



HAL
open science

Influence des très hautes et des très basses températures sur la résistance électrique des métaux

Guido Niccolai

► **To cite this version:**

Guido Niccolai. Influence des très hautes et des très basses températures sur la résistance électrique des métaux. *J. Phys. Theor. Appl.*, 1908, 7 (1), pp.937-948. 10.1051/jphystap:019080070093701 . jpa-00241428

HAL Id: jpa-00241428

<https://hal.science/jpa-00241428>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INFLUENCE DES TRÈS HAUTES ET DES TRÈS BASSES TEMPÉRATURES
SUR LA RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE DES MÉTAUX ⁽¹⁾ ;

Par M. GUIDO NICCOLAI.

1. Arndtsen ⁽²⁾, Matthiessen et Bose ⁽³⁾ furent les premiers qui étudièrent l'influence de la température sur la conductibilité électrique des métaux. Matthiessen et Bose étendirent leurs recherches à un certain nombre de métaux purs à des températures comprises entre 0° et 100° ; ils calculèrent aussi les coefficients α de température entre ces mêmes limites. Il résulte de leurs expériences que la résistance augmente encore avec la température. Ces auteurs trouvèrent en outre que, comme l'avait déjà observé Arndtsen ⁽⁴⁾, les valeurs de α pour tous les métaux purs (excepté pour le fer qui a une valeur beaucoup plus élevée) sont comprises entre 0,00403 et 0,00327.

⁽¹⁾ Travaux de l'Institut de Physique de Pise (direct. : Battelli).

⁽²⁾ *Pogg. Ann.*, 1858, CIV, p. 650.

⁽³⁾ *Pogg. Ann.*, 1862, CXV, p. 355.

⁽⁴⁾ *Pogg. Ann.*, 1858, CIV, p. 1.

¹ *J. de Phys.*, 4^e série, t. VII. (Décembre 1908.)

Clausius⁽¹⁾ observa que la moyenne de toutes ces valeurs (excepté pour le fer) était à peu près égale à 0,00366, c'est-à-dire au nombre même qui exprime le coefficient de dilatation des gaz. Il crut pouvoir conclure que la résistance électrique des métaux purs était proportionnelle à la température absolue.

Clausius remarqua cependant que les données de Matthiessen et de Bose n'étaient pas suffisantes pour en tirer une telle conséquence. En effet, le nombre des métaux étudiés était trop petit, l'intervalle de température utilisé trop restreint, et la concordance dans les résultats trop imparfaite.

2. Plus tard divers expérimentateurs ont repris cette même question en augmentant non seulement le nombre des métaux étudiés, mais en améliorant les conditions expérimentales et en utilisant des intervalles de température plus considérables.

Benoit⁽²⁾ étudie la variation de la résistance électrique d'un certain nombre de métaux depuis 0° jusqu'à des températures très élevées. Il trouve que la résistance électrique croît quelquefois plus, quelquefois moins que ne le voudrait l'hypothèse émise par Clausius. Benoit a de plus calculé les valeurs des coefficients α et β de la formule

$$R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2),$$

avec laquelle il a représenté la variation de la résistance avec la température.

Les valeurs absolues trouvées par cet auteur ne peuvent pas être comparées avec celles d'expérimentateurs plus récents, comme Dewar et Fleming⁽³⁾, Jager et Diessellhorst⁽⁴⁾, à cause de la pureté différente des produits qu'il employa.

D'autres recherches à de hautes températures furent faites par H. Le Chatelier⁽⁵⁾ sur le cuivre, le platine et l'argent; par le professeur Batelli⁽⁶⁾ sur le nickel; par Morrès⁽⁷⁾ sur le fer et par Philip. Harrison⁽⁸⁾ sur le nickel, le fer et le cuivre. Ces expérimentateurs

(1) *Pogg. Ann.*, 1858, CIV, p. 650.

(2) *C. R.*, CXXVI, 1873, p. 342.

(3) *J. de Phys.*, 1894, p. 378; — et *Phil. Mag.*, 1894 (36), p. 271.

(4) *Abh. d. Physikalisch-Technischen Reichsanstalt*, 3, 269; 1900.

(5) *C. R.*, 1890, CXI, p. 454.

(6) *Nuovo Cimento*, 1893, III (34), p. 125.

(7) *Phil. Mag.*, 1897 (44), p. 213.

(8) *Phil. Mag.*, 1902, III, p. 177.

trouvèrent tous que la résistance croît considérablement avec la température.

3. Cailletet et Bouty ⁽¹⁾ furent les premiers physiciens qui firent des recherches du même genre sous de basses températures ; ils mesurèrent la résistance électrique spécifique du mercure, de l'argent, de l'antimoine, de l'étain et du cuivre à -100° environ. Wroblewski ⁽²⁾, presque au même moment, mesura la résistance du cuivre électrolytique à la température de l'azote et de l'oxygène liquides.

Dewar et Fleming ⁽³⁾ firent ensuite une série d'expériences sur un certain nombre de métaux purs, d'alliages et de corps non métalliques, à six ou sept températures comprises entre $+100^{\circ}$ et -167° . Ils obtinrent cette basse température en faisant évaporer de l'oxygène liquide sous des pressions réduites de 25 ou 30 millimètres de mercure.

4. Les résultats des différents expérimentateurs sont très variés, soit parce que les conditions d'expérience ne sont pas les mêmes, soit parce que les études sont faites avec des échantillons différents. Les courbes représentant la résistance électrique spécifique des métaux, dressés à de hautes et à de basses températures par des expérimentateurs divers ne peuvent concorder.

Il manquait donc une étude complète du phénomène, aucun expérimentateur n'ayant fait des recherches allant de températures très basses à des températures très hautes en faisant des déterminations à des intervalles assez rapprochés, pour pouvoir suivre la véritable variation de la résistance.

Le présent mémoire a pour but l'étude de la variation de la résistance électrique spécifique de quelques métaux purs en rapport avec la variation continue de la température.

DESCRIPTION GÉNÉRALE DE LA MÉTHODE.

5. Pour mesurer la résistance électrique des métaux purs et des alliages que j'ai employés, je me suis servi d'un pont de Wheatstone, avec lequel je pouvais atteindre directement et avec une grande précision le millième d'ohm.

(1) *J. de Phys.*, 2^e série, t. IV, p. 419; 1885.

(2) *C. R.*, 1885.

(3) *Loc. cit.*

Les échantillons étudiés étirés en fils d'un diamètre de $1/2$ millimètre environ étaient enroulés sur un support isolant qui portait aussi l'appareil destiné à produire l'échauffement.

La *fig. 1* montre schématiquement comment est constitué ce support. AA' est un tube de verre du diamètre de 5 millimètres, évasé inférieurement de manière à soutenir le petit disque métallique D sur lequel est appuyé un autre disque D₁ de gros carton d'amiante et d'un diamètre un peu plus élevé que le premier.

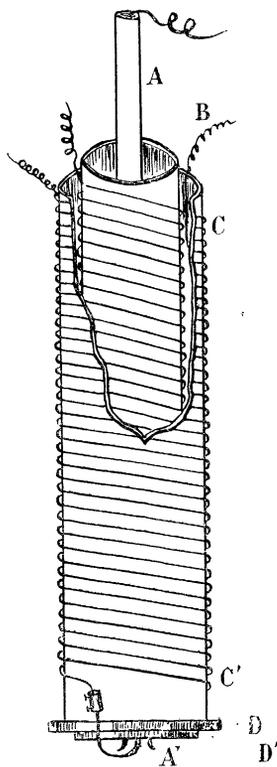


FIG. 1.

Dans le même axe que le tube AA' et appuyé sur le disque d'amiante est un second tube de verre B de 2 centimètres et demi de diamètre. Sur ce tube est enroulée une spirale serrée de fil de fer mince dont les spires sont isolées entre elles au moyen d'un fil d'amiante.

Cette spirale, parcourue par un courant électrique, dont l'intensité est réglée avec un rhéostat, constitue l'appareil échauffant.

Finalement, le fil examiné est enroulé soigneusement en spirale sur le tube de verre CC' long de 17 centimètres et d'un diamètre de $3^{\text{cm}},5$, recouvert d'un épais carton d'amiante de bonne qualité.

Un fil d'amiante interposé entre les spires les empêche d'entrer en contact à quelque point que ce soit.

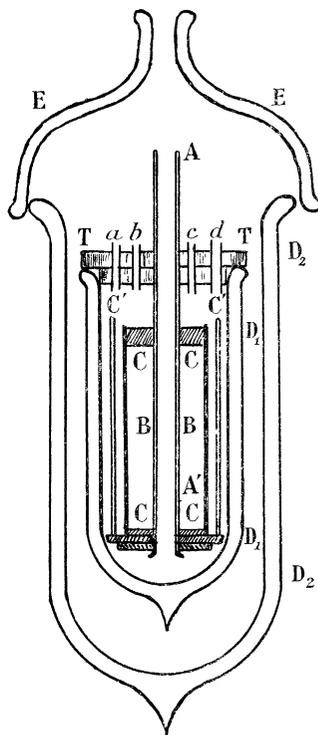


FIG. 2.

Le tube de verre AA' (comme on le voit dans la section de la *fig. 2*) passe à travers un bouchon de liège TT qui sert à fermer l'embouchure d'un vase de Dewar D_1D_1 . A l'intérieur de ce vase est plongé le support avec le fil examiné.

Le récipient de Dewar, construit en verre d'Iéna, a une forme cylindrique, une profondeur de 22 centimètres et un diamètre de 5 centimètres.

Le bouchon TT, reproduit dans la *fig. 2*, était revêtu d'un assez épais carton d'amiante aussi bien dans sa face inférieure que latéralement, où il venait en contact avec les parois de verre du récipient.

Le bouchon de liège était traversé par le tube de verre AA' et, en outre, par trois autres petits tubes de verre *a*, *b*, *c*, et par un petit tube de quartz. Le tube *a* servait à isoler un des gros conducteurs de cuivre qui aboutissait à une des extrémités du circuit du fil examiné, tandis que l'autre conducteur passait à l'intérieur du tube de verre AA'.

Les deux petits tubes *b* et *c* étaient destinés à isoler les deux conducteurs de la spirale d'échauffement. Le petit tube de quartz *d* servait à isoler les deux couples thermo-électriques dont je me suis servi pour mesurer la température à laquelle je faisais mes déterminations.

Le tout était plongé dans un second vase de Dewar D₂D₂, ordinairement en verre, également de forme cylindrique, aux parois argentées, ayant une profondeur de 35 centimètres et un diamètre de 10 centimètres; l'embouchure de ce second vase de Dewar était fermée par un couvercle de verre EE à doubles parois et ayant au sommet une ouverture (*fig. 2*), à travers laquelle je pouvais faire passer tous les fils nécessaires.

De cette manière j'ai parfaitement pu atteindre mon but, qui était de maintenir pendant assez longtemps toute la masse du fil bien isolée électriquement et à une même température.

En effet, avec un peu d'habitude je suis arrivé à régler l'intensité du courant, qui devait circuler dans le fil de l'appareil d'échauffement, de manière à avoir non seulement une variation de température très lente, mais encore une distribution uniforme dans tout le récipient de Dewar.

Dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire lorsque j'avais la plus grande différence de température entre l'intérieur du vase de Dewar et l'air ambiant, la différence entre la partie la plus élevée et la partie la plus basse du récipient ne dépassait jamais 1°.

J'ai, de plus, veillé à ce qu'il ne se produisît pas de courants thermo-électriques entre l'échantillon étudié et les deux conducteurs qui servaient à le réunir aux bornes du pont de Wheatstone. Car ces courants auraient troublé mes déterminations.

J'ai déterminé la longueur des échantillons étudiés lorsque les fils eux-mêmes étaient tendus sous un effort constant de 1 kilogramme. J'en ai mesuré directement le diamètre sur plusieurs points au moyen

d'une vis de Palmer, pour m'assurer que les fils étaient bien uniformes dans toute leur longueur. J'ai aussi trouvé que le diamètre correspondait au poids spécifique et à la longueur.

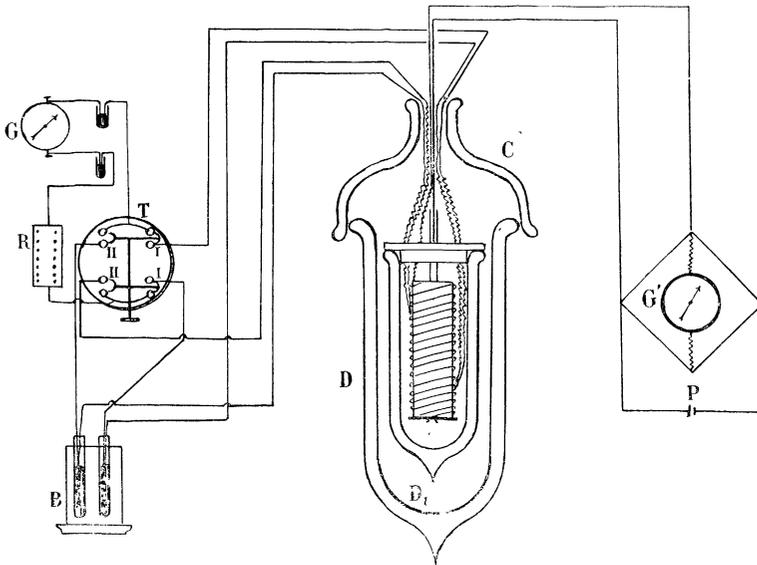


FIG. 3.

La *fig. 3* donne une représentation schématique de la disposition complète pour les mesures.

MARCHE DES EXPÉRIENCES.

6. Les métaux purs que j'ai étudiés sont : 1° l'aluminium ; 2° l'argent ; 3° le fer ; 4° le magnésium ; 5° le nickel ; 6° l'or ; 7° le plomb ; 8° le platine ; 9° le cuivre. Pour chaque échantillon de fil, on commençait par mesurer la résistance dans l'air à la température ambiante. Ensuite on plaçait le support sur lequel le fil était enroulé à l'intérieur du vase de Dewar, et on élevait très lentement la température jusqu'à 400° en faisant une détermination de 25° en 25°.

Lorsqu'on était arrivé à 400°, en réglant l'intensité du courant dans le circuit de fer, on refroidissait très lentement le fil jusqu'à la température ordinaire. Dans ce cas, on faisait aussi les mesures de résis-

tance tous les 25°. J'ai employé le même procédé pour les basses températures.

RÉSULTATS.

7. Le pont de Wheatstone nous donnait, outre la résistance du fil à étudier, celle aussi des rhéophores qui établissaient la communication entre le fil et le pont. J'ai calculé la résistance de ces rhéophores à chaque lecture.

Dans cette opération, on a tenu compte de la différence de température des rhéophores, une partie se trouvant à la température ambiante et une autre partie approchant beaucoup de la température qu'il y avait à l'intérieur du récipient de Dewar.

Dans le tableau suivant sont inscrites les valeurs trouvées dans une partie d'une expérience. Dans la cinquième colonne on a calculé les valeurs en unités électromagnétiques absolues de l'expression $R \frac{s_0}{l_0} 10^9$ aux différentes températures de l'échantillon d'argent sans que l'on ait tenu compte de la variation des dimensions du fil. Dans la 6^e colonne sont inscrites les valeurs réelles des résistances spécifiques, obtenues en calculant pour chaque température les dimensions correspondantes du fil.

Pour faire ces réductions, on s'est servi pour les basses températures (+ 40 — 187) des coefficients de dilatation déterminés par H.-D. Ayres ⁽¹⁾ et pour les hautes températures de ceux de Fizeau et de Le Chatelier ⁽²⁾.

Si l'on indique par l_0 et s_0 la longueur et la section du fil mesuré à 0°, par R la résistance en ohm, par α le coefficient de dilatation linéaire du métal dont est constitué le fil, la résistance électrique spécifique σ_t à une température déterminée est :

$$\sigma_t = 10^9 R \frac{s_0}{l_0}$$

ou

$$\sigma_t = 10^9 R \frac{s_0}{l_0} (1 + \alpha t),$$

⁽¹⁾ *Physical Review*, 1905, p. 38.

⁽²⁾ Tableaux de Landolt.

selon que l'on tient compte ou non des variations des dimensions du fil.

Par conséquent, pour obtenir les valeurs de la 6^e colonne, il suffit de multiplier les valeurs correspondantes de la 5^e par le binôme de dilatation.

Le fil d'argent avait une longueur de 580^{cm}, 1 et un diamètre de 0^{cm}, 46.

TABLEAU I. — *Argent de Kahlbaum.*

Température lue avec le 1 ^{er} couple	Température lue avec le 2 ^e couple	Moyenne des températures	Résistance en ohms	$R \frac{\delta_0}{t_0} 10^9$	Résistance spécifique réelle
12°,0	12°,0	12°,00	0,805	1575	1576
25°,0	25°,0	25°,00	0,845	1753	1654
49°,8	49°,8	49°,80	0,919	1797	1798
74°,7	74°,7	74°,70	0,994	1943	1945
101°,0	101°,0	101°,00	1,074	2100	2104
125°,0	125°,1	125°,05	1,074	2242	2247
150°,4	150°,5	150°,45	1,222	2389	2395
174°,8	175°,0	174°,90	1,224	2530	2538
199°,9	200°,1	200°,00	1,369	2677	2687
223°,2	225°,4	223°,30	1,443	2821	2833
250°,8	251°,1	250°,95	1,515	2962	2976
274°,2	274°,6	274°,40	1,585	3098	3114
300°,0	300°,4	300°,20	1,657	3240	3259
323°,7	326°,1	323°,90	1,719	3381	3402
351°,2	351°,7	351°,45	1,794	3508	3531
375°,4	376°,1	375°,57	1,863	3642	3668
400°,2	401°,0	400°,60	1,829	3771	3200
+ 11°,0	+ 11°,0	+ 11°,00	0,802	1569	1569
+ 0°,2	+ 0°,2	+ 0°,20	0,771	1507	7507
— 25°,1	— 25°,1	— 25°,10	0,691	1351	1350
— 49°,9	— 49°,9	— 49°,90	0,624	1221	1220
— 75°,7	— 75°,6	— 75°,65	0,550	1075	1073
— 100°,2	— 100°,1	— 100°,15	0,468	915	913
— 124°,8	— 124°,6	— 124°,70	0,393	758	655
— 151°,3	— 151°,0	— 151°,15	0,327	641	639
— 175°,0	— 174°,6	— 174°,80	0,254	497	495
— 189°,0	— 189°,0	— 189°,00	0,214	419	417

Comme on le voit, la différence entre la résistance électrique spécifique de notre échantillon d'argent et la valeur $R \frac{\delta_0}{t_0} 10^9$ est très petite. En effet, dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire à la température de 400°, cette différence est toujours inférieure à 1 0/0.

Nous pouvons, par conséquent, négliger les variations des dimensions du fil.

C'est ainsi que j'ai fait pour tous les autres métaux dont je rapporte les valeurs des résistances à des températures variées.

TABLEAU II. — Résistances électriques spécifiques en unités électromagnétiques absolues des métaux suivants.

Tempé- ratures	Alumi- nium	Argent	Fer	Magné- sium	Nickel	Or	Plomb	Platine	Cuivre
400°	7991	3772	43345	11893	57257	5818	—	25985	4093
375	7638	3642	40583	11285	53390	5561	—	25132	3941
350	7274	3501	37877	10672	49722	5320	—	24254	3797
325	6917	3377	35235	10080	46243	5084	—	23361	3659
300	6559	3240	32781	9536	42729	4853	49932	22490	3512
275	6204	3094	30357	9002	39480	4623	46897	21572	3322
250	5850	2956	28196	8508	36352	4402	43814	20648	3207
225	5518	2819	26000	8031	33337	4178	40953	19753	3045
200	5172	2676	23928	7576	30464	3956	38047	18885	2888
175	4827	2531	21904	7132	27688	3745	35322	17927	2730
150	4496	2385	20012	6735	25025	3529	32617	17032	2565
125	4192	2242	13235	6318	22514	3317	30151	16058	2403
100	3858	2097	16630	5915	20207	3102	27844	15102	2249
75	3562	1946	15022	5507	17946	2891	25686	14421	2083
50	3237	1798	13504	5069	15723	2675	23663	13146	1921
25	2925	1653	12063	4700	13808	2462	22047	12182	1759
9	2618	1505	10681	4312	12005	2245	19803	11193	1577
— 25	2321	1350	9368	3894	10257	2029	17958	10234	1418
— 50	2067	1223	8147	3491	8825	1818	16190	9248	1251
— 75	1782	1079	6973	3105	7352	1607	14372	8207	1057
— 100	1535	916	5929	2643	6049	1400	12610	7212	904
— 125	1282	765	4962	2300	4866	1191	10975	6218	733
— 150	1038	642	3988	1907	3748	992	9253	5200	558
— 175	795	496	3031	1471	2703	795	7624	4192	391
— 189	641	419	2653	1275	2186	688	6648	3580	302

CONCLUSIONS.

8. On peut facilement se convaincre, à l'aide du tableau ci-dessus et mieux encore par les courbes tracées (*fig. 4*), qu'aucun des métaux examinés ne satisfait exactement à l'hypothèse émise par Clausius. Les métaux qui se rapprochent le plus de cette hypothèse sont l'argent, l'or, le platine et le cuivre; tous les autres métaux s'en éloignent considérablement.

On peut diviser les métaux examinés en deux catégories distinctes :

ceux, comme le fer et le nickel, pour lesquels la rapidité de la variation de la résistance croît avec l'augmentation de la température, et ceux au contraire, comme le platine et l'argent, pour lesquels la rapidité diminue quand la température augmente.

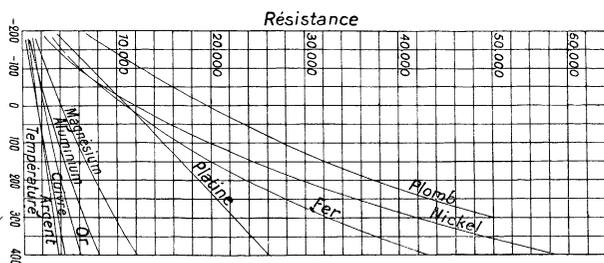


FIG. 4.

On voit, en examinant les courbes, que si on les plonge au-dessous des plus basses températures dont on s'est servi dans ces recherches, elles tendent à passer par l'origine des coordonnées. Cela démontre que la résistance électrique de ces métaux purs doit, sinon s'annuler complètement à la température du zéro absolu, du moins devenir très petite.

Ainsi pour quelques métaux, comme par exemple le cuivre, il semblerait, d'après les courbes ci-dessus rapportées, que sa résistance s'annule avant d'avoir atteint le zéro absolu. Ce fait avait du reste déjà été observé par Wroblewski⁽¹⁾ avec le cuivre électrolytique, dont il détermina la résistance électrique à de basses températures.

Il faut remarquer la grande augmentation de résistance que subissent tous les métaux avec l'élévation de la température. Ainsi, par exemple, le rapport entre la résistance que présente le nickel à $+400^{\circ}$ C. et à -189° est supérieur à 26. Pour le fer, ce rapport est supérieur à 46, supérieur à 12 pour le cuivre, à 12 pour l'aluminium et à 7 pour le platine, qui est de tous les métaux examinés celui pour lequel ce rapport a la valeur la plus faible.

On voit aussi sur le tableau ci-dessus que, pour quelques métaux les courbes qui donnent la résistance en fonction de la température se coupent. Cela a lieu par exemple pour le cuivre et l'argent, pour

(1) C. R., 1835.

le fer et le nickel, pour l'or et l'aluminium, pour le nickel et le platine et pour le platine et le fer. On remarque que les courbes de l'argent et du cuivre se coupent à une température voisine de -70° C. à laquelle les deux métaux ont la même résistance électrique.

Au-dessus de cette température, le cuivre a une conductibilité moindre, et au-dessous de cette température, c'est au contraire l'argent qui est le moins conducteur.

A 25° C., le fer a la même conductibilité que le platine; mais la résistance du fer croît beaucoup plus rapidement avec l'augmentation de la température que la résistance du platine. En effet à $+400^{\circ}$, la résistance du fer est un peu plus de $\frac{5}{3}$ de celle du platine.

Avec des températures inférieures à 25° , c'est, au contraire, le fer qui est un peu plus conducteur.

Le fer et le nickel ont la même conductibilité à environ -100° C., et au-dessous de cette température le nickel devient meilleur conducteur que le fer, tandis qu'il est beaucoup plus résistant à $+400^{\circ}$.

L'aluminium a une résistance plus forte que l'or tant que la température est supérieure à -175° C.; à cette température, les deux courbes se coupent.

On peut aussi observer que, si la loi, d'après laquelle a lieu la variation de la résistance du platine, du fer et du nickel, restait la même jusqu'à la température du zéro absolu, la courbe du platine serait de nouveau coupée dans deux points par les courbes du fer et du nickel.
