à la perte par réchauffement, au-dessus de la température d'aimantation,

0,00461
0,00494
0,00436
0,00492

on voit que les premiers sont notablement plus faibles. La moyenne des derniers est :

0,00471

c'est-à-dire presque le double du coefficient de variation par refroidissement.

Si donc l'abaissement de température au-dessous de l'aimantation produit le même effet que le réchauffement quant au *sens* de la variation, cet effet est bien moins considérable.

27. Lorsque les barreaux ont été refroidis, si on élève de nouveau leur température, on arrivera au degré de l'échelle thermométrique auquel l'aimantation a primitivement eu lieu, puis on dépassera ce point-là. En produisant cette variation, on aperçoit que le réchauffement détermine une nouvelle perte ; c'est-à-dire qu'on a le phénomène remarquable d'une diminution d'intensité qui se continue lors même que le sens de la variation de température a changé. En d'autres termes, les barreaux donnent lieu au phénomène général constaté lors du réchauffement ; seulement, comme on le verra bientôt, la température à laquelle l'aimantation a eu lieu ne devient pas complétement indifférente dans ces nouvelles variations. Voici d'abord les résultats bruts des expériences pour les cylindres 4 et 6.

L'aimantation avait eu lieu à 66 et 55°. L'intensité, à ce point-là, était 1,71 et 6,39. Par le refroidissement du premier jusqu'à 3°, l'intensité était devenue 1,37 ; par le refroidissement du second à 5°, elle était devenue 5,85. En les chauffant on trouve :

TABLEAU XV.

BARREAU 4		BARREAU 6	
température	intensité	température	intensité
20°	1,31	22°	5,86
55°	1,30	40°	5,73
65°	1,26	50°	5,66
76°	1,24	70°	5,40
85°	1,19	80°	5,25
93°	1,14	90°	4,95
		95°	4,71

Afin de rendre les résultats comparables, on a calculé les observations pendant le réchauffement, pour les barreaux 3, 4, 5 et 6, en les rapportant, pour chacun d'eux, à l'intensité primitive au moment de l'aimantation, cette intensité étant représentée par 1000.— On obtient alors les chiffres du tableau suivant :

TABLEAU XVI.

température	barreau 3	barreau 4	barreau 5	barreau 6
10°	829	—	—	—
20°	—	765	—	—
22°	—	—	863	917
40°	—	—	—	898
50°	788	—	818	885
55°	—	760	—	—
60°	—	—	818	—
70°	—	—	—	845
71°	—	—	773	—
76°	—	725	—	—
79°	—	—	758	—
90°	—	—	636	775
93°	—	666	—	—
95°	—	—	—	—

Si on cherche quelle est la variation moyenne pour 1°, on trouve :

barreaux	variation de tempér.	intensité perdue	coefficient
3	40°	41	0,00125
4	70°	99	0,0018
5	68°	227	0,0039
6	68°	142	0,0023

Le coefficient est calculé en prenant le rapport entre l'intensité perdue et celle qui existait au commencement du réchauffement. — Ces coefficients sont plus faibles que ceux des expériences où l'on réchauffait des barreaux pour la première fois, au-dessus de la température primitive d'aimantation (tabl. VIII). La moyenne pour ces derniers, est 0,00471 ; tandis que pour les précédents, elle est 0,00231. Cette dernière valeur est cependant plus forte que celle qui correspond à un second réchauffement (tabl. VIII).

Mais, il convient de voir si la variation de l'intensité est la même lorsque la température s'approche du point où l'aimantation a eu lieu, puis lorsque le réchauffement se poursuit au-delà de ce point. En d'autres termes, il faut rechercher le coefficient de variation après avoir partagé le réchauffement total en deux périodes ; l'une jusqu'à 55° ou 60°, l'autre comprenant les températures supérieures. L'aimantation a eu lieu à 50° pour le barreau 3, à 55° pour 4, à 60° pour 5 et à 50° pour 6. — Le tableau XVII met bien en évidence les intensités de chaque barreau aux deux limites et à la température intermédiaire correspondant à l'aimantation.

TABLEAU XVII.

BARREAU 3		BARREAU 4		BARREAU 5		BARREAU 6	
tempér.	intensité	tempér.	intensité	tempér.	intensité	tempér.	intensité
10°	829	20°	765	22°	863	22°	917
50°	785	55°	760	60°	818	50°	885
		93°	666	90°	636	90°	775

Si l'on calcule maintenant le coefficient de variation pour chacun d'eux, on trouve :

A, coefficient de perte par réchauffement jusqu'à la température d'aimantation;

B, coefficient de perte par réchauffement au-delà de la température d'aimantation.

barreaux	A	B
3	0,0013	
4	0,00019	0,0032
5	0,00130	0,0060[1]
6	0,0012	0,0030

On voit que la variation est moins grande jusqu'à la température d'aimantation. La différence est assez analogue à celle qu'on observe entre les coefficients de perte lors d'un premier puis lors d'un second réchauffement (tabl. VIII).

28. Quand un barreau a éprouvé une première fois les modifications moléculaires, quelles qu'elles soient, qui accompagnent une variation de température, les modifications suivantes influent moins sur son état magnétique. Dans le cas actuel, le réchauffement jusqu'à 50 ou 60° est la seconde modification que le barreau éprouve, au point de vue des changements de température, entre ces limites-là; tandis que, dans les températures supérieures, ce réchauffement est la première variation. — Il se pourrait cependant que le fait seul que la variation de température est inférieure au point d'aimantation ne soit pas indifférent à la grandeur de la perte de magnétisme. Cette supposition paraîtra plus probable par les considérations qui seront développées bientôt.

VII. — Influence comparative des variations de température produites au-dessus et au-dessous de la température primitive d'aimantation.

29. Lorsque les barreaux cités dans les derniers tableaux, sont abandonnés au refroidissement, ils reprennent une petite portion du magnétisme qu'ils avaient perdu. Ils se comportent donc comme des aimants dont la température a varié au-dessus du point primitif d'aimantation, ou, en d'autres termes, la perte du magnétisme, par refroidissement, ne s'observe que lors du premier refroidissement après l'aimantation [2].

Il est intéressant de voir, maintenant, si plusieurs variations suc-

[1] Ce coefficient me paraît trop fort. Je ne saurais dire à quoi tient cette valeur maximum.

[2] Ce fait, qui est évident d'après les tableaux précédents, ne m'avait pas frappé lorsque j'annonçai, pour la première fois, l'influence du refroidissement au-dessous de l'aimantation, et pourtant les chiffres bruts et enrégistrés de mes expériences en étaient une preuve. M. Wiedemann, dans un excellent travail où il a bien voulu répéter quelques-uns de mes essais, m'y a rendu attentif.

cessives de température les amènent aussi à cet état à peu près stable où un certain changement dans l'échelle thermométrique produit un changement toujours le même dans l'intensité. — Dès les premières recherches, il m'a paru que les cylindres dont on fait varier plusieurs fois la température, au-dessous de l'aimantation, présentent une variation d'intensité moins grande que les autres. Le tableau suivant donne la marche du phénomène pour le barreau 3, soumis pendant plusieurs jours de suite à des changements de température toujours inférieurs à la température de son aimantation. Ce barreau fut aimanté de 50 à 55°.

TABLEAU XVIII.

TEMPS	TEMPÉRATURE	INTENSITÉ	
14 avril	53°	5,52	1000
	17°	4,85	878
	1°	4,45	816
15 avril	50°	4,35	788
	18°	4,35	788
18 avril	50°	4,31	781
	2°	4,40	797
21 avril	12°	4,35	783
	49°	4,31	781
	4°	4,38	793
23 avril	48°	4,35	798
	4°	4,45	806
30 avril	14°	4,475	809
	50°	4,45	806
	20°	4,475	809
4 mai	11°	4,475	809
5 mai	11°	4,45	806

Il paraît que du 23 au 30, il y avait eu un léger déplacement dans la position du barreau; son intensité semble plus forte relativement à la terre, mais cela n'empêche point de voir que ses variations d'intensité finissent par être très-peu prononcées pour des variations de température assez notables.

30. Afin de bien reconnaître quelle est l'influence des changements nombreux de température, j'ai choisi un cylindre trempé au rouge sombre, je l'ai aimanté de 55 à 60°, puis je l'ai soumis 14 fois à une opération qui consistait à le refroidir jusqu'à — 10°, dans un mélange réfrigérant, puis à le chauffer jusqu'à 60° dans l'eau. C'est après avoir subi ces vicissitudes qu'il a été placé dans l'appareil servant à déterminer l'intensité. Il fut examiné là, à diverses températures, variant de 15 ou 20° à 45 ou 50°. — L'intensité magnétique varia si peu que, bien souvent, mes moyens d'observation n'étaient pas suffisants pour constater un changement. Ainsi : 6,32 à 20° ; 6,29 à 48°. 20° : . . 6,35 ; 48° : . . 6,32 . 24° : . . 6,32 ; 20° : . . 6,33 ; etc.

Ce barreau fut laissé pendant plusieurs jours en place et il continua à présenter ainsi une sorte de constance approximative très-remarquable.

Un autre, trempé aussi au rouge sombre, fut aimanté à 50° ; il présentait une intensité de 8,40, qui devint 7,54 à 14°. Il fut également soumis à une série de réchauffements et refroidissements successifs entre 15 et 50°, puis fut de nouveau examiné sous le pendule magnétique.

Voici quelques-unes des observations, poursuivies pendant plusieurs jours de suite :

temps	température	durée de 100 oscill.	intensité
4 juin	15°	177″ 1/2	7,91
	—	177″	7,96
	50°	177″ 1/2	7,91
	—	177″	7,96
	—	178″	7,85
	17°	177″ 1/2	7,91
	—	177″ 1/4	7,94
	50°	178″	7,85
	—	177″ 1/4	7,94
	23°	177″ 3/4	7,90
	—	177″ 3/4	7,90
	—	177″ 1/2	7,91
5 juin	20°	177″ 1/2	7,91
	50°	177″	7,96
	—	177″ 1/2	7,91
	37°	177″ 1/2	7,91
6 juin	20°	176″ 1/2	8,01
	—	176″ 1/2	8,01
	48°	176″ 3/4	7,99
	—	176″ 1/2	8,01

On voit que, encore ici, les variations d'intensité sont très-faibles et inférieures à ce qu'elles sont, pour de pareils écarts de température, lorsque la variation se fait au-dessus de la température d'aimantation. Les mêmes recherches entreprises avec d'autres barreaux m'ont donné des résultats analogues, et j'ai souvent eu l'occasion de regretter que des moyens d'observation plus précis ne fussent pas à ma disposition pour constater des différences si minimes, qu'elles devenaient souvent inappréciables à mon appareil. C'est cette insuffisante approximation dans mes moyens de mesurer le temps et d'apprécier rigoureusement le commencement et la fin d'une série d'oscillations magnétiques, qui est, sans doute, la cause des irrégularités qu'on remarque dans les chiffres précédents. — Ces résultats montrent, en tout cas, que la variation d'intensité est extrêmement faible et, si on les compare à ceux du tableau IX, on verra une différence prononcée.

31. Afin d'avoir un barreau préparé dans les conditions ordinaires et tout à fait comparable aux précédents, j'en ai aimanté un vers 19 à 20°, puis je lui ai fait subir 36 variations de température de 20 à 90°. Examiné au point de vue de son intensité, il a donné les résultats suivants :

temps	température	durée de 100 oscill.	intensité
23 juin	18°	154″ 1/2	10,82
	36°	156″ 1/2	10,42
	—	155″	10,69
	65°	160″ 1/2	9,89
	—	160″	9,95
24 juin	18°	156″	10,49
	—	156″	10,49
	65°	160″ 3/4	9,82
	—	161″ 1/4	9,75
27 juin	21°	158″ 1/2	10,18
	—	158″ 1/2	10,18
	68°	164″	9,44
	—	164″	9,44
	46°	162″	9,69

On voit que, chaque jour, la variation de température de 20 à 65 ou 68° provoque une variation d'intensité notablement supérieure à

celle qui est constatée pour les barreaux qui précèdent immédiatement. On remarquera, en outre, que malgré les 36 variations de température qu'a subies l'aimant, il continue à perdre un peu, chaque jour, ou plutôt à chaque changement nouveau dans son état thermométrique. Il se peut, cependant, qu'un nombre suffisamment grand de variations amène le barreau à un état où il ne diminue décidément plus; c'est au moins ce qu'a observé M. Holmgren [1]. M. Wiedemann a répété, en variant les méthodes d'observations, les expériences qui précèdent[2] et il est arrivé à des résultats analogues. Un de ses barreaux, aimanté à 18°, chauffé puis refroidi et chauffé de nouveau un grand nombre de fois présentait, à la fin, une variation de 92 (0°) à 69 (100°). Un autre barreau, au contraire, aimanté d'abord à 100° puis refroidi à 0°, réchauffé et refroidi un grand nombre de fois, ne variait plus que de 83 (0°) à 79 (100°). Le coefficient de variation du premier est 0,0025; celui du second: 0,00048.

32. C'est un fait bien remarquable que les deux états différents dans lesquels se trouvent des barreaux de même dimension, de même substance, trempés de la même manière, tous les deux magnétiques; mais l'un variant entre certaines limites de température plus que l'autre, et cette inégalité se rattachant aux variations subies à partir de la température d'aimantation.

33. Les phénomènes qui précèdent ne sont peut-être pas indifférents pour l'étude d'une des questions les plus importantes de la physique du globe, c'est-à-dire l'état magnétique de la terre. La détermination de l'intensité magnétique terrestre ne peut être entreprise, avec précision, que si l'on tient compte des variations notables que subit le barreau lui-même. Que l'on emploie la méthode des oscillations ou le pendule bifilaire de Gauss, le résultat définitif dépend toujours de l'intensité du barreau aimanté au moment où l'on observe, c'est-à-dire d'une quantité qui varie avec la température.

Les premières expériences, ayant pour objet l'intensité magnétique du globe, entreprises par des physiciens illustres, ne sont pas toujours corrigées de l'influence de la température et elles sont ainsi entachées d'une erreur assez grave. Hansteen, dans ses nombreux travaux sur ce sujet, s'est fortement préoccupé de l'influence de la chaleur; il a cherché, un des premiers, à la déterminer et à en tenir compte et ils s'est parfaitement aperçu de la difficulté que présentait cette recherche et des différences qui se rencontrent dans des barreaux en apparence semblables[3]. M. Christie[4] signale également des

[1] Ouvrage cité, page 315.

[2] J'avais annoncé ces résultats dans la Bibliothèque universelle, janvier 1857.

[3] Poggendorf's Annalen, 1827.

[4] Philosophical Transactions, 1825.

différences dans les divers points de l'échelle thermométrique. Cet auteur, ainsi que Kupffer, qui s'est occupé avec tant de persévérance de ces questions, savait que par des variations successives de température on amène les aimants à un état plus stable.

Dans une époque plus rapprochée de nous, on a moins cherché à connaître la vraie loi qui relie la température et l'intensité magnétique des barreaux, qu'à déterminer empiriquement l'influence de la température sur les indications de l'aiguille dans les circonstances où on l'observe. C'est ainsi qu'ont agi, par des méthodes différentes et en employant beaucoup d'ingénieuses précautions, MM. Bravais [1] et Lamont [2].

Tous les auteurs sont d'accord pour signaler de grandes difficultés dans la détermination de la correction de la température, difficultés qui proviennent surtout des différences que présentent entre eux les divers aimants, ou, un même barrreau, dans les divers points de l'échelle thermométrique. — Ces irrégularités pourraient bien provenir, en partie au moins, du fait qu'il a été aimanté, généralement, *entre les limites de températures entre lesquelles on l'emploie*. Les résultats rapportés plus haut montrent, d'une manière évidente, que la température du point d'aimantation est, en quelque sorte, une température exceptionnelle, qui n'est point indifférente aux phénomènes auxquels le barreau donnera lieu plus tard. Il est fort probable que, dans la suite des variations, le coefficient n'est pas le même pour les températures supérieures et pour les températures inférieures à ce point-là. Dans les expériences préliminaires, où l'on fait varier le barreau entre certaines limites de chaleur pour déterminer sa correction, on aura des résultats qui ne seront point parfaitement les mêmes suivant que ces deux limites seront l'une et l'autre supérieures à la température d'aimantation, ou bien l'une supérieure et l'autre inférieure.

Il faudra préférablement *aimanter le barreau à une température sûrement au-dessus des limites entre lesquelles on se propose de le faire varier plus tard dans les observations*. Jusqu'à présent, on a toujours aimanté les aiguilles destinées aux recherches du magnétisme terrestre, dans les températures ordinaires, puis on les faisait varier un grand nombre de fois jusque dans des points assez élevés de l'échelle thermométrique. — Ne conviendrait-il pas de les aimanter plutôt à une température *supérieure* à celle que l'on peut attendre dans les observations, à 40 ou 50° par exemple? Après les avoir aimantés, on les ferait varier un grand nombre de fois entre cette limite-là et 20° au-dessous de 0°. Il est fort probable qu'alors, ensuite des recherches et des raisonnements qui précèdent, leur varia-

[1] Observations de l'intensité magnétique terrestre en France, Suisse et Savoie. — Sur les observations de l'intensité magnétique horizontale à Bossekop en 1838 et 1839.

[2] Beschreibung der an der Munchern Sternwarte zu der Beobachtungen verwendete Instrumente und Apparate. Munchen, 1851.

tion serait tout à la fois plus régulière et plus faible. — Il est évident que, plus la variation est faible, plus les erreurs, quelles qu'elles soient (détermination insuffisamment exacte du coefficient de correction, appréciation fausse de la température au moment de l'observation, etc.) seront diminuées.

Il n'y a pas à craindre que l'intensité magnétique à communiquer aux aiguilles ne puisse être suffisante si on les aimante à une température un peu élevée; de nombreuses tentatives m'ont prouvé qu'à 50, 60 et même 80°, on peut donner à un barreau une force bien suffisante pour les mesures relatives au magnétisme terrestre.

VIII. — Variation de l'intensité magnétique au-dessus de 100°.

34. Dans la première partie de ces Recherches, on a vu avec quel degré de vitesse les aimants perdent leur intensité magnétique pour une certaine élévation de température. En supposant que la diminution continue à se faire suivant les mêmes lois, on a pu remarquer qu'une température même peu élevée devait anéantir complétement le magnétisme des barreaux ou, du moins, le diminuer tellement qu'il ne serait pas possible de le constater. — Il est sûrement intéressant de voir comment les barreaux se comportent au delà de 100°, de suivre leurs variations d'intensité dans des points de l'échelle thermométrique où l'on ne peut point les amener à l'aide de l'eau bouillante.

La plupart des recherches qui ont été faites dans les températures supérieures à 100° se rapportent à l'état incandescent du fer et, depuis longtemps, on répète qu'à ce point-là, peu précis dans l'échelle thermométrique, les aimants ont entièrement perdu leurs propriétés caractéristiques. — Gilbert déjà dit que : « les aimants artificiels et « naturels perdent leur magnétisme par le feu ». Boyle et Lémery[1] disent que cette perte a lieu avant le rouge. Des essais assez nombreux ont été faits par Gilbert, Dufay[2], J. C.[3], etc. sur l'intensité magnétique pendant le rouge plus ou moins vif et après le refroidissement. — Plus récemment, Barlow et Bonnycastle[4] ont aussi examiné les résultats d'une température élevée sur les barreaux d'acier.

Mais, entre 100° et le rouge il y a un intervalle considérable pendant lequel le magnétisme des aimants éprouve des variations et une diminution qui n'ont point été étudiées. Le moment où le magnétisme abandonne les barreaux d'acier est, sans doute, bien supérieur à 100°; mais on ne saurait dire s'il est éloigné ou rapproché du rouge. Les recherches dans les températures supérieures à 100° ont été en général négligées. M. Plücker[5], cependant, a examiné les

[1] Mémoires de l'Académie de Paris, 1700.
[2] Mémoires de l'Académie de Paris, 1728.
[3] Philosophical Transactions, 1694.
[4] Poggendorf's Annalen, 1827.
[5] Poggendorf's Annalen, 1848.

variations que présentait un barreau de fer, aimanté par le courant de deux éléments de Grove, alors qu'il était plongé dans du sable et porté jusqu'à 300°.

35. Je suis parvenu à suivre les variations de l'intensité magnétique des barreaux d'acier jusqu'à 260°, et à constater que, à cette température certes bien éloignée du rouge, les aimants ne conservent plus qu'une faible fraction de leur force primitive. L'influence de la trempe s'est ensuite montrée d'une manière très-nette.

36. Afin de chauffer les barreaux au-dessus de 100°, j'ai dû employer une disposition autre que celle qui a été précédemment décrite. L'appareil consistait en une caisse en cuivre dans laquelle les barreaux étaient renfermés (fig. 3); cette caisse, remplie d'huile de lin, se fermait hermétiquement à l'aide d'un couvercle muni de deux ouvertures tubulées, l'une destinée au thermomètre, l'autre à la sortie des vapeurs. La cuvette du thermomètre venait se placer immédiatement à côté du barreau en expérimentation et plongeait par conséquent dans l'huile. Le barreau était élevé, par des supports, jusqu'aux trois quarts, environ, de la hauteur de la caisse, afin d'éviter son contact avec le fond. La caisse renfermant le barreau était placée sur une grille, immédiatement au-dessous d'un pendule magnétique constitué par le petit barreau cylindrique de 20 grammes, précédemment indiqué. Les précautions étaient prises pour que le gros barreau fût exactement parallèle au pendule dans le méridien magnétique, et pour que la verticale du fil passât par son milieu. — La caisse étant close était solidement attachée à la grille, par des fils de cuivre, afin d'éviter tout dérangement.

37. Les barreaux examinés étaient des morceaux d'acier cylindriques un peu plus petits que ceux dont il a été question jusqu'à présent; ils avaient 16 centimètres de longueur, 11 millimètres de diamètre, et pesaient, en moyenne, 130 grammes. — Ils étaient préalablement trempés puis aimantés à l'aide d'un énergique électro-aimant. Les expériences n'ont jamais été faites que plusieurs jours après l'aimantation, afin qu'il n'y eût pas à craindre une perte provenant de sursaturation.

38. A la distance où se trouvait de la caisse le pendule magnétitique (10 centimètres environ), les courants d'air chaud, produits par l'élévation de température, l'auraient agité trop vivement en même temps qu'ils auraient influé sur son intensité. Pour parer à cet inconvénient, la caisse était recouverte par un écran en bois d'environ 15 décimètres carrés, percé convenablement pour le thermomètre et le tube de vapeur. Au-dessus de cet écran se trouvait une couche de coton d'environ 3 centimètres, puis un nouvel écran en carton. Le barreau pendule était alors à 3 ou 4 centimètres au-dessus de cette dernière plaque ; les courants d'air chaud ne se sont point produits et, quoique la température de la caisse ait été portée

à 260° et plus, la couche d'air environnant le pendule a varié au plus de 8 à 10°. — La caisse était chauffée directement à l'aide de deux lampes à alcool. L'intensité magnétique aux diverses températures se déterminait comme précédemment; seulement, il se présentait ici une difficulté assez sérieuse. Le chauffage par le moyen de lampes à alcool ne permettait point de ralentir, à un moment donné, l'élévation de la température et de la maintenir constante pendant la durée d'une détermination d'intensité. Cette circonstance amène forcément un peu d'indétermination dans la mesure précise de la température correspondant à une intensité déterminée. — J'ai noté généralement, comme température, la moyenne des deux indications du thermomètre avant et après l'observation. En outre, j'ai, dans presque tous les cas, fait deux déterminations d'intensité, au même point de l'échelle thermométrique, et j'ai pris la moyenne des deux résultats comme exprimant l'intensité au moment thermométrique moyen des deux observations.

39. Voici, pour donner une idée du genre de précision possible, le résultat brut des expériences pour deux barreaux.

TABLEAU XXI.

température	BARREAU A		température	BARREAU B	
	nombre des oscill.	durée totale		nombre des oscill.	durée totale
11°	50	104″	10°	50	121″
—	—	103″	—	—	120″
			—	—	120″
95°	50	114″			
—	—	115″	95°	40	106″
130°	50	139″ 1/2	170°	30	118″
—	—	140″	—	—	118″
170°	50	166″	232°	30	165″
—	—	165″	—	—	165″
200°	30	135″	250°	29	161″
—	—	136″	—	20	111″
230°	30	145″	255°	30	166″
—	—	166″	—	20	110″
			—	30	165″
250°	30	150″			
—	—	150″ 1/2			

40. Les divers barreaux ne possédaient point tous une même intensité primitive. Le tableau suivant montre le résultat immédiat des expériences et rend déjà très-sensible la diminution notable produite jusqu'à 250°.

TABLEAU XXII.

température	INTENSITÉ					
	A	B	C	D	C′	A′
10°	5,86	7,06	4,85	6,45	8,00	12,46
95 - 100°	4,90	5,35	3,79	4,66	6,67	8,30
130°	3,04	—	—	—	—	6,67
170°	1,95	2,34	1,17	2,02	2,64	—
290°	0,61	1,28	—	—	2,16	2,13
230 - 35°	0,44	0,82	0,12	0,23	1,43	1,07
240°	—	0,79	—	—	—	—
250°	0,34	—	0,10	0,22	1,04	0,93
260°	—	—	—	—	0,90	—

On voit que tous exerçaient une action plus énergique que celle de la terre; le plus faible, C, était presque cinq fois plus intense. Afin de les rendre comparables, on a calculé les valeurs du tableau XXII en représentant par 1000 l'intensité de chaque barreau à la température initiale 10°; c'est ainsi qu'a été obtenu le tableau XXIII.

TABLEAU XXIII.

température	INTENSITÉ					
	A	B	C	D	C′	A′
10°	1000	1000	1000	1000	1000	1000
95 - 100°	836	758	781	722	833	665
130°	519	—	—	313	—	535
170°	333	331	241	202	330	—
200°	104	181	—	—	270	171
230 - 35°	75	116	25	36	180	86
240°	—	112	—	—	—	—
250°	58	—	21	34	130	75
260°	—	—	—	—	112	—

On aperçoit ici, d'une manière très-marquée, que les divers barreaux ne subissent pas également l'influence de l'élévation de température. On aperçoit, en outre, qu'à 250° l'intensité magnétique est considérablement réduite. Celui qui en conserve le plus *a perdu les* 0,87 *de son intensité primitive* et celui qui en conserve le moins *a perdu les* 0,98 : il est presque entièrement désaimanté.

41. Les variations différentes que présentent les divers barreaux se rattachent, comme on va le voir, à leur trempe plus ou moins dure. Le barreau A a été trempé au rouge vif, B au rouge cerise vif, C au rouge sombre, D au rouge noir, C′ au rouge très-vif, A′ au rouge noir. — Il suffit de jeter les yeux sur le tableau XXIII pour remarquer que ceux qui ont été trempés au rouge vif ou cerise perdent moins par l'élévation de température, que ceux qui l'ont été au rouge sombre et noir. Pour rendre cette différence évidente, il suffit d'établir deux groupes : le premier formé de A, B, C′ trempés dur, et le second de C, D, A′ trempés moins dur. En prenant les résultats moyens on constitue le tableau suivant :

TABLEAU XXIV.

température	A, B, C′	C, D, A′
10°	1000	1000
95 - 100°	809	723
130°	519	424
170°	331	221
200°	185	171
230 - 35°	123	49
240°	—	—
250°	94	44
260°	—	—

On voit d'une manière évidente, et dans toute la série des températures, que les barreaux les plus fortement trempés conservent le mieux leur magnétisme. Afin de m'assurer que cette différence tient bien à la trempe et non à quelque propriété particulière de l'acier de chaque cylindre, j'ai soumis à deux essais *un même cylindre*. — Le barreau C, après avoir subi un premier essai, fut chauffé au rouge vif puis trempé : c'est C′; A, qui avait été examiné après une première trempe dure fut chauffé puis trempé au noir : c'est A′. — Afin d'éliminer l'influence que pourrait avoir la qualité, en quelque sorte, métallique de chaque barreau, il suffit donc d'examiner les moyennes de deux groupes : A et C′ puis C et A′. On trouve ainsi :

TABLEAU XXV.

température	A C′	C A′
10°	1000	1000
95 - 100°	834	723
130°	—	—
170°	332	241
200°	187	171
230 - 35°	127	55
250°	94	50

L'ensemble de ces résultats et surtout le tableau XXV permettent donc de tirer cette conclusion: *les barreaux d'acier fortement trempés perdent une proportion moins forte de leur magnétisme, lorsqu'on les porte de 10 à 250°, que ceux qui ont subi une trempe plus faible.*

42. Il y aurait maintenant à rechercher si les intensités correspondant aux diverses températures, sont soumises à quelque loi simple de variation. — Les divers barreaux pris isolément, pas plus que les moyennes, ne vérifient la proportionnalité de la diminution avec la température. J'ai essayé de représenter quelques-unes des observations par la formule déjà examinée :

$$I = a - b\,t - c\,t^2$$

Mais elle ne convient décidément pas pour les chiffres des tableaux précédents. — Si l'on cherche le coefficient de variation pour 1°, on trouve des valeurs différentes suivant les divers points de l'échelle thermométrique et suivant les barreaux.

Le premier groupe des barreaux trempés dur (A, B, C′) donne, comme coefficient moyen: 0,0021 entre 10 et 100°; 0,009 entre 100 et 130°; 0,0044 entre 130 et 170°; 0,0048 entre 170 et 200°; 0,0019 entre 200 et 230°. Le second groupe des barreaux trempés plus doux (C, D, A′) donne 0,003 de 10 à 100°; 0,0099 de 100 à 130°; 0,005 de 130 à 170°; 0,0017 de 170 à 200; 0,0035 de 200 à 230°. — Les coefficients de perte sont plus forts pour ces derniers que pour les premiers; ce n'est qu'une nouvelle forme de la loi indiquée plus haut.

43. Ces coefficients sont généralement plus faibles que ceux qui se trouvent dans le tableau VIII et qui se rapportent aux premiers aimants examinés. Cette différence peut provenir du degré de trempe, de la rapidité de l'échauffement, de la dimension des barreaux. — Les premiers barreaux avaient été trempés au même degré que ceux du groupe (A, B, C′); le coefficient moyen de variation des premiers entre 10 et 100° avait été : 0,00469; celui des seconds est: 0,0021.

— La différence des dimensions peut avoir de l'influence; car suivant les recherches de Riess et Moser [1], les barreaux plus épais perdent une plus forte proportion que ceux qui le sont moins. — L'intervalle pendant lequel la variation de température se produisait est enfin peut-être à considérer. MM. Riess et Moser la considèrent *absolument* comme indifférente et des recherches décrites précédemment dans ce Mémoire, semblent assez appuyer leurs conclusions. (V) D'une autre part, M. Holmgren [2] soutient une opinion qui paraîtrait appuyée par les chiffres ci-dessus; car la durée du réchauffement dans l'huile a toujours été notablement moindre que dans les premières expériences où l'on chauffait à l'aide d'un courant de vapeur.

44. Les divers barreaux, examinés séparément, ou les deux groupes examinés dans leur variation moyenne montrent tous que la variation est plus forte entre 100 et 200° qu'entre 0 et 100° ou au-dessus de 200°. — Au-dessus de 200°, la diminution du magnétisme paraît se faire avec plus de lenteur et quoique à 250° les barreaux trempés dur ont perdu 0,90 de leur intensité primitive, les autres 0,95, *il n'est guère possible de prévoir à quelle température la chaleur enlève complétement le magnétisme d'un barreau aimanté.* En voyant la diminution rapide qui se fait à partir de 100° et la forme des courbes [3] qui représentent les expériences, on serait disposé à penser que 300° au plus suffisent pour produire la désaimantation. Cette conclusion peut paraître cependant moins certaine quand on remarque la diminution du coefficient de perte à partir de 200°.

45. En laissant refroidir les barreaux amenés à ces hautes températures, ils recouvrent une partie de leur magnétisme. Voici quelles ont été les intensités observées lorsque les aimants précédents ont été ramenés à 10° :

TABLEAU XXVI.

tempér.			
10°	A . . 182	C′ . . . 260	A, B, C′ . . 216
	B . . 185	A′ . . . 390	C, D, A′ . . 371
	C . . 354	A, C′ . . 221	C, A′ . . . 372
	D . . 368		

On voit ainsi ce résultat évident et remarquable que *les barreaux trempés dur,* ceux qui ont le moins fortement subi l'influence de l'é-

[1] Poggendorf's Annalen, 1829, page 411.
[2] Ouvrage cité.
[3] J'ai construit ces courbes pour les deux groupes de barreaux.

lévation de température, *sont aussi ceux qui recouvrent le moins par le refroidissement*. Les barreaux trempés dur (A, B, C′ et A, C′) ont subi une perte en quelque sorte *stable, définitive;* tandis que les barreaux trempés seulement au noir sont, *après le refroidissement*, plus magnétiques que les premiers. Ainsi, de deux aimants, l'un à trempe dure et l'autre à trempe faible, le premier se conservera plus intense que le second par l'élévation de température; la différence pourra être très-prononcée au moment du maximum de chaleur, puis, par le refroidissement, le barreau trempé faible recouvrera non-seulement assez de magnétisme pour égaler l'autre, mais lorsque tous deux seront revenus à leur point de départ, il aura, en définitive, une intensité plus forte. — Le tableau XXVI montre que les barreaux trempés dur ont recouvré, en moyenne, en passant de 250 à 10°, 0,122 de leur intensité primitive; ceux à trempe plus faible, 0,327. Dans les premiers, il y a eu 0,784 définitivement perdus, dans les seconds, seulement 0,629.

46. En chauffant une seconde fois les barreaux ci-dessus, ils perdent une nouvelle portion de leur intensité magnétique et se trouvent plus affaiblis encore qu'après la première opération. Le tableau XXVII montre les résultats calculés et réduits, en prenant pour base l'intensité primitive représentée par 1000, pour A, B et D.

TABLEAU XXVII.

température	A	B	D
10°	182	185	368
170°	—	136	149
180°	—	—	145
210°	36	—	—
230°	—	—	—
235°	—	62	17
250°	31	—	17

Le barreau A, qui avait perdu 0,942 à un premier réchauffement, ne perd plus que 0,151 à un second. Son intensité se trouve alors réduite à 0,031 de ce qu'elle était primitivement. Le barreau B, qui avait perdu 0,888 une première fois, ne perd plus que 0,123 dans une seconde opération. Tous présentent les mêmes résultats. — Le refroidissement, après une seconde élévation de température, amène les barreaux trempés doux à une intensité qui est peu différente de celle qu'on a obtenue après le premier refroidissement. Un premier réchauffement avait définitivement enlevé aux barreaux C et D une intensité de 0,646 et 0,632; un second réchauffement n'enleva défi-

nitivement que 0,047 et 0,040, c'est-à-dire 16 fois moins. Après le refroidissement succédant à la première élévation de température, il restait à D, 368; après le second refroidissement, il lui reste 330.

Les barreaux trempés dur présentent tous des pertes définitives plus considérables. — Ainsi, *par des réchauffements répétés et successifs, on affaiblira beaucoup plus promptement un aimant fortement trempé qu'un autre trempé plus faible.*

IX. — Aimantation des barreaux d'acier pendant leur refroidissement.

47. Il n'est malheureusement guère possible de suivre les variations de l'intensité magnétique des aimants pendant la série des températures qui s'étend depuis 300° jusqu'au rouge. Lorsqu'un barreau est arrivé à la température du rouge, il ne manifeste pas de magnétisme, et tous les auteurs sont d'accord pour dire que cette chaleur considérable détruit complétement les propriétés attractives des aimants. Lorsqu'on laisse refroidir les barreaux à partir de ce point-là, ils peuvent s'aimanter par le simple refroidissement et acquérir une polarité, faible sans doute, mais cependant appréciable, si toutefois le barreau est convenablement orienté pendant son abaissement de température. — Le magnétisme qui apparaît par le refroidissement, commence à se manifester lorsque le barreau *ne paraît plus lumineux à la clarté ordinaire du jour*, suivant Gilbert. Du Fay remarqua que c'est la position du barreau pendant le refroidissement qui influe sur les propriétés nouvelles qu'il acquiert. Plus tard, Barlow et Bonnycastle se sont occupés de l'influence des hautes températures sur les aimants et, après avoir confirmé les indications des auteurs précédents, ils annoncèrent que, pendant le refroidissement, il y a une certaine température où les barreaux présentent une polarité inverse de celle qui s'observe après le refroidissement complet. C'est dans le parcours des températures désignées par *bright red and red heat* que se produit cet étrange changement. Seebeck, peu de temps après les recherches de Barlow et Bonnycastle, a répété quelques-unes de leurs expériences sans confirmer toujours leurs résultats, et il a, en outre, recherché comment les pôles se distribuent dans le barreau lorsqu'ils y apparaissent par un refroidissement partiel ou total de la masse.

Dans toutes ces recherches, on n'a pas *mesuré* l'intensité magnétique qui se produit par le refroidissement, ni étudié la différence qui peut provenir d'un refroidissement lent ou rapide, et enfin l'influence que peut avoir, sur le résultat final, le fait que les barreaux que l'on examine étaient ou non aimantés avant qu'on les portât au rouge.

48. J'ai fait un certain nombre d'expériences relatives à l'action de très-hautes températures sur les barreaux, et à l'aimantation qui

se produit pendant le refroidissement. Les résultats, sans être d'une extrême précision, permettent cependant de tirer des conclusions intéressantes.

49. Les barreaux examinés étaient des cylindres plus petits que ceux dont il a été question jusqu'à présent. Leur longueur était de 160 millim., leur diamètre de 11 millim. et leur poids, en moyenne, de 130 grammes. Il était ainsi possible de les chauffer dans toute leur masse à une même température. Leur intensité magnétique a toujours été déterminée par la méthode précédemment décrite; mais ils ont été examinés au pendule magnétique seulement après leur refroidissement, c'est-à-dire après la variation de température. Pour étudier leur action sur le pendule, on les plaçait sur une sorte de chevalet qui pouvait en être plus ou moins rapproché. Une mince tige de fer, convenablement implantée sur la base même du chevalet, permettait de placer un même barreau dans une position toujours parfaitement identique, en le laissant glisser autant que le comportait l'écartement des bras du chevalet, puis en le poussant jusqu'à ce qu'il vînt appuyer, par une de ses extrémités, contre la pointe de fer. Des précautions étaient prises pour qu'il se trouvât ainsi parallèle au pendule magnétique, horizontal et ayant son centre situé sur le prolongement du fil de suspension, Le petit théodolite, placé à 6 mètres de distance et pourvu d'un réticule, permettait de s'assurer de la position donnée au barreau et de constater, par conséquent, si cette position était bien toujours la même. J'ai reconnu par de nombreux essais préliminaires, qu'en enlevant le barreau puis en le replaçant, il revenait à une position assez exactement la même pour que son action sur le pendule magnétique ne présentât aucun changement appréciable.

Le pendule magnétique était toujours un petit barreau cylindrique de 23 grammes. Il avait été, suivant la méthode que j'ai discutée (§ 33), aimanté à 60°, puis refroidi et réchauffé un grand nombre de fois afin de le rendre aussi insensible que possible aux variations, d'ailleurs faibles, de la température ambiante. — Sous l'influence de la terre seule, son oscillation, déduite comme moyenne d'un grand nombre d'expériences, était 4″,57.

50. Les barreaux 1, 2, 3, 4, 5, 6, ont été trempés au rouge cerise, puis aimantés à l'aide d'un gros électro-aimant et de frictions pratiquées suivant le procédé de la touche séparée. Trois d'entre eux (1, 2, 3,) ont été recuits jusque dans le voisinage du rouge sombre avant l'aimantation. — On a déterminé leur intensité magnétique en les plaçant successivement sous le pendule. Les observations ont été calculées à l'aide de la formule connue (§ 1) et on a trouvé :

TABLEAU XXVIII.

barreaux	intensité
1	6,18
2	6,56
3	6,18
4	4,36
5	4,90
6	5,76

On peut remarquer ici, ce que j'ai du reste souvent eu l'occasion d'observer, que les barreaux trempés les plus dur s'aimantent moins que cenx qui ont été trempés plus doux ou recuits convenablement. Coulomb avait déjà indiqué ce fait; mais certains auteurs annoncent l'inverse.

Il importe maintenant, pour les expériences qui vont suivre, de distinguer les deux extrémités d'un même barreau. Comme chacun d'eux était marqué par des traits plus ou moins nombreux à l'une de ses extrémités, je désignerai cette extrémité-là par T et l'autre par U. J'appellerai pôle nord du barreau celui qui attirerait l'extrémité nord d'une aiguille de boussole, celui qui se dirigerait vers le sud si le barreau était librement suspendu. Voici quel était l'état des barreaux, à ce point de vue, après leur aimantation : 1 et 3 avaient leur pôle nord en U; 2, 4, 5 et 6 l'avaient en T.

51. Quatre barreaux furent chauffés dans des charbons incandescents jusqu'au rouge cerise, puis refroidis dans le plan du méridien magnétique, l'une des extrémités tournée vers le nord. Deux (1 et 4) furent refroidis lentement, deux autres (3 et 6) furent refroidis brusquement par l'immersion dans l'eau froide. On les examina ensuite au pendule magnétique afin de constater, tout à la fois, l'existence d'une polarité et l'intensité du magnétisme. Chacun fut l'objet de deux déterminations; la première lorsque T, par exemple, est dirigé vérs le nord et U vers le sud, la seconde après retournement, lorsque U est vers le nord et T vers le sud.

52. Il est clair que si un barreau a une polarité qui ne soit nullement affectée par le fait du retournement sous le pendule, si son pôle nord est en T, par exemple, il provoquera d'abord, dans le pendule, une oscillation dont la durée sera $4'',57-b$, b dépendant de son intensité ; puis, par le retournement, il provoquera une oscillation de $4'',57+b'$. Or, il est facile de voir que, si l'intensité du barreau est faible, b sera sensiblement égal à b'. — En effet, soit 1 l'intensité de la terre, a celle d'un barreau. Il est clair que les forces auxquelles sera soumis le pendule dans une première position du barreau, puis lors du retournement, seront $1+a$ et $1-a$, Si, d'ailleurs, T est la durée d'une oscillation sous l'influence de la terre

seule, t et t' celles d'une oscillation sous l'influence de la terre et du barreau dans sa première, puis dans sa seconde position, on aura évidemment, en vertu des formules connues du pendule

$$t^2 = \frac{T^2}{1+a} \qquad t'^2 = \frac{T^2}{1-a}$$

Appelons b et b' les différences entre les valeurs de t, t' et T, on aura :

$$(T-b)^2 = \frac{T^2}{1+a'}$$

$$(T+b')^2 = \frac{T^2}{1-a'}$$

d'où l'on tire facilement :

$$b = T\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+a}}\right)$$

$$b' = T\left(\frac{1}{\sqrt{1-a}} - 1\right)$$

Il est clair que ces deux valeurs diffèrent peu l'une de l'autre, lorsque a est très-petit. Si, par exemple, l'on calcule b et b' pour le cas d'un barreau dont l'intensité est 0,10, alors que $T = 4'',57$, on trouve :

$$b = 0'',21 \qquad b' = 0'',25.$$

53. Le tableau suivant contient les résultats obtenus.

TABLEAU XXIX.

barreaux	U tourné vers le nord		T tourné vers le nord	
	durée d'une oscill.	intensité	durée d'une oscill.	intensité
1	4″,45	0,05	4″,37	0,09
3	4″,51	0,03	4″,40	0,08
4	4″,36	0,09	4″,41	0,07
6	4″,37	0,09	4″,45	0,05

Les barreaux 1 et 3 avaient l'extrémité U dirigée vers le nord pendant leur refroidissement; pour les barreaux 4 et 6 c'était l'extrémité T. — On remarquera ici : 1° que la polarité n'est pas nettement prononcée, puisque, quelle que soit la position du barreau (retourné ou non), il produit toujours une oscillation du pendule plus rapide que celle qui résulte de la terre seule; 2° qu'il y a cependant polarité et que ce n'est pas la simple action d'un corps magnétique, puisque l'influence n'est pas la même dans les deux positions.

On remarquera, en outre, que les barreaux 1 et 3, qui ont été refroidis T tourné vers le sud, présentent en T un magnétisme nord plus développé que vers l'extrémité U; les barreaux 4 et 6, qui ont été refroidis U tourné vers le sud, présentent au contraire un magnétisme nord plus intense en U. — Si on compare l'état actuel des barreaux avec leur état avant le réchauffement, on verra que, par le refroidissement, les pôles sont, pour quelques-uns, intervertis. Le cylindre 1, par exemple, avait un magnétisme nord à l'extrémité U; après le refroidissement, son action sur le pendule est celui d'un barreau qui aurait du magnétisme nord à ses deux extrémités, mais davantage en T qu'en U. Il en est de même pour les autres. — Ainsi, le refroidissement à partir du rouge, sur des barreaux primitivement aimantés et orientés du sud au nord, n'a pas produit une polarité nette; il s'est bien produit un pôle nord à l'extrémité tournée vers le sud pendant l'abaissement de température: mais l'extrémité dirigée vers le nord, et qui était un pôle nord avant le réchauffement, conserve une faible portion de son magnétisme.

54. Les barreaux précédents ont été soumis à une seconde expérience semblable à la première. — Ils ont d'abord été chauffés au rouge, trempés perpendiculairement au méridien magnétique, puis aimantés de telle façon que leur extrémité T devint un pôle nord. On a déterminé leur intensité magnétique :

TABLEAU XXX.

barreaux	intensité
1	6,12
2	6,56
3	7,46
4	4,90
5	4,90
6	9,62

Tous ont été ensuite chauffés au rouge cerise vif puis, lorsque le refroidissement les amenait au rouge cerise sombre, on les trempait brusquement dans l'eau froide, parallèlement à l'aiguille d'inclinai-

son. Les cylindres 2, 3, 6 avaient leur extrémité U en bas pendant cette trempe; 1, 5 et 4 avaient l'extrémité U en haut. On les examina au pendule magnétique en plaçant d'abord T vers le nord, ensuite U. Voici le résultat des observations :

TABLEAU XXXI.

barreaux	U tourné vers le nord		T tourné vers le nord	
	durée d'une oscill.	intensité	durée d'une oscill.	intensité
1	5″,05		4″,05	0,25
2	4″,65		4″,30	0,18
3	4″,70		4″,21	0,17
4	4″,45	0,05	4″,42	0,07
5	4″,65		4″,30	0,12
6	4″,50	0,03	4″,37	0,09

On voit que les barreaux 1, 2, 3 et 5 ont une polarité bien marquée, T étant le pôle nord comme il l'était avant le réchauffement; 4 et 6 sont dans les mêmes conditions que ceux du tableau XXIX, et leur extrémité T, qui a la polarité la plus prononcée, est aussi celle qui était pôle nord avant l'élévation de température. La polarité s'est donc, en quelque sorte, conservée malgré le rouge vif, surtout dans 1 et 5, et quoique, pendant le refroidissement, T ait été situé en bas, c'est-à-dire dans les conditions favorables pour devenir un pôle sud; 4, qui aurait dû également posséder un pôle sud en T, présente au contraire plus de magnétisme nord à cette extrémité-là qu'en U.

Avant d'examiner toutes les conséquences qui résultent de ces premiers essais, il est bon de voir maintenant l'influence du refroidissement sur des barreaux pris à l'état naturel et portés au rouge.

55. Six nouveaux barreaux, en tout point semblables aux précédents et pris à une tige d'acier analogue, ont été marqués 7, 8, 9, 10, 11 et 12. On les chauffa au rouge cerise dans des charbons incandescents, puis on les refroidit en les plongeant brusquement dans l'eau, dans une direction parallèle à l'aiguille d'inclinaison. Pendant cette opération, T était en bas pour 7, 8, 10 et 11; il était en haut pour 9. Voici les résultats constatés au pendule [1] :

[1] Avant cette expérience, le fil de suspension s'était brisé. Le pendule, attaché de nouveau et examiné après cette chute, avait, sous l'influence de la terre seule, une oscillation de 4″,50.

TABLEAU XXXII.

barreaux	U tourné vers le nord		T tourné vers le nord	
	durée d'une oscill.	intensité	durée d'une oscill.	intensité
7	4″,21	0,14	4″,53	
8	3″,90	0,32	5″,11	
9	4″,60		4″,27	0,12
10	4″,38	0,06	4″,52	
11	4″,30	0,10	4″,60	

Tous ont une polarité bien prononcée et l'extrémité qui était tournée vers le sud pendant le refroidissement (ou en haut) a pris un pôle nord. On doit remarquer encore ici que les deux pôles semblent avoir une inégale intensité, c'est-à-dire que la durée de l'oscillation n'est pas supérieure à 4″,50 autant quelle devrait l'être lorsque le barreau agit après avoir été retourné.

Deux jours après ces expériences, les cylindres 7, 8 et 10 ont été examinés de nouveau. Leur polarité s'était maintenue, mais l'intensité magnétique s'était un peu affaiblie dans 7 et 8.

56. Les barreaux précédents, ainsi que 12, on été chauffés de nouveau au rouge, puis trempés dans l'eau froide parallèlement à l'aiguille d'inclinaison, mais dans une situation telle que l'extrémité qui était en bas, dans le dernier refroidissement, se trouvait maintenant en haut, et inversement. 7 fait exception, il a été trempé comme pour le tableau XXXII; 8 a dû être abandonné parce qu'il s'est fendu sur presque toute sa longueur pendant la trempe. 7, 9 et 12 ont donc été refroidis T en bas; 10 et 11, T en haut. Sous le pendule, les barreaux présentent les caractères suivants :

TABLEAU XXXIII.

barreaux	U tourné vers le nord		T tourné vers le nord	
	durée d'une oscill.	intensité	durée d'une oscill.	intensité
7	4″,35	0,08	4″,50	
9	4″,35	0,09	4″,61	
10	4″,50		4″,37	0,06
11	4″,62		4″,30	0,10
12	4″,32	0,09	4″,55	

On voit que la polarité est assez prononcée chez tous, et, si l'on compare ces résultats avec ceux du tableau XXXII, on remarque que *les pôles ont été intervertis* dans 9, 10 et 11.

Les mêmes expériences furent encore répétées avec 7, 9 et 12. On les chauffa au rouge, puis on les refroidit de telle sorte que T se trouvât en haut pendant l'immersion dans l'eau froide. Tous trois acquirent un pôle nord en T, U devint pôle sud, et il y eut ainsi une nouvelle interversion. — Une nouvelle opération les ramena à l'état de polarité du tableau XXXIII.

57. On voit donc que le refroidissement brusque des barreaux naturels portés au rouge est toujours accompagné d'une aimantation dans laquelle l'extrémité dirigée vers le sud devient un pôle nord. La polarité n'a jamais été douteuse dans les expériences du tableau XXXII et XXXIII ; elle est plus prononcée et plus nette que dans les tableaux XXX et XXXI. Cependant, si les barreaux provoquent une oscillation de $4'',50 - b$ dans une première position, cette durée ne devtent pas $4'',50 + b$ après le retournement : elle demeure toujours inférieure.

Il semble que, par le fait même de leur situation dans le méridien magnétique pendant qu'ils agissent sur le pendule, les barreaux subissent, malgré leur trempe, quelque influence de la terre tendant à modifier l'action de leurs pôles.

58. Les expériences décrites ci-dessus ont été répétées en laissant les barreaux se refroidir *lentement* à l'air, mais toujours dans une situation parallèle à l'aiguille d'inclinaison. — Les barreaux 7, 8, 9,

10, 11 et 12 furent chauffés au rouge cerise vif, puis placés parallèlement à l'aiguille d'inclinaison pendant toute la durée de leur refroidissement, les uns appuyés contre des plans convenablement inclinés, les autres maintenus en leur milieu à l'aide de pinces. Ils se sont refroidis dans une position telle que 7, 9 et 12 avaient leur extrémité T tournée vers le sud, tandis que 8, 10 et 11 avaient T tournée vers le nord. — Placés sous le pendule, ils donnent les résultats suivants :

TABLEAU XXXIV.

barreaux	U tourné vers le nord		T tourné vers le nord	
	durée d'une oscill.	intensité	durée d'une oscill.	intensité
7	4″,45		4″,32	0,09
8	4″,27	0,12	4″,50	
9	4″,50		4″,30	0,10
10	4″,30	0,10	4″,47	
11	4″,35	0,06	4″,51	
12	4″,45		4″,35	0,06

On voit que tous les barreaux, dont l'état magnétique, avant cette dernière opération, se trouve représenté dans le tableau XXXIII, ont leurs pôles maintenant intervertis : c'est-à-dire que le refroidissement lent a produit le même effet que le refroidissement brusque dans l'eau. Il est cependant à remarquer que la polarité est moins prononcée dans le tableau XXXIV. L'oscillation est même parfois un peu inférieure à 4″,50, alors que le barreau est dans une position telle que ses pôles devraient repousser ceux de l'aiguille qui sont les plus voisins. Il semble encore ici, que le pôle sud du barreau est moins énergique que le pôle nord.

Vingt-quatre heures après les expériences du tableau XXXIV, les barreaux 7, 8 et 9 ont été examinés de nouveau. Leur polarité n'avait pas changé de sens, l'intensité magnétique était un peu affaiblie.

59. Il restait enfin à examiner l'influence du refroidissement dans une direction perpendiculaire au méridien magnétique. — Les barreaux furent chauffés au rouge cerise, puis trempés horizontalement et perpendiculairement à la direction de l'aiguille de déclinaison. Dans

cette opération, les barreaux 7, 10 et 12 avaient leur extrémité T à l'ouest; 8, 9 et 11 avaient T à l'est. Voici les résultats :

TABLEAU XXXV.

barreaux	U tourné vers le nord		T tourné vers le nord	
	durée d'une oscill.	intensité	durée d'une oscill.	intensité
7	4″,45	0,025	4″,44	0,03
8	3″,46	0,02	5″,41	0,04
9	4″,45	0,025	4″,47	0,02
10	4″,45	0,025	4″,45	0,025
11	4″,42	0,04	4″,43	0,04
12	4″,50	0,00	4″,44	0,03

Ce tableau montre qu'il n'y a guère de polarité manifeste; les barreaux agissent à peu près de la même façon sur l'aiguille du pendule, quelle que soit leur position, ou, en d'autres termes, ils ont les caractères d'un corps magnétique mais non magnétisé. Les traces de polarité qui semblent exister dans les cylindres 8 et 12, peuvent provenir de ce qu'ils n'ont peut-être pas été plongés dans l'eau dans une position rigoureusement perpendiculaire au méridien magnétique.

60. Il résulte des expériences précédentes que le simple refroidissement est bien une cause d'aimantation pourvu que le barreau soit convenablement orienté; seulement le refroidissement brusque paraît plus efficace, sous ce rapport, que le refroidissement lent, et, en tout cas, l'intensité magnétique acquise est très-faible. Dans les barreaux trempés, elle est en moyenne 0,13. Les mêmes barreaux, aimantés par le procédé ordinaire des frictions pendant qu'ils étaient placés sur l'électro-aimant, avaient acquis une intensité moyenne de 6,59, c'est-à-dire environ 50 fois plus forte.

Si, maintenant, on compare les résultats donnés par les barreaux primitivement aimantés et ceux des barreaux qui ne l'étaient pas, on peut faire les remarques suivantes. — Les tableaux XXXII, XXXIII et XXXIV montrent des barreaux où la polarité est bien prononcée; ce sont ceux qui étaient à l'état naturel avant d'avoir été portés au rouge, et qui, par le refroidissement (rapide surtout) parallèlement à l'aiguille d'inclinaison, ont pris un pôle nord à leur extrémité sud et un pôle sud à leur extrémité nord. Les tableaux XXX et XXXI,

au contraire, montrent des cylindres où la polarité n'est point nette, et où même le pôle dirigé vers le sud pendant le refroidissement, n'est pas toujours un pôle nord ; ce sont ceux qui étaient aimantés avant leur réchauffement. Il semble donc que la température du rouge, même vif, n'a pas rendu les barreaux des tableaux XXX et XXXI en tout point semblables à ceux des tableaux XXXII, XXXIII et XXXIV, puisque, après le refroidissement, les propriétés des uns et des autres ne sont pas exactement les mêmes. L'état de polarité primitive des premiers influe sur leur état après le refroidissement, et il semble ainsi que la haute température du rouge n'a pas totalement détruit leur magnétisme. Les barreaux 1, 2, 3 et 5 du tableau XXXI ont conservé leurs pôles *malgré le réchauffement*, bien que, pendant le refroidissement, ils aient été orientés de manière à éprouver une interversion. Ainsi, à travers les hautes températures, le magnétisme de ces aimants s'est suffisamment conservé pour empêcher l'action ordinaire de la terre pendant le refroidissement, et même pour maintenir une polarité opposée à celle qui se serait produite sous cette influence. — Cependant le magnétisme d'un barreau doit être assez fort pour qu'il manifeste encore son existence à travers les hautes températures ; car les tableaux XXXIII et XXXIV montrent que pour les intensité faibles, un réchauffement suivi d'un refroidissement à orientation convenable, intervertit complétement les pôles.

Il est à remarquer que l'influence du refroidissement sur des barreaux d'acier est parfaitement semblable à celle d'un choc ou d'une friction. Mais, comme M. de la Rive le fait très-bien observer dans son *Traité d'Electricité,* la variation de température, ou le choc, n'est que *la cause apparente* de cette aimantation ; l'influence de l'orientation montre que c'est l'action du globe terrestre qui est essentielle. — L'action de la terre ne se manifeste, au moins d'une manière prononcée, qu'autant que la substance des barreaux se trouve dans un certain état convenable. Le choc, les frictions, les torsions, les variations de température semblent agir, à ce point de vue, de la même façon sur la matière métallique. L'état de refroidissement semble être le même que l'état mécanique produit par le choc, et il est intéressant de voir ce rapprochement entre les phénomènes mécaniques et la chaleur, à un moment où la théorie dynamique du calorsque préoccupe vivement les physiciens.

61. J'ai essayé de voir, au moins approximativement, quel rapport il y a entre l'action magnétisante du choc et celle du refroidissement. — Les barreaux 2, 4, 5 et 7 furent chauffés au rouge, puis refroidis dans une direction perpendiculaire au méridien magnétique afin d'éviter toute polarité. 2 et 7 furent refroidis lentement; 4 et 5 subirent une trempe dans l'eau froide. Ces quatre cylindres furent ensuite maintenus dans une position verticale; puis frappés avec un marteau sur leur base supérieure. Chacun reçut deux coups[1]. —

[1] Il n'est pas facile d'apprécier la valeur d'un choc comme force. Voici une

Examinés au pendule, ils donnèrent des résultats fort différents : 4 et 5 ne manifestèrent aucune trace de polarité, ils agirent, après le choc, comme des corps magnétiques, mais non aimantés ; 2 et 7, au contraire, étaient assez fortement polarisés, l'extrémité supérieure était devenue un pôle nord. Placés à la même distance du pendule magnétique que dans les expériences précédemment décrites, ils manifestèrent une intensité représentée par 0,25 et 0,26. Ainsi, deux chocs sur ces barreaux *non trempés* avaient produit une intensité presque double de celle qui résulte du refroidissement à partir du rouge.

52. Il est intéressant de remarquer que le refroidissement brusque, donnant à l'acier plus d'élasticité et de dureté, le trempant, en un mot, est accompagné d'une aimantation plus forte que lorsque le métal se refroidit en devenant moins dur et moins élastique. Si le refroidissement a lieu sans aimantation, par suite d'une orientation convenable, les cylindres trempés ne sont guère aptes à acquérir du magnétisme par le choc, tandis que ceux qui ne le sont pas se polarisent facilement. On sait que le choc et les torsions modifient la dureté et l'élasticité de l'acier ; ils produisent à la longue un effet semblable à la trempe. Ainsi, *l'acier, dans une orientation convenable, s'aimante surtout lorsque sa substance éprouve la modification moléculaire qui correspond à une grande élasticité, que cette modification soit produite par des chocs ou par un abaissement de température.* L'action mécanique ou calorifique provoque un certain état des molécules qui se manifeste entre autres par l'élasticité du métal : c'est *pendant* que le corps arrive à cet état physique que le magnétisme apparaît.

mesure plus ou moins bonne des chocs dont il est ici question. Un coup de marteau semblable à ceux que les barreaux ont reçus, fut donné sur un ressort dynamomètre qui en éprouva une certaine compression. L'expérience montra ensuite que la même compression pouvait être produite par un poids de 25 kilogrammes.

Fig. I.

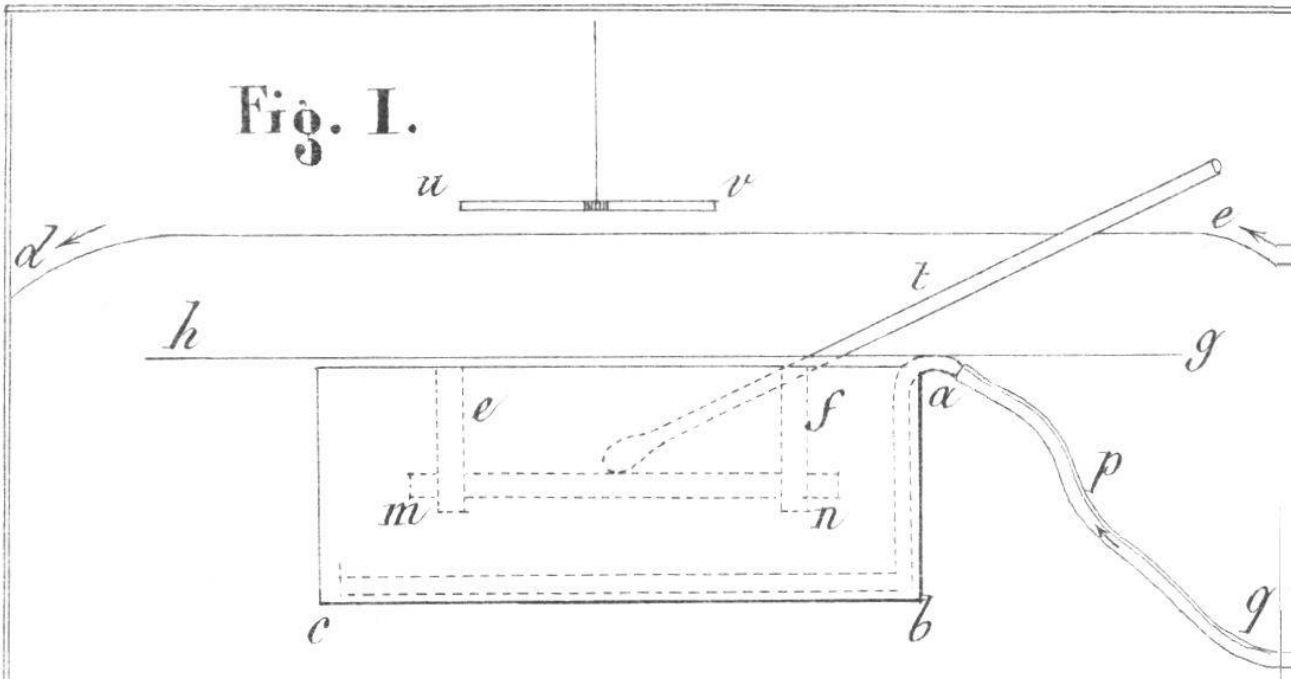

Fig. II.

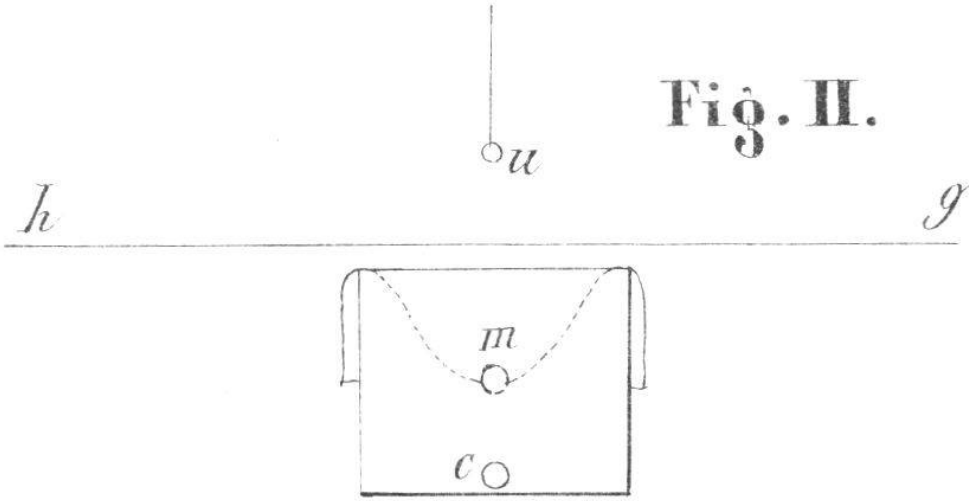

Fig. IV.

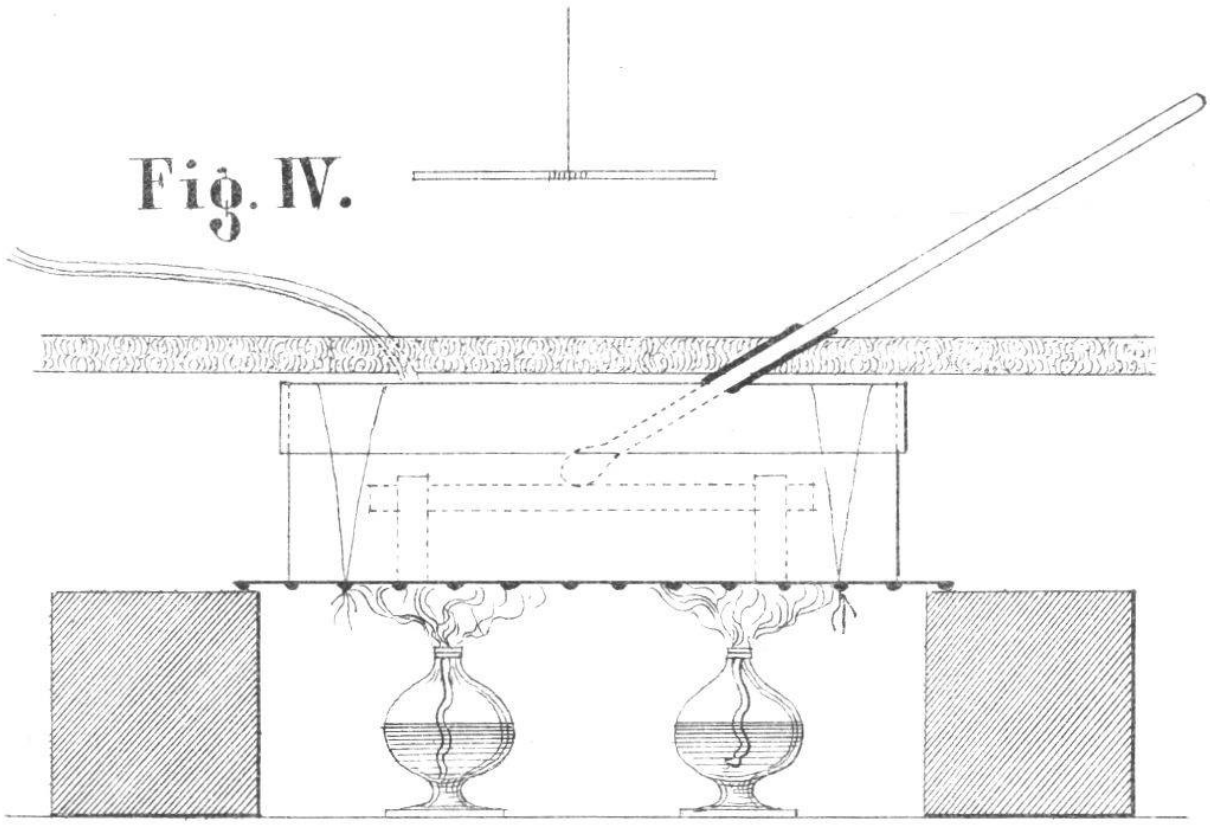
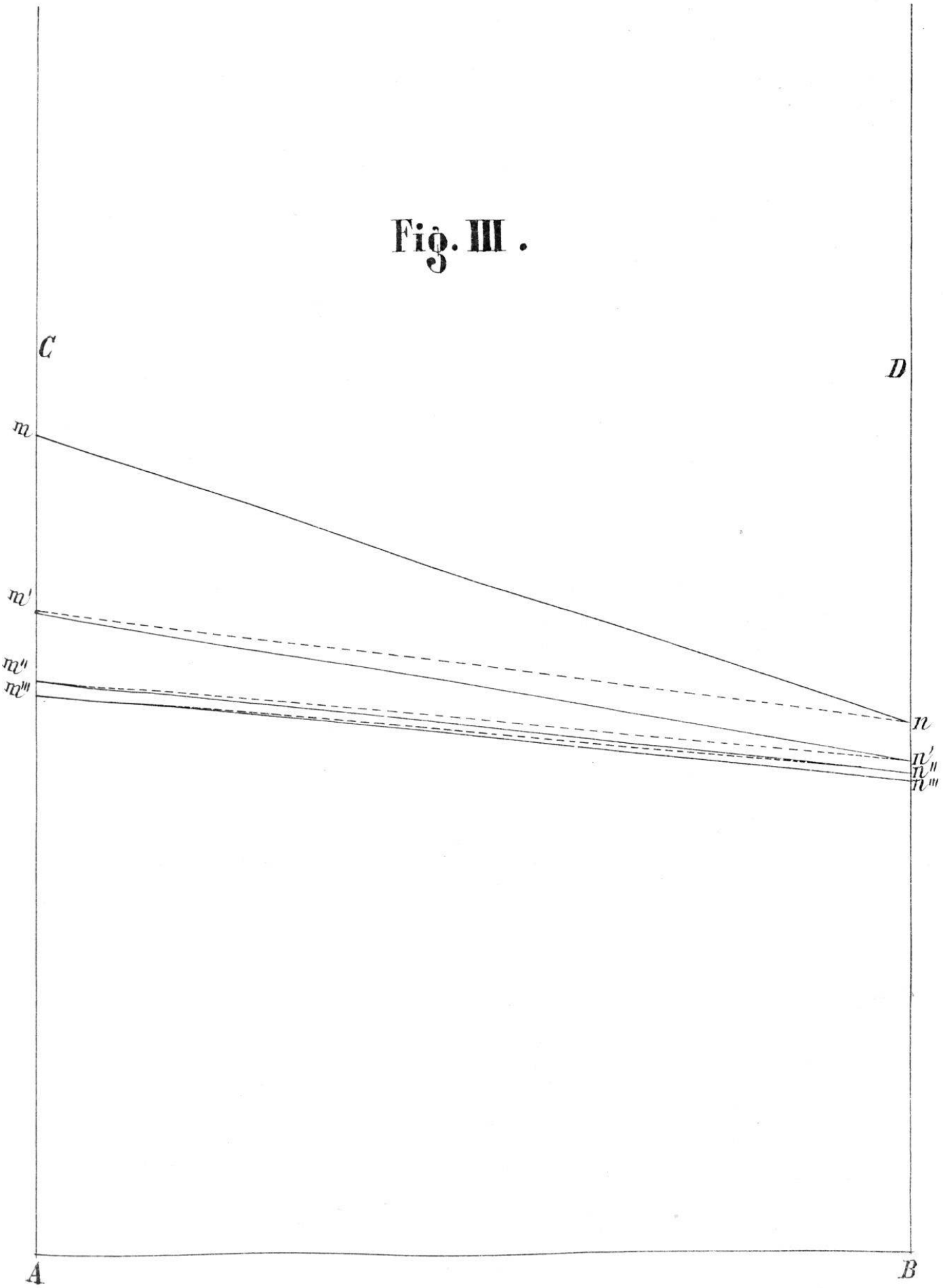
Fig. III.