

René LAURENT

Ingénieur électricien

Ex-Professeur de l'Enseignement Technique

LES MATÉRIAUX ÉLECTROTECHNIQUES MODERNES

**PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES
CARACTÉRISTIQUES — ESSAIS
APPLICATIONS**

**Précédés d'une étude sur la conception moderne
de la constitution de la matière.**

Préface de M. F. ESCLANGON

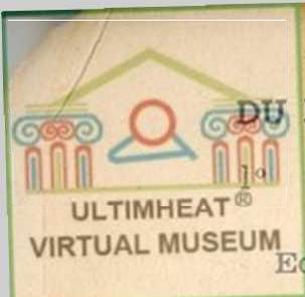
Directeur de l'Institut Polytechnique de Grenoble



EDITIONS DE LA GUILLOTIÈRE

33-35, Rue Rachais

LYON



DU MÊME AUTEUR :

**« LES RÉCEPTIONS RADIOPHONIQUES
ET LES PARASITES »**

Édité par le Syndicat des Industries Radioélectriques de Lyon
et du Sud-Est 1935 (Epuisé).

2° TECHNOLOGIE ÉLECTRIQUE

3° édition 1941

TOME I :

Matériaux utilisés dans l'industrie électrique. — Construction des machines électriques. — Production de l'énergie électrique. — Transmission et distribution. — Transformation de l'énergie électrique.

1 volume 215 × 125. 328 pages, 337 figures.

TOME II :

Transport de l'énergie électrique. — Appareillage électrique. — Utilisation de l'énergie électrique. — Piles et accumulateurs. — Eclairage. — Chauffage domestique et industriel. — Soudure. — Galvanoplastie. — Traction.

1 volume 215 × 125. 348 pages, 367 figures.

3° « LE MOTEUR ÉLECTRIQUE MODERNE »

Sa technique - Son choix - Son installation - Ses applications

Préface de M. J. VERGER

Président du Syndicat Général des Installateurs Electriciens Français

3° édition 1944

Un fort volume 215 × 125

800 pages - 566 figures et schémas dans le texte

Publié sous le Patronage du Syndicat Général
des Installateurs Electriciens Français
et du Syndicat Général de l'Entreprise Electrique

4° « LES MESURES DE L'ÉLECTRICIEN PRATICIEN »

Préface de J. BETHENOD

Ancien Président de la Société Française des Electriciens

2° édition 1942

Un volume 215 × 125 - 340 pages, 229 figures

Chez l'AUTEUR, 5, chemin de Montauban, Lyon (5°)

5° « COMMENT DEVENIR ÉLECTRICIEN »

Manuel à l'usage des futurs apprentis,
chefs d'établissements scolaires, orienteurs, parents...

Aux Editions E. CHIRON : Paris, 40, rue de Seine (6°)

Sous presse : *L'Eclairage électrique moderne.*

En préparation : *L'Energie électrique dans l'industrie textile.*



PRÉFACE

L'ouvrage sur les « Matériaux Electrotechniques Modernes », de M. LAURENT, vient à point. Au cours des vingt dernières années, la multiplication des matériaux utilisés ou utilisables en électrotechnique a été telle qu'il est devenu difficile à un ingénieur de connaître toutes leurs particularités ; aussi voit-on souvent préférer un matériau « classique » à un matériau moderne mieux adapté, simplement parce qu'on connaît l'existence du premier ; il est intéressant de rassembler dans un ouvrage utilisable par les techniciens nos connaissances à ce sujet.

La tâche est lourde, car les propriétés « électrotechniques » des matériaux sont nombreuses. Si les unes, comme les propriétés mécaniques des métaux sont familières aux techniciens (encore que celles de nombreux alliages nouveaux le sont beaucoup moins), si les résistivités sont aussi des nombres connus en ce qui concerne les métaux et les alliages courants tout au moins, il n'en est plus de même pour certaines propriétés diélectriques et magnétiques. Et si l'on tient compte encore de la variété des matériaux électrotechniques, déjà nombreux pour les conducteurs, et que les récents progrès de la chimie organique tendaient à rendre innombrables pour les isolants, on se rend compte de l'ampleur du travail entrepris.

L'auteur parcourt ce champ très vaste en donnant sur chaque matériau tous les renseignements susceptibles d'intéresser le technicien ; il a voulu, en outre, dégager pour chaque groupe d'application la « philosophie » du problème, c'est-à-dire les données théoriques et expérimentales qui permettent de prévenir les directives générales de l'emploi du matériau. Il s'est vu ainsi obligé de remonter aux lois élémentaires de l'électricité et à la constitution de la matière. L'ouvrage contient donc, en plus de la description propre des matériaux, un compendium de physique théorique et expérimentale, de chimie physique, organique et minérale, de métallurgie et de résistance des matériaux.

Certains trouveront ces rappels superflus, d'autres trouveront l'ensemble touffu. La difficulté de la rédaction d'un tel ouvrage est double : il faut d'abord rassembler les renseignements ; il faut ensuite élaguer ; nous, professeurs, savons que l'élagage est bien la partie à la fois la plus délicate et la plus essentielle de notre métier. Mais l'ouvrage de M. LAURENT n'est pas un ouvrage d'enseignement ; c'est



ULTIMHEAT VIRTUAL MUSEUM *un livre destiné à des techniciens qui viendront y trouver et y chercher une série de renseignements.*

Le technicien n'a pas toujours un temps suffisant à consacrer à la méditation ; c'est peut-être dommage, mais c'est ainsi ; il doit réaliser, et souvent vite ; il aime trouver rassemblés les renseignements dont il a besoin ; comme il n'est pas universel et a pu oublier ce qu'on lui a appris dans sa jeunesse, il apprécie le rappel sommaire des données scientifiques du problème qui l'intéresse. C'est ce qui justifie le caractère encyclopédique que M. LAURENT n'a pas craint de donner à son ouvrage.

Le plan du travail est celui même que peut désirer l'usager : après un chapitre de généralités sur la structure de la matière, nous rencontrons successivement les conducteurs, les isolants, les matériaux magnétiques. Chaque partie commence par un rappel des propriétés générales et des méthodes de mesure, afin de bien préciser les grandeurs dont il est parlé par la suite. Puis vient la monographie des matériaux classés dans chaque groupe par ordre alphabétique, la classification portant sur les groupes généraux et non sur la dénomination particulière de tel ou tel produit commercial. Des tableaux de nombres et des figures résument fréquemment un ensemble de propriétés décrites dans le texte.

Le livre est aisément utilisable ; il est facile d'y trouver le renseignement cherché, soit qu'il s'agisse de connaître les propriétés d'un corps donné, soit que l'on veuille chercher le matériau possédant un groupe de propriétés. Souhaitons-lui d'être beaucoup utilisé et de rendre de nombreux services aux électriciens dès que l'abondance des produits permettra de nouveau le choix des matériaux.

F. ESCLANGON,

Directeur de l'Institut Polytechnique de Grenoble.

AVANT-PROPOS

Dans l'évolution de l'humanité, il a été possible d'établir, au point de vue du développement matériel, des périodes caractéristiques : nous avons eu l'âge de la pierre, celle du cuivre, du bronze, puis du fer, enfin des métaux en général. Ne peut-on pas affirmer que les matières premières utilisées par l'industrie ne soient nettement représentatives de ces époques ? Et cela n'est-il pas vrai depuis les périodes les plus reculées jusqu'à l'âge des métaux légers dans lequel nous nous trouvons ?

Mais si l'importance des transformations matérielles qui ont profondément modifié l'existence des individus et des peuples peut nous échapper, vue à travers les temps antérieurs, elle semble actuellement de plus en plus considérable, car son incidence sur notre vie est telle que nous ne pouvons pas ne pas la remarquer. Le rythme des développements industriels s'est très rapidement accru en ces dernières années ; les nécessités d'application de techniques de plus en plus étendues et complexes ont entraîné savants et ingénieurs à rechercher des matériaux correspondant à de nouveaux besoins, à de nouvelles exigences de ces techniques. Les conflits armés, hélas toujours infiniment regrettables dans le domaine social et moral, ont été, il faut bien le constater, un tremplin qui a permis à la science des bonds quasi prodigieux, eu égard au temps écoulé. Le régime d'économie fermée, d'autarcie obligatoire, du à cet état de fait a poussé fiévreusement à l'établissement d'éléments remplaçant ceux que la nature diffuse à profusion à tous mais que, par un juste retour, elle a disséminé de par le monde.

A côté des matériaux naturels employés depuis fort longtemps, ont apparu récemment toutes les matières organiques de synthèse, produits de substitution. Dans tous les domaines de l'activité industrielle le nombre de ces produits de remplacement a augmenté de façon extraordinaire. Leur étude a même souvent démontré qu'on peut obtenir de certains d'entre eux des qualités si remarquables qu'elles dépassent celles des substances naturelles.

La construction électrique n'est pas restée en marge de cette évolution si rapide. Que ce soit avec les métaux légers ou extra-légers dont l'application permet de réduire poids et encombrement, avec les matériaux magnétiques à haute perméabilité obtenus à

partir de nombreux corps isolément non magnétiques ou avec les matières dites « plastiques » employées comme isolants ou diélectriques, nous voyons les applications électrotechniques subir des modifications profondes.

L'utilisation de ces dernières matières, dont quelques-unes sont connues depuis assez longtemps : celluloïd, rayonne... mais dont le développement technique ne remonte guère qu'à une vingtaine d'années, n'en est qu'à ses débuts. En partant de produits naturels simples, dont on dispose à profusion : l'eau, l'air, le charbon, la cellulose, le sel marin, la chaux, on arrive actuellement à obtenir un très grand nombre de produits, demi-produits ou sous-produits utilisables par l'industrie et les perspectives d'avenir sont extrêmement vastes.

Actuellement, l'application des substances plastiques à l'électrotechnique ne représente qu'une faible partie de leurs possibilités d'emploi. Ici le physicien et le chimiste ont devancé l'électricien. Ne peut-on imaginer le temps où celui-ci, ayant à résoudre quelque problème technique s'adressera aux deux premiers qui, choisissant des composants catalogués établis par avance, prépareront à la demande, comme une simple ordonnance de médecin, le nouveau produit désiré ?

C'est pourquoi, considérant toute l'importance d'un tel sujet, il nous a semblé utile et nécessaire de condenser dans un ouvrage toute la bibliographie, extrêmement importante, se rapportant à l'emploi de ces matériaux dans l'électrotechnique moderne. Cet ouvrage que nous présentons aujourd'hui, avec quelque appréhension, à un public averti, n'est qu'une synthèse, certainement incomplète, de ce vaste sujet. Conçu et mis au point il y a plus de deux ans, il s'est senti des difficultés de l'heure et a subi les vicissitudes de l'édition.

Nous avons recherché, autant que possible, à satisfaire aux besoins de documentation des ingénieurs et élèves-ingénieurs, chefs de maîtrise, cadres de l'industrie électrique. Nous en avons banni systématiquement toute théorie complexe et si nous avons fait état de certaines d'entre elles, c'est pour mieux souligner les progrès réalisés sur les anciennes hypothèses. Est-ce à dire que ces théories soient définitives ? Nous sommes assurés du contraire et notre rôle sera précisément de tenir nos lecteurs au courant des tendances futures. Nous avons, avant d'entrer dans le vif du sujet, tenu à leur donner un aperçu succinct de l'évolution des conceptions physiques sur la constitution de la matière. Si certains d'entre eux, frais émoulus des écoles ou ayant approfondi le sujet y trouvent des lacunes évidentes, qu'ils nous les pardonnent ; nous avons surtout songé à tous ceux dont le bagage scientifique est incomplet.

Nous tenons aussi à signaler que chacun des tableaux de valeurs mentionne le nom de l'expérimentateur et les conditions dans les-





quelles les essais ont été exécutés. Il faut en effet remarquer que l'interprétation des chiffres ne peut être absolue mais qu'elle n'est qu'une indication des résultats de recherches, entreprises le plus souvent dans un but particulier. Il sera donc bon en quelque sorte « d'extrapoler » ces résultats, quoique cela soit parfois difficile, les lois des variations des grandeurs en jeu étant souvent ou très complexes ou même encore inconnues.

Nous voudrions enfin adresser nos vifs remerciements à M. L. Domenach, Ingénieur en Chef aux Câbles de Lyon et à MM. Bendayan et Nicolas, ses collaborateurs, qui ont eu l'extrême bienveillance de nous aider dans notre mise au point et nous ont permis de redresser certaines erreurs de forme et de fond ; nous leur en exprimons toute notre gratitude.

R. LAURENT.
(Décembre 1944)



ULTIMHEAT®
VIRTUAL MUSEUM

GÉNÉRALITÉS

On définit actuellement comme étant des matériaux électrotechniques, tous les corps qui entrent dans la construction du matériel et de l'appareillage électriques et radioélectriques, dans l'utilisation de ce matériel, bref dans tout ce qui concerne les applications de l'électricité à la technique industrielle, sous forme de courants ou de charges, à haute ou basse tension, à haute ou basse fréquence.

On a l'habitude de classer ces matériaux en :

a) Matériaux dont on recherche les propriétés de conductibilité électrique : ce sont les *conducteurs*.

b) Matériaux dont on recherche les propriétés anticonductrices de l'électricité : ce sont les *isolants*.

c) Matériaux dont on recherche les propriétés magnétiques, principalement en vue de la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique et inversement : ce sont les *matériaux magnétiques*.

Il est quelquefois assez difficile de classer certains corps comme conducteurs ou isolants, tous les corps possédant une certaine conductibilité électrique ; celle-ci variant dans des limites très étendues, la distinction entre corps bons ou mauvais conducteurs est parfois arbitraire. Les propriétés conductrices seront bien définies en ce qui concerne la plupart des métaux. Il n'en sera pas de même des isolants dont les conditions d'application modifient souvent de façon très sensible la structure interne, donc les propriétés aux différents points de vue de leur utilisation pratique. Quant aux matériaux magnétiques, la connaissance exacte de leur composition ne permet pas toujours de déterminer avec assez de précision leurs propriétés mécaniques, physiques, électriques et magnétiques et de fixer les conditions de leur emploi.

Si l'on considère les matériaux entrant dans la construction du matériel électrique, on est frappé par le petit nombre de ceux utilisés au



point de vue mécanique, magnétique et conduction du courant (aciers, cuivre, aluminium...) et la variété considérable des produits isolants. C'est que les métaux possèdent, en même temps que la propriété particulière qui leur est demandée (magnétisme pour le fer et l'acier, conductibilité électrique pour le cuivre ou l'aluminium...), les autres caractéristiques indispensables à l'exécution économique et au bon fonctionnement du matériel : facilité d'usinage, résistance mécanique, conductibilité calorifique, stabilité chimique...

Les isolants, au contraire, n'ont que fort peu de qualités communes et, suivant leur nature, ils ne donnent satisfaction que pour un nombre limité de conditions : d'où leur très grand nombre. De tous les matériaux électrotechniques, ce sont de beaucoup ceux qui ont réalisé les plus grands progrès dans ces dernières années.

Au début de leur emploi, on se contentait d'isoler des conducteurs, presque toujours soumis à de faibles tensions, à l'aide de papiers, de toiles ou de gommes d'usage courant dans le commerce et de plonger le tout dans un vernis quelconque. De tels isolants n'auraient pas permis la réalisation de matériel à haute tension. Il en est de même de ceux qui interviennent dans la construction radioélectrique.

Il a donc fallu améliorer considérablement leurs qualités, mais pour ce faire on a été contraint de définir les caractéristiques électriques auxquelles doivent satisfaire les isolants à la lumière de la conception moderne sur la constitution de la matière. C'est pourquoi nous avons cru devoir, dans l'intérêt de notre ouvrage, consacrer un chapitre spécial à cette question primordiale.

CONCEPTION MODERNE DE LA CONSTITUTION DE LA MATIÈRE

Les sciences physiques ont réalisé, depuis le début du xx^e siècle des progrès considérables. Telle théorie qui semblait répondre, il y a quelque cinquante ans, aux problèmes alors posés se trouve, aujourd'hui, dépassée par les découvertes de phénomènes de jour en jour plus complexes.

Les anciens croyaient en la diversité infinie des corps. Un premier stade du progrès accompli dans la conception de la constitution de la matière fut réalisé lorsqu'on put démontrer que, malgré les apparences, la matière n'était cependant formée que d'un certain nombre, et d'un *nombre fini* de constituants. Ce sont surtout des faits expérimentaux d'ordre chimique qui ont fixé la notion des *corps simples*, constitutifs de toute matière.

Un second échelon a été atteint lorsqu'il a été établi que la matière est *discontinue* et qu'en réalité chaque corps simple est formé d'éléments identiques entre eux, auxquels on a donné le nom d'*atomes* et que chaque *corps composé* est une réunion de particules identiques entre elles, constituées d'atomes, et qu'on a appelé des *molécules*. Sous sa forme première, la *théorie atomique* représentait les atomes comme indestructibles et insécables.

Le dernier stade fut accompli lorsque, afin d'expliquer des phénomènes d'ordre physique, en particulier ceux relatifs aux échanges d'énergie, il a fallu considérer l'atome comme un ensemble complexe. On a reconnu que les atomes des différents corps simples possédaient des éléments constitutifs identiques, et que ces corps ne différaient entre eux que par le nombre et la disposition de leurs éléments. Les analogies constatées entre les propriétés de certains corps simples s'expliquaient ainsi par des analogies de constitution interne de leurs atomes.

SUBSTANCES	Module d'élasticité E		Limite d'élasticité Re		Limite de rupture Rr		Allongement relatif à la rupture Δ
	(kg/mm ²)	(kpz)	(kg/mm ²)	(kpz)	(kg/mm ²)	(kpz)	
Aluminium pur recuit	7 000	68 600	15	147	17	166,9	
Aluminium écroui . . .	7 000	68 600			25	245,4	0,03
Almélec	7 000	68 600	24	235	35	343,7	0,04
Argent	7 500	73 500	0,5	4,9	16	357	
Cuivre recuit	12 000	117 000	6	59	24	235,8	0,50
Cuivre écroui (fils) . .	13 000	127 200	20	196	45	442	0,01 à 0,001
Duralumin.	7 000	68 600			45 à 55	442 à 540	0,03 à 0,04
Etain	5 000	49 000			8	78,5	
Fer	20 000	196 000	20	196	66	647	0,06 à 0,25
Nickel.	22 000	215 000	9	88	50	490	
Platine	17 000	166 500			36	353	
Plomb	1 700	16 650			3	29,4	
Tantale	18 600	182 000			9,3	91,4	
Zinc	9 000	88 200			6	58,9	
Acier ordinaire	22 000	215 000	20 à 60	196 à 590	35 à 100	343 à 981	0,10 à 0,35
Acier au nickel.	20 000	196 000	50	490	70 à 80	686 à 785	0,30 à 0,40
Bronze phosphoreux . .	12 000	117 600					
Laiton	9 200	90 100			42	412	0,38
Constantan	16 300	159 500	30	285	32	314	0,06
Maillechort	10 800	106 000					
Manganine	12 400	121 500					
Ferro-nickel			40	393	75	736	0,50
Alliage RNC1.	18 500	181 500	35 à 40	344 à 393	65 à 70	637 à 686	0,35 à 0,40
Alliage RNC2.	20 000	196 000	40 à 45	393 à 442	70 à 75	686 à 736	0,32 à 0,35

TABEAU DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET ÉLECTRIQUES DES PRINCIPAUX CONDUCTEURS ÉLECTRIQUES



CORPS	POIDS spécifique (gr/cm ³)	RESISTIVITE (μΩ . cm ² /cm) à la température de		CONDUCTIVITE par rapport à celle du cuivre	COEFFICIENT de température α	TEMPÉRATURE de fusion (°C)	CHALEUR spécifique	CONDUCTIVITE thermique (calorie-gramme /°C.cm ² /cm)	COEFFICIENT de dilatation linéaire
Aluminium extra pur (99,9 %)	2,58	2,8	20°C	61,5	41 . 10 ⁻⁴				
Aluminium écroui.	2,703	2,873	20°C	60	40 . 10 ⁻⁴	657	0,22	0,48	23 . 10 ⁻⁶
Almélec	2,7	3,25	0°C	55	36 . 10 ⁻⁴				22 . 10 ⁻⁶
Argent	10,5	1,5	0°C	106	40 . 10 ⁻⁴	960	0,056	0,96	18,7.10 ⁻⁶
Bismuth	10,05	11	0°C	14	45 . 10 ⁻⁴	269,2	0,03	0,02	15,4.10 ⁻⁶
Cuivre électrolytique.	9,05	1,54	0°C	106	41 . 10 ⁻⁴	1 080	0,093	0,92	
Cuivre recuit normalisé	8,89	1,724	20°C	100	39,3.10 ⁻⁴				
Cuivre recuit industriel	8,9	1,7	0°C	94		1 082	0,092	0,84	16 . 10 ⁻⁶
Duralumin	2,75 à 2,8	4,2 à 4,9	15°C	39 à 34	40 . 10 ⁻⁴				23 . 10 ⁻⁶
Étain	7,3	11	0°C	14	43 . 10 ⁻⁴	231,5	0,055	0,15	27 . 10 ⁻⁶
Fer pur commercial	7,85	10 à 12	0°C		55 . 10 ⁻⁴	1 500	0,113	0,20	11,45.10 ⁻⁶
Fonte		80			75 . 10 ⁻⁴		0,146		
Mercure	13,55	94,076	0°C	1,85	8,87.10 ⁻⁴	— 39	0,033	0,02	
Molybdène	10,2					> 2 550	0,07		3,6 . 10 ⁻⁶
Nickel	8,7	10	0°C	1,6	60 . 10 ⁻⁴	1 452	0,11	0,14	12,5.10 ⁻⁶
Osmium	22,5	9,5	20°C	1,6	42 . 10 ⁻⁴	2 700			5,7 . 10 ⁻⁶
Platine.	21,5	11	0°C	14	38 . 10 ⁻⁴	1 750	0,032	0,19	8,8 . 10 ⁻⁶
Plomb	11,3	19,5	0°C	8,2	42 . 10 ⁻⁴	327	0,03	0,08	29 . 10 ⁻⁶
Tantale	16,6	13 à 16	20°C		27 . 10 ⁻⁴	2 800			
Tungstène	18,7	6 à 8	20°C	21,6	39 . 10 ⁻⁴	2 970	0,034		3,36.10 ⁻⁶
Zinc	7,12	5,7	0°C	27	40 . 10 ⁻⁴	418	0,068		28 . 10 ⁻⁶
Acier au chrome (Cr : 0,13 ; C : 0,002) ..		60	20°C	2,88					
Acier au nickel (Ni : 0,30 ; C : 0,001) ..		82	20°C	2,10					7,5 . 10 ⁻⁶

Acier au silicium (Si : 0,04)		62	20°C	2,8	8 . 10 ⁻⁴				
Acier au manganèse (Mn : 0,13 ; C : 0,01) ..	7,81	66	20°C	2,6	12,7.10 ⁻⁴	1 260		0,03	15 . 10 ⁻⁶
Bronze d'aluminium (Cu : 0,90 ; Al : 0,10) ..	7,6	12,6	20°C	1,22	3,2 . 10 ⁻⁴	1 050	0,104	0,18	16,5.10 ⁻⁶
Bronze phosphoreux (Cu : 0,98 ; Sn : 0,02) ..	8,9	5 à 6	0°C						17 . 10 ⁻⁶
Bronze siliceux	8,9	1,7 à 2	0°C						
Constantan (Cu : 0,60 ; Ni : 0,40) ..	8,4	49	18°C	3,5	±0,1.10 ⁻⁴	1 240	0,100	0,054	12 . 10 ⁻⁶
Ferro-nickel (Fe : 0,74 ; Ni : 0,25 ; Cr : 0,008) ..	8,1	80	20°C	2,2	9 . 10 ⁻⁴	1 500		0,15	18 . 10 ⁻⁶
Laiton (Cu : 0,60 ; Zn : 0,40)		8,15	15°C	20	10 . 10 ⁻⁴				
Maillechort (Cu : 0,60 ; Ni : 0,15 ; Zn : 0,25) ..	8,6	30	0°C	5,3	3,6 . 10 ⁻⁴	1 500	0,095		18,4.10 ⁻⁶
Manganine (Cu : 0,84 ; Mn : 0,12 ; Ni : 0,04) ..	8,3	42	18°C	4,1	±0,1.10 ⁻⁴		0,097	0,052	
Nichrome (Cu : 0,60 ; Cr : 0,12 ; Fe : 0,28) ..		137	0°C		0,002 . 10 ⁻⁴				
Nickeline (Cu : 0,62 ; Ni : 0,18 ; Zn : 0,20) ..		33	0°C	5	3 . 10 ⁻⁴				
Nickeline (Cu : 0,55 ; Ni : 0,25 ; Zn : 0,20) ..		45	0°C	3,6	3 . 10 ⁻⁴				
Platine rhodié (Pt : 0,90 ; Rh : 0,10) ..		27	0°C		13 . 10 ⁻⁴				
Rhéotan (Cu : 0,53 ; Ni : 0,25 ; Zn : 0,17 ; Fe : 0,05) ..		52,5	0°C	3,0	4 . 10 ⁻⁴				
Alliage RNC 1	8,05	100 ± 4	15°C		3 . 10 ⁻⁴	1 450			
Alliage RNC 2	8,25	111 ± 4	15°C		1 à 1,5 . 10 ⁻⁴	1 450			
Alliage RNC 3	8,45	98 ± 4	15°C		1,2 . 10 ⁻⁴	1 475			

On trouvera les caractéristiques de certains conducteurs modernes utilisés comme résistances de chauffage, dans le chapitre d'utilisation de ces matériaux, page





**TABLEAU DONNANT LA RESISTANCE EN HAUTE-FREQUENCE DE FILS DE CUIVRE
EN FONCTION DE LA LONGUEUR D'ONDE** (d'après Zenneck).

Diamètre du fil (mm)	Résistance en courant continu	Résistance en courant alternatif haute fréquence pour λ mètres égal à :						
		100	300	600	1 000	2 000	3 000	6 000
0,2	0,554	0,86	0,61	0,57	0,56	0,56	0,56	0 55
0,4	0,138	0,399	0,245	0,183	0,157	0,143	0,141	0,139
0,6	0,061 5	0,257	0,156	0,115	0,093	0,072	0,067	0,063
0,8	0,034 6	0,190	0,110	0,083	0,067	0,049 8	0,042 2	0,037 0
1	0,022 1	0,151	0,108	0,069	0,052	0,038 2	0,032 3	0,025 4
1,4	0,011 3	0,106	0,062	0,045	0,035 9	0,026 3	0,022 1	0,016 4
2	0,005 54	0,074	0,043 2	0,031	0,024 5	0,017 8	0,014 8	0,011 0
3	0,002 46	0,049 7	0,028 7	0,020 4	0,016 0	0,011 5	0,009 5	0,006 9
4	0,001 38	0,036 6	0,021 4	0,015 1	0,011 8	0,008 5	0,007 0	0,005 1
5	0,000 886	0,029 2	0,016 9	0,012 4	0,009 4	0,006 7	0,005 5	0,004 0
6	0,000 615	0,024 3	0,014 1	0,010 1	0,007 8	0,005 6	0,004 58	0,003 3
7	0,000 452	0,020 8	0,012 0	0,008 5	0,006 7	0,004 7	0,003 91	0,002 81
8	0,000 346	0,018 2	0,010 5	0,007 5	0,005 8	0,004 15	0,003 41	0,002 44

Les nombres donnent la résistance en ohms, de 1 mètre de conducteur. La conductibilité en courant continu est prise égale à $0,575 \times 10^{-3}$ C.G.S.

**TABLEAU DONNANT LE DIAMETRE MAXIMUM DES FILS DE CUIVRE A ADOPTER
POUR QUE LA RESISTANCE H.F. NE DIFFERE PAS DE 1 % DE LA RESISTANCE
EN COURANT CONTINU (d'après Zenneck)**

MATIERE	Conductibilité (en unités C.G.S.)	Diamètre maximum (en mm) pour une longueur d'ondes (en m) de			
		6 000	1 200	600	120
Acier doux : perméabilité 3 000..	10×10^{-5}	0,019	0,008 4	0,006 0	0,002 7
1 000..	10×10^{-5}	0,033	0,015	0,010	0,004 6
— 300..	10×10^{-5}	0,059	0,027	0,018	0,008 4
— 100..	10×10^{-5}	0,099	0,044	0,031	0,014
— 10..	10×10^{-5}	0,33	0,15	0,10	0,046
Or	45×10^{-5}	0,56	0,25	0,17	0,079
Cuivre.	$57,5 \times 10^{-5}$	0,49	0,22	0,15	0,006 9
Constantan	2×10^{-5}	2,6	1,2	0,83	0,37
Manganine	$2,4 \times 10^{-5}$	2,4	1,1	0,75	0,34
Nickeline	10×10^{-5}	1,2	0,57	0,37	0,17
Platine	$1,06 \times 10^{-5}$	3,6	1,6	1,1	0,51
Mercure.	$0,08 \times 10^{-5}$	13,2	5,9	4,2	1,9
Graphite	$0,4 \times 10^{-5}$	5,9	2,7	1,9	0,84
Charbon de cornues	$0,025 \times 10^{-5}$	23,6	10,6	7,5	3,4





ARGENT

L'argent se trouve dans la nature disséminé sur toute la surface de la terre. Il existe également, en faible proportion, dans l'eau de mer et dans les pierres météoriques.

Les principales espèces minéralogiques de profondeur sont :

- l'argent natif, en cristaux cubiques ou en octaèdres.
- le sulfure d'argent (*argentite*) au Chili, Pérou, Mexique.
- le sulfure double d'argent et de cuivre, cristallisant sous différentes formes, rencontré en Silésie, au Chili, au Mexique, en Tchécoslovaquie.
- les sulfures complexes : argent-antimoine, argent-cuivre, argent-arsenic...

Les principales espèces minéralogiques d'affleurement sont :

- le chlorure d'argent ou *argent corné*, cubique, souvent combiné au chlorure de sodium (Mexique, Pérou, France).
- le chlorobromure ou *embolite*.
- la *galène argentifère* ; cette dernière, bisulfure de plomb, contient de l'argent natif en filaments qui est exploitable à partir de 500 grammes à la tonne et certaines galènes en contiennent de 2 à 3 kilogrammes. En France, on traite la galène argentifère en Bretagne, dans les Vosges, le Massif Central et les Alpes. Les pays producteurs d'argent sont actuellement, par ordre d'importance les Etats-Unis, le Mexique, le Canada, l'Amérique du Sud, l'Asie, l'Europe (Allemagne).

ELABORATION DU METAL.

Quel que soit le minerai, il est d'abord broyé dans des concasseurs, soit à sec, s'il est riche, soit en présence d'eau, s'il est pauvre. La méthode la plus employée actuellement pour l'extraction est le traitement par le plomb, suivi de coupellation, procédé qui convient le mieux aux minerais riches mais qui peut être utilisé pour des minerais pauvres, enrichis par flottaison.

Le procédé par amalgamation, qui a été très en vogue, se trouve en régression.

Enfin on utilise plusieurs autres procédés, dont l'un des plus courants est l'affinage du minerai par voie électrolytique.

Dans le procédé par le plomb, on dissout le minerai argentifère dans du plomb fondu en ajoutant des fondants qui précipitent les scories et les font surnager le métal. Le plomb d'œuvre ainsi obtenu est enrichi pour compenser la perte due à la fusion, puis chauffé dans un courant d'air qui oxyde les différents métaux en suspension sans attaquer l'argent. On élève peu à peu la température, et par giration



des cuves de fusion on élimine progressivement les oxydes jusqu'à 1000°C, on refroidit la masse en l'aspergeant d'eau et on détache l'argent au ciseau.

Pour obtenir de l'argent parfaitement pur, on procède à un raffinage, généralement par voie électrolytique.

PROPRIETES PHYSIQUES.

L'argent en morceaux, bien décapé, est d'un blanc pur, avec éclat métallique, dû à son pouvoir réfléchissant ; en feuilles très minces il est bleu par transparence.

— Densité à 20° C : 10,49.

— Coefficient de dilatation linéaire à 40° C : $1,92 \cdot 10^{-5}$.

L'argent est bon conducteur de la chaleur ; sa conductibilité thermique, un peu moindre que celle de l'or, est 1,35 fois celle du cuivre.

Ce métal est le meilleur conducteur de l'électricité que l'on connaisse, supérieur de 4 pour 100 environ au cuivre industriel. L'argent recuit est un peu plus conducteur que l'argent étiré.

PROPRIETES MECANIKES.

La dureté de l'argent est comprise entre celle de l'or et celle du cuivre ; sa dureté absolue est 91, son chiffre de Brinell 12 ; la dureté est augmentée par toute addition de cuivre jusqu'à 10 pour 100.

L'argent est très malléable et très ductile ; il vient directement après l'or. Sa ténacité est voisine de celle du cuivre ; sa charge de rupture est de 28,5 kilogrammes à 0 degré ; elle diminue quand la température s'élève et monte à 37,4 kilogrammes à — 182° C. L'argent peut se souder à lui-même par martelage à une température inférieure à la température de fusion.

PRINCIPALES APPLICATIONS ELECTROTECHNIQUES.

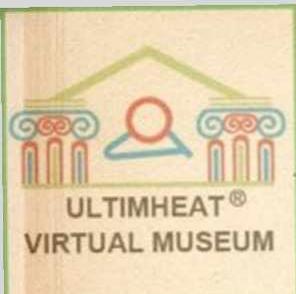
L'argent est surtout utilisé comme coupe-circuit fusible : Sa constante de temps étant très faible, il offre une assez grande sécurité d'emploi, surtout en haute tension.

Pièces d'appareillage électrique demandant une certaine inaltérabilité à la chaleur ou à l'arc (contacts de rupture, pastilles de relais sensibles...).

Appareils électromédicaux (thermocautères).

Fils de torsion pour galvanomètres et spiraux d'amenée de courant pour appareils de mesure...

Revêtement de protection par galvanostégie sur certains conducteurs (fils argentés).



CUIVRE

Le cuivre est l'un des éléments les plus répandus dans la nature, et se trouve disséminé dans toutes les roches primitives et dans les alluvions qui proviennent de leur désagrégation. Il en existe dans le soleil, ainsi que dans les aérolithes.

Les principaux pays producteurs sont, par ordre d'importance : les États-Unis, le Chili, l'Afrique, le Canada, le Mexique, l'Espagne, le Japon, le Pérou, l'Allemagne, la Norvège, l'U.R.S.S. On trouve du *cuivre natif* en dépôts considérables et profonds au nord du lac Supérieur (E.-U.). En dehors de ce cas exceptionnel, on rencontre le métal sous forme de sulfures. Le plus important est la *chalcoppyrite*; d'autres sulfures, la *chalcosine*, la *covelline*, la *bornite* ont des teneurs plus faibles. On trouve également le sulfure de cuivre à l'état de complexes avec les sulfures d'arsenic, de plomb et d'antimoine : *enargite*, *cuivre gris*, *bournonite*... La *cuprite*, qui est un sel oxygéné, est un minerai dense, de nuance rouge.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Le cuivre est un métal rouge, un peu rosé lorsqu'il est bien pur et privé de toute trace d'oxyde. Fondu, il prend parfois une teinte gris bleuâtre. Les feuilles très minces sont translucides et transmettent une lumière verte. Bien poli, le cuivre possède un vif éclat métallique mais qui se ternit rapidement au contact de l'air.

La valeur rigoureuse de la densité du cuivre pur est légèrement divergente suivant les auteurs, car cette caractéristique dépend de l'histoire mécanique et thermique du métal. Les résultats oscillent entre 8,914 et 8,937.

CUIVRE ELECTROLYTIQUE.

Le cuivre *électrolytique* ou *cuivre pur* est obtenu par voie électrochimique : c'est ce qu'on appelle l'*affinage du cuivre*. Une électrode en cuivre pur sert de cathode, une électrode en cuivre impur sert d'anode ; le cuivre électrolytique se dépose sur la cathode.

La présence d'impuretés diminue considérablement la conductivité du cuivre électrolytique. Si on connaît la teneur en pour 100 d'impuretés, la diminution de la conductivité du cuivre pur est donnée par :

$$b = a \beta$$

b : diminution de la conductivité, en %.

a : teneur en impuretés, en %.

β : coefficient expérimental.

Le coefficient β possède les valeurs suivantes (d'après L. Addicks)

Impuretés	β	Impuretés	β
Aluminium	500	Or	10
Antimoine	190	Oxygène	25
Argent	6	Phosphore	800
Arsenic	720	Plomb	3
Bismuth	4	Silicium	70
Cadmium	9	Soufre	8
Etain	67	Tellure	4
Fer	140	Zinc	30

La résistivité ρ' du cuivre impur est donnée, en fonction de la résistivité ρ du cuivre pur par la formule :

$$\rho' = \frac{\rho}{1 - 0,01 b}$$

dans laquelle b est établi par la formule précédente. Cette dernière ne s'applique pas aux alliages.

CUIVRE RECUIT.

Le cuivre recuit a fait l'objet d'une spécification internationale qui a été publiée par l'Union Technique des Syndicats de l'Electricité ; Publication C 3 (1930), dont nous donnons l'essentiel.

On considère le cuivre type recuit et le cuivre industriel.

Note. — On appelle *densitérésistivité* d'un métal, le produit de sa résistivité par sa densité : $\delta = \rho \cdot d$.

I. — Cuivre-type, recuit.

Les données suivantes seront prises comme valeurs normales pour le cuivre-type recuit :

1° A la température de 20° C., la résistivité du cuivre-type recuit est de $1/58 = 0,017241\dots$ ohm \times millimètre carré par mètre

$$\left(\frac{\text{ohm} \times \text{mm}^2}{\text{m}} \right)$$



NORMALISATIONS CONCERNANT LES CONDUCTEURS EN CUIVRE

1°) NORMALISATION DES DIAMETRES DES CONDUCTEURS EN CUIVRE.

Celle-ci a fait l'objet de la publication C 13 de l'Union Technique des Syndicats de l'Electricité ; les diamètres et les sections correspondantes sont donnés dans le tableau suivant.

CONSTITUTION des conducteurs Diamètre (mm)	SECTIONS (mm ²)	CONSTITUTION des conducteurs Diamètre (mm)	SECTIONS (mm ²)
1×12/10	1,13	19×12/10	21,5
1×16/10	2,01	19×14/10	29,3
1×20/10	3,14	19×16/10	38
1×25/10	4,91	19×18/10	48
1×30/10	7,07	19×20/10	60
1×34/10	9,08	37×16/10	74
7× 9/10	4,45	37×18/10	94
7×10/10	5,50	37×20/10	116
7×12/10	7,92	37×22/10	141
7×14/10	10,8	37×24/10	167
7×16/10	14,1	37×26/10	196
7×18/10	17,8	37×28/10	228
		37×30/10	262

2°) NORMALISATION DES FILS DE CUIVRE NUS CYLINDRIQUES A SECTION DROITE CIRCULAIRE.

Extraits de la publication C 19 (1927) de l'Union Technique des Syndicats de l'Electricité.

Cette réglementation s'applique aux fils nus cylindriques, en cuivre électrolytique, destinés aux usages suivants :

- a) Fils recuits, pour les bobinages de machines ou d'appareils ;
- b) Fils recuits, pour les câbles destinés à la transmission d'énergie électrique, à la télégraphie, à la téléphonie.
- c) Fils durs, pour les lignes aériennes ou l'appareillage.

Diamètres normaux.

La série des diamètres normaux, exprimés en millimètres, est la suivante :

0,05 — 0,06 — 0,07 — 0,08 — 0,09 — 0,10 — 0,11 — 0,12 — 0,14
0,15 — 0,16 — 0,18 — 0,20 — 0,22 — 0,25 — 0,28 — 0,30 — 0,32
0,35 — 0,38 — 0,40 — 0,42 — 0,45 — 0,48 — 0,50 — 0,52 — 0,55
0,58 — 0,60 — 0,62 — 0,65 — 0,68 — 0,70 — 0,75 — 0,80 — 0,85
0,90 — 0,95 — 1,00 — 1,05 — 1,10 — 1,15 — 1,20 — 1,25 — 1,30
1,35 — 1,40 — 1,50 — 1,60 — 1,70 — 1,80 — 1,90 — 2,00 — 2,10
2,20 — 2,30 — 2,40 — 2,50 — 2,60 — 2,70 — 2,80 — 2,90 — 3,00
3,10 — 3,20 — 3,30 — 3,40 — 3,50 — 3,60 — 3,70 — 3,80 — 3,90
4,00 — 4,20 — 4,40 — 4,50 — 4,60 — 4,80 — 5,00 — 5,20 — 5,50
5,80 — 6,00 — 6,50 — 7,00

Les fils dont le diamètre ne figure pas sur cette liste seront considérés comme spéciaux, et les conditions de réception relatives à ces fils spéciaux devront faire l'objet d'accords particuliers entre l'acheteur et le vendeur.

Mesure du diamètre.

Pour les fils d'un diamètre supérieur à 0,50 millimètre, le diamètre sera assuré au moyen d'un palmer à friction ou d'un micromètre à cadran, entre touches planes, circulaires, d'un diamètre de 5 millimètres. On prendra comme valeur du diamètre la moyenne de deux lectures faites dans deux directions perpendiculaires. La différence des lectures ne devra pas dépasser 2 pour 100 du diamètre théorique pour les fils recuits et 3 pour 100 pour les fils durs.

Pour les fils de 0,50 millimètre de diamètre ou moins, on calculera le diamètre moyen d'après le poids d'une longueur de fil égale à 10 mètres, en prenant, pour la densité du cuivre entre les températures de 10° et 30° C, la valeur de 8,89.

Aspect extérieur.

La surface du métal ne doit présenter ni aspérités, ni pailles, ni stries, ni bavures. Elle doit être propre et débarrassée de toute trace d'oxyde, de sulfure ou de matières étrangères, et particulièrement des produits chimiques employés au décapage.

Résistivité.

On prendra pour base la résistivité du cuivre-type recuit définie par la Publication C-3 de l'Union Technique des Syndicats de l'Électricité.

Caractéristiques mécaniques.

La résistance à la rupture sera mesurée sur une machine à traction marchant à la vitesse maximum de 1 centimètre par seconde. Les repères destinés à la mesure de l'allongement seront distants de 200 millimètres pour les fils de plus de 0,50 millimètre et de 500 millimètres pour les fils de 0,50 millimètre et moins. La mesure en



sera effectuée en rapprochant les morceaux après rupture, dans le premier cas ; dans le second cas, on pourra lire directement l'allongement sur la machine à traction si elle est disposée à cet effet. La cassure devra se trouver à une distance des repères égale au moins à 12 fois le diamètre du fil.

Résistance aux pliages répétés.

L'épreuve se fera à la main, sur des mâchoires dont les arrondis sont fixés explicitement par un article. La première flexion, correspondant à un angle de 90°, s'obtiendra en plaçant le fil dans le prolongement du plan de serrage, puis en le courbant sur la face de l'une des mâchoires. Les autres flexions, correspondant à des angles de 180°, seront comptées successivement à partir de la position prise par le fil après la première flexion. Dans chaque flexion, le fil devra toucher dans toutes ses parties, et notamment dans le voisinage du plan de serrage, la face de la mâchoire sur laquelle on l'aura incliné. Un fil est considéré comme supportant n pliages s'il casse au cours du $(n + 1)$ ème pliage.

3°) CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES FILS DE CUIVRE PUR RECUIT, DE HAUTE CONDUCTIBILITE.

Elles sont données dans le tableau suivant, en fonction des grandeurs normalisées (voir page 97).

$$t = 0^{\circ} \text{ C} \quad d = 8,9 \text{ g/cm}^3 \quad \rho_0 = 1,588 \mu \Omega \times \text{cm}^2/\text{cm}$$
$$\alpha = 0,0042 \text{ 8}$$

ALLIAGES DE CUIVRE

LAITONS

Les laitons sont des alliages de cuivre et de zinc, auxquels on ajoute parfois d'autres corps en petite quantité (étain, plomb, fer). Ce sont de beaucoup les alliages de cuivre les plus utilisés en construction et en appareillage électriques. Ils sont toujours fabriqués par union directe.

Les propriétés mécaniques des laitons sont très variables, d'autant plus qu'elles portent en majorité sur des alliages industriels. D'une façon générale, pour les laitons recuits, la charge de rupture croît avec la teneur en zinc jusque vers 45 pour 100, où elle est maximum ; elle diminue brusquement entre 45 et 50 pour 100. L'allongement suit une marche analogue, mais avec un maximum vers 30 pour 100 de zinc, suivi d'une diminution plus progressive. La dureté augmente avec la proportion de zinc.

Le laiton français premier titre est employé sous forme de planches laminées ou de bandes, de tubes étirés sans soudure... Sa composition varie peu.

Le laiton français deuxième titre est plus sec et se prête mal à

CARACTERISTIQUES DES FILS DE CUIVRE



ULTIMHEAT®
VIRTUAL MUSEUM

Diamètre (mm)	Section (mm ²)	Poids (g/m)	Longueur (m/kg)	Résistance (Ω/km à 0°C)	Résistance (Ω/kg à 0°C)
0,04	0,0012	0,0112	89 410	12 714	136 800
0,05	0,0020	0,0175	57 220	8 158	465 600
0,06	0,0028	0,0252	39 730	5 664	224 500
0,07	0,0038	0,0342	29 190	4 151,4	121 200
0,08	0,0050	0,0447	22 350	3 178,4	71 360
0,09	0,0064	0,0566	17 660	2 511,3	44 550
0,1	0,0079	0,0699	14 306	2 034,2	29 100
0,2	0,0314	0,2796	3 576	508,230	1 817
0,3	0,0707	0,6291	1 589	226,020	359,280
0,4	0,1257	1,1184	894,1	127,140	113,680
0,5	0,1963	1,7475	572,2	81,580	46,560
0,6	0,2827	2,5164	397,3	56,640	22,450
0,7	0,3848	3,4251	291,9	41,514	12,120
0,8	0,5027	4,4736	223,5	31,784	7,136
0,9	0,6362	5,6619	176,6	25,113	4,455
1,0	0,7854	6,9900	143,0	20,342	2,910
1,1	0,9503	8,4580	118,2	16,811	2,004
1,2	1,1310	10,066	99,34	14,126	1,409
1,3	1,3273	11,813	84,65	12,036	1,025
1,4	1,5394	13,700	72,99	10,378	0,761
1,5	1,7671	15,728	63,58	9,040	0,579
1,6	2,0106	17,895	55,88	7,946	0,445
1,7	2,2698	20,201	49,50	7,038	0,349
1,8	2,5447	22,648	44,15	6,278	0,277
1,9	2,8353	25,234	39,62	5,634	0,223
2,0	3,1416	27,960	35,76	5,085	0,181
2,1	3,4636	30,826	32,44	4,612	0,150
2,2	3,8013	33,832	29,55	4,202	0,124
2,3	4,1548	36,977	27,04	3,845	0,103
2,4	4,5239	40,263	24,83	3,531	0,088
2,5	4,9087	43,688	22,89	3,254	0,074
2,6	5,3093	47,253	21,16	3,009	0,063
2,7	5,7256	50,957	19,62	2,790	0,054
2,8	6,1575	54,802	18,24	2,594	0,047
2,9	6,6052	58,786	17,01	2,418	0,041
3,0	7,0686	62,910	15,89	2,255	0,036
3,1	7,5477	67,174	14,88	2,116	0,032
3,2	8,0425	71,578	13,97	1,986	0,027
3,3	8,5530	76,122	13,13	1,867	0,024
3,4	9,0792	80,805	12,37	1,759	0,021
3,5	9,6211	85,628	11,67	1,660	0,019
3,6	10,1788	90,591	11,03	1,569	0,017
3,7	10,7521	95,675	10,43	1,485	0,015
3,8	11,3412	100,92	9,90	1,408	0,013
3,9	11,9459	106,26	9,40	1,337	0,012
4,0	12,5664	111,84	8,94	1,271	0,011
4,1	13,2025	117,48	8,51	1,210	0,010
4,2	13,8544	123,26	8,11	1,153	0,009
4,3	14,5220	129,22	7,73	1,100	0,0085
4,4	15,2053	135,28	7,39	1,050	0,0077
4,5	15,9043	141,51	7,06	1,004	0,0071
4,6	16,6190	147,82	6,76	0,961	0,0065
4,7	17,3494	154,32	6,47	0,920	0,0059



CARACTERISTIQUES DES FILS DE CUIVRE

Diamètre (mm)	Section (mm ²)	Poids (g/m)	Longueur (m/kg)	Résistance (Ω/km à 0°C)	Résistance (Ω/kg à 0°C)
4,8	18,0956	161,00	6,20	0,882	0,0054
4,9	18,8574	167,76	5,95	0,847	0,0050
5,0	19,6350	174,74	5,72	0,813	0,0046
5,1	20,4282	181,81	5,500	0,782	0,0043
5,2	21,2372	189,01	5,291	0,750	0,00397
5,3	22,0618	196,35	5,093	0,724	0,00360
5,4	22,9022	203,83	4,917	0,697	0,00343
5,5	23,7583	211,45	4,729	0,672	0,00308
5,6	24,6301	219,21	4,562	0,648	0,00296
5,7	25,5176	227,11	4,403	0,626	0,00276
5,8	26,4208	235,14	4,253	0,604	0,00257
5,9	27,3397	243,32	4,110	0,584	0,00240
6,0	28,2743	251,64	3,974	0,565	0,00224
6,1	29,2247	260,10	3,845	0,546	0,00210
6,2	30,1907	268,70	3,722	0,529	0,00197
6,3	31,1725	277,43	3,605	0,512	0,00184
6,4	32,1699	286,31	3,493	0,496	0,00175
6,5	33,1831	295,33	3,386	0,481	0,00163
6,6	34,2120	304,49	3,284	0,466	0,00153
6,7	35,2565	313,78	3,187	0,453	0,00144
6,8	36,3168	323,22	3,087	0,439	0,00136
6,9	37,3930	332,80	3,000	0,427	0,00128
7,0	38,4845	342,51	2,920	0,415	0,00121
7,1	39,5928	352,37	2,838	0,403	0,00115
7,2	40,7150	362,36	2,760	0,392	0,00108
7,3	41,8539	372,50	2,685	0,381	0,00103
7,4	43,0085	382,70	2,613	0,371	0,00096
7,5	44,1786	393,19	2,545	0,361	0,00091
7,6	45,3646	403,74	2,477	0,352	0,00087
7,7	46,5663	414,44	2,413	0,343	0,00082
7,8	47,7836	425,27	2,351	0,334	0,00078
7,9	49,0167	436,25	2,290	0,325	0,00074
8,0	50,2655	447,36	2,235	0,317	0,00071
8,1	51,5300	458,62	2,181	0,310	0,00067
8,2	52,8102	470,01	2,128	0,302	0,00064
8,3	54,1061	481,54	2,077	0,295	0,00061
8,4	55,4177	493,22	2,028	0,288	0,00058
8,5	56,7450	505,03	1,980	0,281	0,00055
8,6	58,0881	516,98	1,934	0,275	0,00053
8,7	59,4468	529,08	1,890	0,268	0,00050
8,8	60,8212	541,31	1,847	0,262	0,00048
8,9	62,2114	553,67	1,806	0,256	0,00046
9,0	63,6173	566,19	1,766	0,251	0,00044
9,1	65,0388	578,85	1,728	0,245	0,00042
9,2	66,4761	591,64	1,690	0,240	0,00040
9,3	67,9291	604,57	1,654	0,235	0,00039
9,4	69,3978	617,64	1,619	0,230	0,00037
9,5	70,8822	630,85	1,585	0,225	0,00035
9,6	72,3823	644,20	1,552	0,220	0,00034
9,7	73,8981	657,69	1,521	0,216	0,00032
9,8	75,4297	671,32	1,490	0,211	0,00031
9,9	76,9769	685,09	1,460	0,207	0,00030
10,0	78,5398	699,00	1,431	0,203	0,00029

l'emboutissage ; il sert pour les pièces découpées ou décolletées ; il est aussi laminé en plaques minces pour lames de balais, car il est plus facile à écrouir.

Le laiton fondu contient des impuretés, car il provient le plus souvent, de la refonte de vieux métaux.

Le tableau ci-dessous donne la composition de ces différents laitons et leur résistivité.

TYPE	Cuivre	Zinc	Etain	Plomb	Fer	Impuretés	RÉSISTIVITÉ (ohms x mm ² /m) à 15° C
Laiton français 1 ^{er} titre.	66	34					0,055
Laiton français 2 ^e titre .	60	40					0,085
Laiton fondu	75	22,5	2			0,5	0,083
Laiton fondu	68	28	1,2	1,5	0,3	1	0,084

BRONZES

Les bronzes sont des alliages très anciennement connus ; ils sont composés de cuivre et d'étain auquel on ajoute d'autres corps en petite quantité pour obtenir des propriétés nettement déterminées. La couleur, rouge comme celle du cuivre jusqu'à 5 pour 100 d'étain, devient jaune d'or, puis jaune clair ; elle passe ensuite au blanc (45 pour 100), au gris bleu puis au gris d'étain.

Les propriétés mécaniques sont très variables d'une composition à l'autre. La dureté, et à un degré moindre la ténacité et la ductilité, sont sous la dépendance des transformations à l'état solide. La charge de rupture et l'allongement ne sont que peu accrus par la trempe dans les alliages riches en cuivre, mais pour une teneur inférieure à 8 pour 100 d'étain, l'augmentation devient très nette dès que la température de trempe dépasse 500° C. La charge de rupture dépend assez peu de la composition de l'alliage, tandis que le maximum d'allongement est modifié par la teneur en étain.

La maléabilité est toujours plus faible que celle du cuivre ; elle dépend surtout des conditions dans lesquelles a été opérée la composition. Pour une teneur de 13 pour 100 en étain, le travail à froid est impossible. Par contre, la trempe permet le travail : elle produit un adoucissement, contrairement à ce qui se passe pour les aciers.

Dans les laitons et les bronzes, la résistivité varie relativement peu jusqu'à 40° C. environ, soit 3 à 4 pour 100. Entre 40 et 100°, la variation est plus rapide et atteint 10 à 15 pour 100. On admet que la résistivité moyenne d'un bronze ordinaire est de 0,015 ohm x millimètre carré par mètre environ. Plus le bronze est dur, plus sa teneur



ULTIMHEAT VIRTUAL MUSEUM
 Etain, nickel, phosphore ou silicium augmente, plus sa résistivité augmente; la résistivité croît même plus que proportionnellement à cette teneur.

Voici quelques chiffres concernant les bronzes :

DESIGNATION	Cuivre	Etain	Zinc	Plomb	Phosphore	Silicium	Résistivité $\Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$	Résistance à la rupture (kg/mm^2)
Bronze mécanique dur .	90	10						50
Bronze mécanique type marine	88	12						60
Bronze à coussinets or- dinaire	86	10	4					35
Bronze usuel (1 ^{er} type).	88,5	6	4	1,3			0,0165	45
Bronze usuel (2 ^e type)..	80,5	13	6				0,0180	56
Bronze phosphoreux ..	92	2			5,6		0,04	66
Bronze siliceux tél.	85	8	2		0,8	4	0,036	75

Bronze siliceux télégraphique.

Ce métal, qu'on appelle encore *cuivre dur*, doit sa dureté uniquement à l'érouissage qu'il aura subi. Il doit être exempt de tout alliage.

On admet, par rapport à la résistivité du cuivre-type, définie dans la publication C 19 de l'U.T.S.E., une tolérance de 4 pour 100 pour les fils de diamètre égal ou supérieur à 0,10 millimètre, et de 6 pour 100 pour les fils de diamètre inférieur à 0,10 millimètre.

La résistance à la rupture par traction et l'allongement après rupture, mesuré sur une longueur de 200 millimètres entre repères, doivent satisfaire aux conditions suivantes :

Diamètre des Fils (mm)	Résistance à la rupture (kg/mm^2)	Allongement minimum (%)	Allongement maximum (%)
de 0,10 à 1,00	46	—	—
de 1,05 à 1,50	45	0,8	2
de 1,60 à 2,00	44,5	0,8	2,5
de 2,10 à 2,50	44	1	2,5
de 2,60 à 3,00	43	1	2,5
de 3,10 à 3,50	42	1	2,5
de 3,60 à 4,00	41	1	2,5
de 4,20 à 4,50	40	1,5	3,5
de 4,60 à 5,00	38,5	1,5	4
de 5,20 à 7,00	37	1,5	4,5



Les fils, à l'état de livraison, doivent supporter les pliages suivants (publication C 19, U.T.S.E.) :

Diamètre des Fils (mm)	Nombre de pliages	Rayon de l'arrondi (mm)
de 1,05 à 1,15	16	6
de 1,20 à 1,25	15	6
de 1,30 à 1,35	14	6
1,40	13	6
1,50	12	6
1,60	11	6
1,70	10	6
1,80	8	6
de 1,90 à 2,00	6	6
de 2,10 à 2,50	5	6
de 2,60 à 3,00	7	10
de 3,10 à 3,50	6	10
de 3,60 à 4,00	5	10
de 4,20 à 4,50	4	10
de 4,60 à 5,00	4	10
de 5,20 à 7,00	4	20

Bronze téléphonique.

C'est un bronze siliceux dont les caractéristiques générales sont les suivantes :

Poids spécifique	8,89
Résistivité à 20° C	2,46 $\mu \Omega \times \text{cm}^2/\text{cm}$
Conductibilité à 20° C (par rapport au cuivre type recuit).	70 %
Coefficient de température	0,002
Résistance à la rupture	50 à 70 kg/mm ²
Limite d'élasticité	45 à 65 kg/mm ²
Allongement	2,5 à 1 %

Le tableau suivant donne les caractéristiques des conducteurs en bronze utilisés dans certaines canalisations téléphoniques :

CARACTERISTIQUES DES FILS DE BRONZE

Diamètre (mm)	Section (mm ²)	Poids (kg/km)	Résistance à 20° C (Ω/km)	Résistance à 20° par kilog (Ω/kg)	Résistance à la rupture (kg/mm ²)	Limite d'élasticité (kg/mm ²)	Allongement moyen (%)
0,90	0,6362	5,6555	38,698	6,840	70	65,5	1
1	0,7854	6,9822	31,347	4,488	70	65,5	1
1,10	0,9503	8,4481	25,908	3,064	67	61	1
1,20	1,1310	10,054	21,768	2,164	67	61	1
1,30	1,3273	11,800	18,548	1,570	67	61	1
1,40	1,5394	13,685	15,993	1,167	67	61	1
1,50	1,7672	15,710	13,932	0,886	67	61	1
1,60	2,0106	17,874	12,245	0,684	63	57	1,5
1,80	2,5447	22,622	9,675	0,427	63	57	1,5
2	3,1416	27,929	7,837	0,280	63	57	1,5
2,20	3,8013	33,793	6,477	0,192	60	54	1,5
2,40	4,5239	40,217	5,443	0,135	60	54	1,5
2,60	5,3093	47,200	4,638	0,0981	57	51	1,5
2,80	6,1575	54,740	3,998	0,0729	57	51	1,5
3	7,0686	62,840	3,483	0,0553	57	51	1,5
3,20	8,0425	71,498	3,031	0,0427	54	48	2
3,50	9,6212	85,532	2,559	0,0298	54	48	2
3,80	11,341	100,82	2,171	0,0214	52	47	2
4	12,566	111,71	1,960	0,0175	52	47	2
4,20	13,854	123,16	1,776	0,0144	50	45	2,5
4,50	15,904	141,30	1,548	0,0109	50	45	2,5
4,80	18,096	160,87	1,360	0,00845	50	45	2,5
5	19,635	174,55	1,254	0,00718	50	45	2,5
5,50	23,758	211,21	1,036	0,00490	50	45	2,5
6	28,274	251,35	0,870	0,00345	50	45	2,5
6,50	33,183	294,99	0,742	0,00250	50	45	2,5
7	38,485	342,13	0,639	0,00183	50	45	2,5
7,50	44,179	392,75	0,557	0,00142	50	45	2,5
8	50,266	446,86	0,490	0,00109	50	45	2,5
8,50	56,745	504,46	0,434	0,000859	50	45	2,5
9	63,617	565,55	0,387	0,000684	50	45	2,5
9,50	70,882	630,16	0,347	0,000550	50	45	2,5
10	78,540	698,22	0,313	0,000448	50	45	2,5



Bronze phosphoreux.

Ce bronze peut être laminé et étiré à froid ; on peut aussi le forger. Il est surtout employé dans la construction de l'appareillage et dans les coussinets de machines. On utilise alors la composition suivante :

	Cuivre	Etain	Phosphore
1)	90,34	8,90	0,76
2)	90,86	8,94	0,20

Par l'addition d'une petite quantité de fer ou de manganèse, il est possible d'obtenir un alliage très résistant mécaniquement (pièces de contact supportant un gros effort). La charge de rupture du bronze phosphoreux peut atteindre 66 kilogrammes par millimètre carré pour un allongement de 19 pour 100.

BRONZE AU GLUCINIUM.

Le bronze au glucinium est un alliage cuivre-glucinium à 2,3 pour 100 de glucinium. Les applications de ce bronze utilisent ses qualités d'élasticité, de dureté, et sa conductibilité très supérieure à celle des bronzes phosphoreux. Il se comporte comme un métal ayant en même temps certaines des qualités de l'acier et des alliages cuivreux. Son revenu permet d'obtenir, suivant la température à laquelle il est effectué, une gamme de métaux ayant des propriétés intermédiaires entre l'état mou de trempe et l'état dur maximum, ainsi que l'indique le tableau ci-dessous.

Etat du métal	Formation	Dureté Brinell	Résistance à la traction (kg/mm ²)	Limite d'élasticité	Allon- gement (%)	Module d'élasticité
Trempe à 750°	Laminé	85	47,5	24,7	53	12 550
	Moulé en coquille	90	30	15	10	
Trempe puis revenu 4 heures à 320° C ± 10	Laminé	352	122	118	0,5	13 450
	Moulé en coquille	370	82	75	0,5	

On voit par ce tableau que les caractéristiques mécaniques ne varient pas parallèlement lorsque la température est modifiée.

Les hautes caractéristiques du bronze au glucinium permettent de réduire la section des pièces en diminuant le poids de métal. En



bande laminée, il est utilisé pour la fabrication de lames de contact, griffes de contact, ressorts de porte-balais...

Grâce à sa faible oxydabilité à chaud, il tient remarquablement à l'arc et est, à ce point de vue, bien supérieur au cuivre ; d'où son emploi dans l'appareillage électrique (pièces de contact).

Sa résistance à l'oxydation permet de l'utiliser comme pannes de fer à souder à chauffage électrique ; elles durent plus longtemps que celles en cuivre et la production de crasses est évitée. Il remplace avantageusement, dans l'industrie des compteurs, les pièces artificielles trop fragiles, pour constituer les crapaudines ; on porte alors la teneur de glucinium à 6 à 10 pour 100.

L'effet du glucinium sur la conductivité du cuivre et l'influence du traitement thermique sont mis en évidence par le tableau ci-dessous, la conductivité du cuivre standard étant prise égale à 100 pour 100.

Addition de glucinium (%)	Conductivité par rapport au cuivre après		
	Recuit à l'air de 1 h. à 800° C	Ecroûissage	Recuit dans l'hydrogène de 1 h. à 800° C
0	100	97	92,5
0,011	98	95,5	97
0,02	96,5	93,5	95,5
0,04	93	90	92
0,06	89,5	85	88,5
0,08	86	83,5	85

Le tableau suivant donne la comparaison entre le bronze phosphoreux et le bronze au glucinium.

	Bronze phosphoreux	Bronze au glucinium
Ténacité (kg/mm ²)	66,5	133
Limite de fatigue (kg/mm ²)	18,9	28
Conductivité	7 à 10 %	30 %

MAILLECHORTS

On désigne sous cette appellation toute une catégorie de bronzes à grande résistivité et à faible coefficient de température. Les maillechorts sont des alliages ternaires de cuivre, de nickel et de zinc. Ils ont une teneur en nickel allant de 5 à 6 pour 100 jusqu'à près de 30 pour 100. La zone hachurée a, b, c, d, sur le diagramme de la fig. 21, représente les compositions des maillechorts ; les doubles hachures correspondent aux alliages les plus répandus.

La composition des maillechorts varie donc sensiblement ainsi

Cuivre.....	52 à 67 %	plus fréquemment	57 à 64 %
Nickel	6 à 28 %	—	13 à 21 %
Zinc	13 à 35 %	—	13 à 23 %

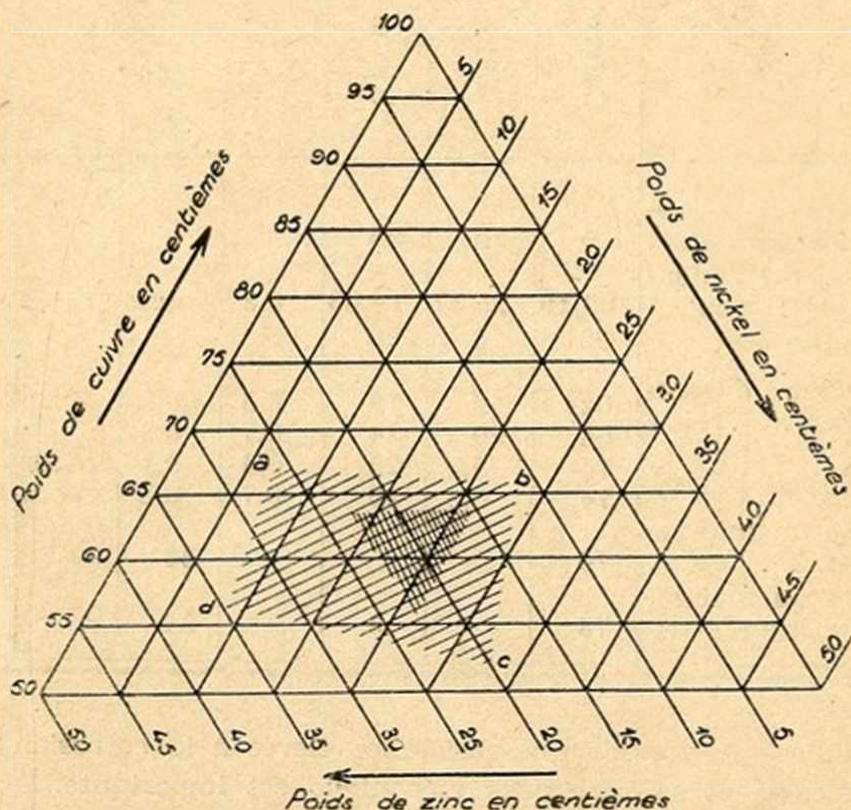


Fig. 21. — Composition normale des maillechorts.

Le tableau ci-après donne la composition des principaux maillechort ayant des emplois déterminés en électrotechnique.

La principale difficulté d'élaboration des maillechorts se trouve dans la fusion. Les conditions essentielles sont : une fusion rapide, un maintien très bref du métal fondu au contact de l'atmosphère du four, qui doit être oxydante plutôt que réductrice, une absence complète de carburation et de sulfuration.

Les fours électriques à haute et surtout à moyenne fréquence, remplissent le mieux ces conditions. Les risques de surchauffe, l'alliage étant mauvais conducteur de la chaleur, font préférer des creusets de petite taille, d'une capacité correspondant à une charge de 40 kilogrammes environ.

La température de coulée dépend de la dimension des lingots, de leur forme et du mode de coulée ; elle augmente avec la teneur en nickel, diminue avec celle du zinc et est indépendante de celle du cuivre. La coulée doit être rapide.

Le maillechort est un alliage à écrouissage rapide, très « coriace ».

et demande par suite, des précautions spéciales pour les déformations
 ULTIMHEAT[®] Ltd. Le décapage électrolytique donne de meilleurs résultats qu'un
 VIRTUAL MUSEUM traitement chimique.

TYPE	Cuivre	Zinc	Nickel	Fer	Manganèse	Cobalt	Etain
Maillechort première formule .	60	15	25				
Maillechort deuxième formule .	60,10	25,37	14,03	0,36	traces	traces	
Argentan	62	18	20				
Nickeline d'Obermaier	62	19	18	0,3	0,2	0,2	
	54	20	24	0,7	0,3		
Cuivre au nickel.	74	0,2	25	0,4	0,1	traces	
	74	0,5	20	0,7	0,3	traces	traces
Cuivre au manganèse.	70				30		
Cuivre au manganèse et au nickel	73		3		24		

Le maillechort possède une résistance élevée à la corrosion ; il est très malléable et sa résistance mécanique est importante.

Le tableau ci-dessous montre l'influence, sur les propriétés mécaniques, de l'écrouissage suivi de recuit pour un maillechort à 57,24 pour 100 de cuivre et 16,92 pour 100 de nickel.

	Ecroui 40 %	Recuit 700° C	Recuit 800° C	Recuit 900°
Résistance à la traction (kg/mm ²)	62,4	46,3	41,0	40,6
Limite d'élasticité (kg/mm ²)		20,3	17,1	16,6
Allongement (en %)	3,4	44,8	51,9	52,1
Résistance au cisaillement (kg/mm ²)	38,7	30,4	28,7	28,3
Résilience (kg/mm ²)	3,6	13,7	13,7	13,7

La résistivité des maillechorts augmente avec la teneur en nickel et présente une anomalie aux températures comprises entre 300° et 500° C. Elle passe par un maximum pour des chauffages aux valeurs limites 300° et 500° C.



L'emploi de métaux purs améliore beaucoup l'alliage. Les alliages à 7 pour 100 de nickel sont jaunâtres, à 15 pour 100 et plus ils sont blancs.

La figure 22 donne la variation des propriétés mécaniques des maillechorts en fonction de la teneur en nickel. On voit que la résistance augmente régulièrement avec cette teneur, tandis que l'allongement diminue.

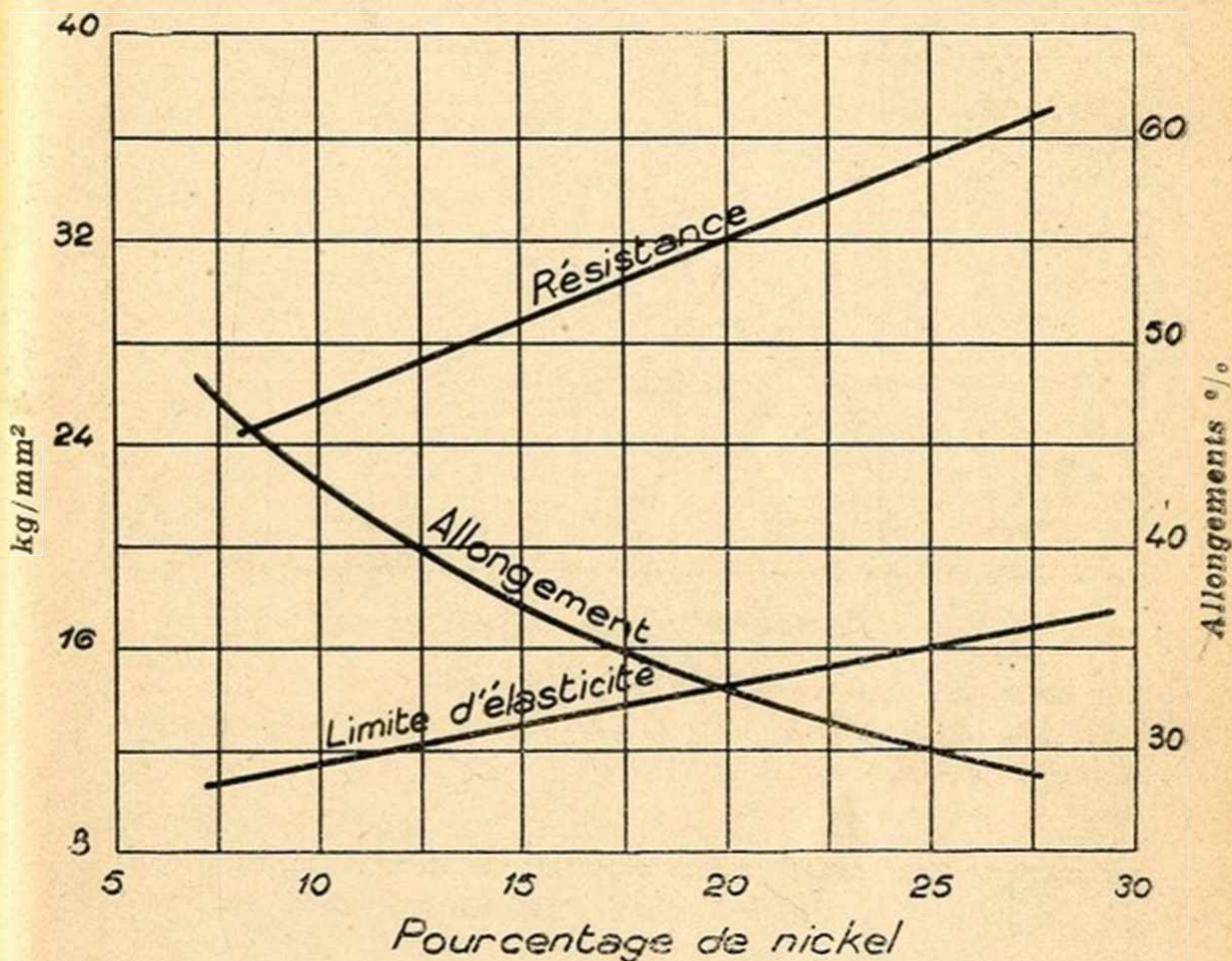


Fig. 22. — Variation des propriétés mécaniques des maillechorts avec la teneur en nickel.

La résistivité électrique des maillechorts varie de 18 à 40 microhms \times centimètre carré par centimètre lorsque le nickel passe de 7 à 3 pour 100, tandis que le coefficient de température des alliages à 20-30 pour 100 est de 0,000 2 à 0,000 3.

Lorsque le métal est pur, la résistivité du maillechort est fonction de la teneur en nickel; une augmentation de 1 pour 100 de nickel donne une augmentation de 1,05 microhm. La variation de la proportion cuivre-zinc a peu d'importance.



MANGANIN.

Manganin est un alliage du genre maillechort comprenant 85 parties de cuivre, 12 de manganèse et 2 de nickel.

Après 10 heures de vieillissement artificiel à 140° C et une non

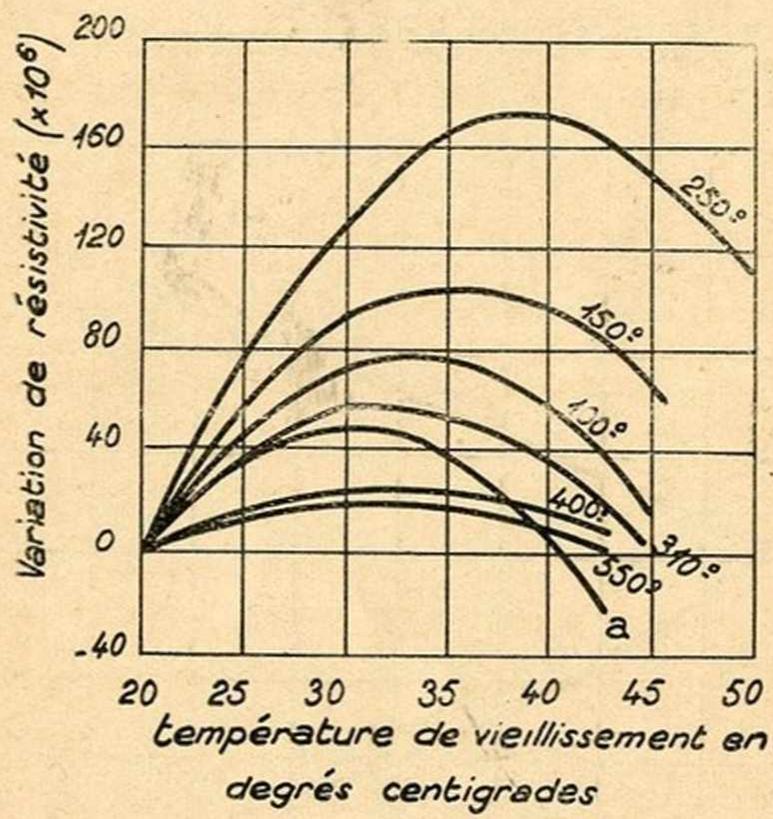


Fig. 23. — Variation de la résistivité du manganèse en fonction de la température de vieillissement.

utilisation de plusieurs mois à la température ordinaire, il acquiert une constance de résistivité aux variations de température qui suffit aux besoins de la pratique. Aux températures ordinaires, son coefficient de température se maintient entre 1×10^{-6} et 2×10^{-6} .

On a pu obtenir des alliages ayant un coefficient encore plus faible ; c'est le cas du manganin 85 parties de cuivre, 9,5 de manganèse et 5,5 d'aluminium. Quand il a été convenablement traité, il a une résistance particulièrement stable, avec un coefficient de résistivité très faible en fonction de la température et un couple plus petit, au contact du cuivre, que le manganin-type.

Il a été possible d'améliorer le manganin en le recuisant, en particulier sous forme de fils, à 500 et même 550°. Le vieillissement a pour effet de supprimer l'action de l'érouissage et d'obtenir une homogénéité du métal. Ce vieillissement doit s'opérer vers 375 ou 400° C, dans une atmosphère neutre sous pression et il doit être suivi d'un refroidissement lent, puis, naturellement d'un décapage.

La rapidité du revenu agit sur la valeur de la résistivité. La varia-



tion de celle-ci augmente rapidement avec la température de vieillissement, devient stable puis diminue à nouveau pour reprendre sa valeur initiale, ainsi que le montre la figure 23, établie pour cinq échantillons de manganin écrouis différemment par un travail à froid plus ou moins poussé.

ALLIAGE CADMIUM-CUIVRE POUR LE TRANSPORT DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

L'adjonction d'une faible quantité de cadmium (moins de 1 %) rend le fil de cuivre beaucoup plus solide sans réduire d'une manière notable sa conductibilité. Il en résulte des avantages intéressants pour les applications particulièrement délicates en ce qui concerne les lignes d'énergie : grandes portées, traversées de cours d'eau et de vallées... Cet alliage est utilisé par le « General Post Office » anglais, pour les lignes aériennes télégraphiques et téléphoniques et dans certaines lignes de traction à réseau aérien à trolley.

Composition et caractéristiques des alliages cuivre-cadmium.

On dépasse rarement 8 pour 1 000 pour les besoins industriels; l'alliage ainsi obtenu présente une résistance à la traction accrue de

Section équivalente de cuivre (mm ²)	PORTEE (m)	Flèche maximum à 50° C (m)		Flèche minimum à - 5° C (m)		Variation de la flèche (m)	
		Cupro- cadmium	Alumin.- acier	Cupro- cadmium	Alumin.- acier	Cupro- cadmium	Alumin.- acier
		16	91,5	1,06	2,14	0,55	1,25
32	152,5	2,50	3,80	1,55	2,62	0,95	1,19
48	183	3,18	4,35	2,04	2,87	1,13	1,50
64	244	4,90	5,55	3,54	3,72	1,34	1,83
80	244	4,52	4,28	3,24	2,56	1,28	1,70



50 pour 100, avec une conductibilité qui n'est réduite que de 15 environ, par rapport au cuivre pur.

Image type, conforme à la spécification normale n° 672 de la « British Standard Specification » doit avoir une conductibilité égale à 83 pour 100 de celle du cuivre pur; sa résistance à la traction doit être comprise entre 33 et 44 kilogrammes par millimètre carré.

Comparés aux fils bimétal, les fils en cupro-cadmium, parfaitement homogènes, possèdent les mêmes qualités électriques et mécaniques dans toute leur section; les variations de température ne risquent pas de créer des efforts mécaniques internes. De plus, tout danger d'effets électrochimiques à l'intérieur du conducteur cupro-cadmium se trouve éliminé.

Si l'on compare un tel fil au fil en aluminium avec âme en acier, on constate que, pour les types de même conductance, le cupro-cadmium a une résistance à la traction plus élevée, et, bien que plus lourd par lui-même, il est plus léger lorsqu'on tient compte de la pression due au vent et au givre.

Le tableau précédent permet de comparer la valeur des flèches de quelques fils de dimensions courantes, en cupro-cadmium et en aluminium-acier.

ALLIAGES SPECIAUX

MIS SUR LE MARCHÉ AUX ETATS-UNIS, 1935

1°) Alliage de cuivre, zinc et silicium (Doller-Brass).

Il possède une teinte jaune clair et ses caractéristiques mécaniques sont :

Résistance à la rupture	28 kg/mm ²
Allongement	20 à 25 %
Dureté Brinell	110 à 120
Résistance au choc	4,2 à 5 kgm

Il convient parfaitement pour la coulée sous pression des pièces d'appareillage électrique.

2°) Alliage Kanthal.

Il a été créé pour résistances électriques et présente, sur les alliages nickel-chrome, les avantages d'une plus longue durée, d'un moindre prix de revient et d'une limite de température d'emploi plus élevée.

Densité : 10 à 15 pour 100 plus faible que les nickel-chrome.

Résistivité : 35 à 40 pour 100 plus élevée que les nickel-chrome.

Il n'est pas attaqué par les sulfures. Il en existe deux qualités :

Kanthal A₁ pour températures jusqu'à 1 350° C.

Kanthal D pour températures basses jusqu'à 620° C.



COBALT

Le cobalt appartient au même groupe de métaux que le nickel, le fer et le chrome.

Les principaux minerais de cobalt sont :

— la *smaltine*, arséniure de cobalt contenant un peu de fer et de nickel.

— la *cobaltine*, sulfo-arséniure de fer et de cobalt.

— l'*absolane*, minerai oxydé de fer et de manganèse.

Des gisements de cobalt existent au Canada, en Birmanie, au Katanga, au Maroc français. Ces derniers, situés à Bou-Azzer, dans l'Anti-Atlas, à 180 kilomètres au sud de Marrakech donnent une smaltine dont l'analyse est la suivante (Jean Orcel et G. Jouravsky).

Cobalt	12,82 %
Nickel	3,96 %
Fer	5,34 %
Arsenic	74,02 %
Soufre	1,94 %

Le cobalt métallique s'obtient en transformant le minerai, par un traitement chimique approprié, en oxyde de cobalt qui est ensuite réduit par le charbon. Le cobalt très pur est obtenu par l'électrolyse d'une solution de sulfate ammoniacal de cobalt.

PROPRIETES PHYSIQUES.

Poids atomique	59
Densité	8,8
Point de fusion	1 530° C
Point de Curie	1 150° C

Ce métal cristallise normalement sous la forme cubique ou variété α ; au-dessus de 400° C il prend la forme hexagonale ou variété β . moins malléable que la première.

PROPRIETES MECANIQUES.

Résistance à la traction	50 kg/mm ²
Module d'élasticité	20 380 kg/mm ²
Résistance à la compression	86 kg/mm ²

PROPRIETES CHIMIQUES.

Le cobalt ne s'altère pas pratiquement à l'air à la température ordinaire ; il s'oxyde à partir de 300° C et son oxydation est un peu supérieure à celle du nickel.



Les acides étendus le dissolvent lentement ; la soude caustique l'attaque au rouge et la solution ammoniacale le dissout en présence de l'air.

PROPRIETES ELECTRIQUES.

Résistance électrique (à l'état recuit) : $8,96 \mu \Omega \times \text{cm}^2/\text{cm}$.

DEPOSITION ELECTROLYTIQUE.

La valeur du cobalt, en tant que couche protectrice, est très élevée et permettrait de réduire les épaisseurs de recouvrement dans le rapport de 1 à 4 vis-à-vis du nickel. Les dépôts électrolytiques de cobalt sont cependant peu développés, car ce métal coûte cher et il est concurrencé par le chrome.

Les meilleures formules de bains de cobaltage sont les suivantes (Kalmus).

- A) Sulfate double de cobalt et d'ammoniaque..... 200 g.
- Eau 1 000 g.
- B) Sulfate de cobalt. 300 g.
- Chlorure de sodium 200 g.
- Eau 1 000 g.
- Acide borique saturation

Le rendement cathodique des bains est élevé ; ils permettent l'emploi de fortes densités de courant.

ALLIAGES DE COBALT

ALLIAGES FER-COBALT.

L'intervalle de solidification dans les alliages fer-cobalt est très étroit. Le point de Curie du fer est amélioré par l'addition de cobalt ; par contre, celui du cobalt est abaissé par la présence du fer.

Un acier au carbone à 0,8 pour 100 reste perlitique avec 30 pour 100 de cobalt. Une addition de cobalt accroît la charge de rupture :

Teneur en carbone (en %)	Teneur en cobalt (en %)	Résistance de rupture (kg/mm ²)
0,25	5,12	46,7
0,28	15	66

Au point de vue de la cémentation, le cobalt diminue le taux de carbone de la couche cémentée.

Le cobalt incorporé à l'acier se comporte comme un antagoniste de trempe. Il en résulte une diminution de l'épaisseur de trempe pour des aciers à faible teneur et une augmentation de l'hétérogénéité pour les aciers à haute teneur.

On obtient des ferro-cobalts qui, additionnés de chrome présentent



un très faible coefficient de dilatation. L'alliage dénommé *Stainless-Invar* par Masumoto est formé de 54 pour 100 de cobalt, 36,5 pour 100 de fer, 9,5 pour 100 de chrome ; son coefficient de dilatation est $1,1 \times 10^{-7}$ soit 12 fois moindre que celui de l'invar classique. On peut même, avec certaines compositions d'alliage, obtenir un coefficient de dilatation négatif.

ALLIAGES FER-NICKEL-COBALT.

Certains ferro-nickels additionnés de cobalt présentent une stabilité chimique intéressante. Tel est l'alliage *Hastelloy A* qui répond à la composition suivante :

Nickel	56 %
Fer	22 %
Cobalt	19,5 %
Manganèse	2,5 %

Cet alliage ductile peut être coulé, forgé, laminé, soudé ; son usinage est facile. Il résiste bien à l'acide chlorhydrique concentré à 18-22° B.

ALLIAGES DIVERS.

On constitue également de nombreux alliages de cobalt avec des matériaux non ferreux.

a) **Cobalt-nickel.** — Le cobalt est sensible, dans sa fusion, à l'oxydation et surtout au soufre ; le remède consiste dans l'addition désoxydante de manganèse et de magnésium. Cet alliage est utilisé pour l'établissement de fours à induction autorégulateurs à des températures de l'ordre de 1 000 degrés.

b) **Cobalt-chrome.** — Le chrome abaisse très rapidement la transformation magnétique du cobalt. A partir de 16 pour 100 de chrome, l'alliage est amagnétique à la température ordinaire. Les principaux alliages de ce type sont connus sous le nom de *stellites*.

(Voir matériaux magnétiques).

c) **Cobalt-silicium.**

d) **Cobalt-glucinium.** — L'alliage à 4 pour 100 de glucinium permet d'obtenir, par trempe à l'eau à 1 150° et revenu de quelques heures à 400°, une dureté 5 fois plus grande que celle du cobalt, soit 660 kilogrammes par millimètre carré.

e) **Cuivre-glucinium-cobalt.** — Le cuivre, allié à 2,5 pour 100 de glucinium donne une charge de rupture élevée, mais la résistance électrique du cuivre est fortement accrue. Une légère addition de cobalt permet d'accroître la conductibilité de 50 pour 100. Cet alliage est très utilisé pour la confection des électrodes de soudeuses électriques.

(Voir renseignements complémentaires dans le paragraphe consacré au glucinium).

GLUCINIUM



Le glucinium ou béryllium est tiré de minerais dont le seul exploitable est le béryl, silicate double d'aluminium et de glucinium, qui comprend environ 12 pour 100 de glucine. Le béryl se rencontre dans les schistes micacés, en France (dans le Limousin et l'Autunois), en Russie d'Asie, au Canada, aux Etats-Unis, au Brésil, Colombie et Argentine, mais surtout à Madagascar.

Le glucinium pur n'a pas reçu jusqu'ici d'applications pratiques et c'est surtout sous forme d'alliages qu'il est utilisé. Ses propriétés propres sont les suivantes :

PROPRIETES PHYSIQUES.

Poids atomique	9,2
Densité	1,84
Dureté Brinell	162 à 700
—	77 à 1 200
Module d'élasticité	30 000 kg/mm ²
Point de fusion	1 278° C
Point d'ébullition	1 900° C

PROPRIETES CHIMIQUES.

Grande affinité pour l'oxygène.

Chaleur de formation de l'oxyde : 136 calories/kg.

Réduit la plupart des oxydes et sels oxygénés ; à l'air il se recouvre, par oxydation, d'une mince pellicule protectrice. Il ne se combine pas à l'hydrogène et brûle dans le chlore, le brome et l'iode. Il se combine à l'azote à 500° C, au soufre, au tellure, au sélénium, à l'arsenic fondu, et, avec incandescence, au phosphore gazeux.

Attaqué à froid par les acides minéraux forts, à l'exception de l'acide nitrique concentré, le glucinium se dissout également dans les solutions alcalines caustiques.

Il ne s'allie ni au mercure, ni au magnésium ; par contre, il s'allie en toutes proportions au cuivre, à l'aluminium, au fer et au nickel.

La glucine, très réfractaire et moins basique que la magnésie peut être employée à la fabrication des creusets. En solution aqueuse, le perchlorate de glucinium dissout la cellulose et les fibres cellulosiques.

ALLIAGES DE GLUCINIUM.

Les alliages avec les métaux légers, magnésium et aluminium n'ont pas donné, jusqu'ici de résultats probants.

Cuivre-glucinium.

Improprement appelées *bronzes de glucinium*, ces alliages dont la teneur en glucinium est faible, n'entraînent pas une augmentation



de prix importante ; d'autre part, un traitement thermique simple permet d'adoucir ces alliages et de leur communiquer les propriétés mécaniques maxima. Les alliages les plus fréquemment employés titrent 2,3 pour 100 environ de glucinium (voir chapitre : Bronzes).

Les bronzes de glucinium se rapprochent des aciers par leurs propriétés mécaniques à l'état revenu, et des bronzes à l'étain par leur inaltérabilité, leur grande facilité d'usinage, leur conductibilité électrique et leurs réactions spéciales aux frottements.

Cuivre-glucinium-cobalt.

L'addition de cobalt aux alliages précédents permet d'abaisser la teneur en glucinium nécessaire pour obtenir des propriétés analogues, ce qui diminue le prix de revient.

En réalité, certaines propriétés des deux alliages, binaire et ternaire, ne sont pas absolument identiques : par exemple, au lieu d'une résistance de 84 à 126 kilogrammes par millimètre carré, on obtient 63 à 77 pour l'alliage au cobalt, mais sa conductibilité est sensiblement deux fois plus élevée.

Les nombres suivants donnent, à l'état traité, pour un alliage à 0,4 pour 100 de glucinium, 2,6 pour 100 de cobalt et 97 pour 100 de cuivre, connu sous le nom de *Trodaloy* :

Limite d'élasticité (en kg/mm ²)	31,5
Limite de rupture (en kg/mm ²)	63 à 70
Allongement (en %)	10 à 20
Dureté Rockwell	92 à 98
Conductibilité électrique	49 à 52

Le principal emploi de cet alliage est celui de la fabrication des électrodes de soudure par résistance où doivent être réunies une bonne conductivité, une grande résistance à la déformation et aux températures élevées.

MAGNÉSIUM

Le magnésium n'existe pas à l'état libre dans la nature, mais il est très abondant par ses composés. Les minéraux les plus importants exploités pour son extraction sont :

Le *périclase*, la *magnésite*, la *dolomie* ;

Des carbonates hydratés : la *carnallite*, la *tachydrile*, la *kainite*, la *schönite* ;

Divers silicates : *talc*, *écume de mer*, *amiante*...

ELABORATION DU METAL.

Sa préparation est assez difficile à cause de la tension de polarisation élevée de ce métal. Autrefois on extrayait d'abord la magnésie (oxyde de magnésium) des différents minerais puis on la réduisait au four électrique.



La résistivité et le coefficient de température diminuent très rapidement aux basses températures.

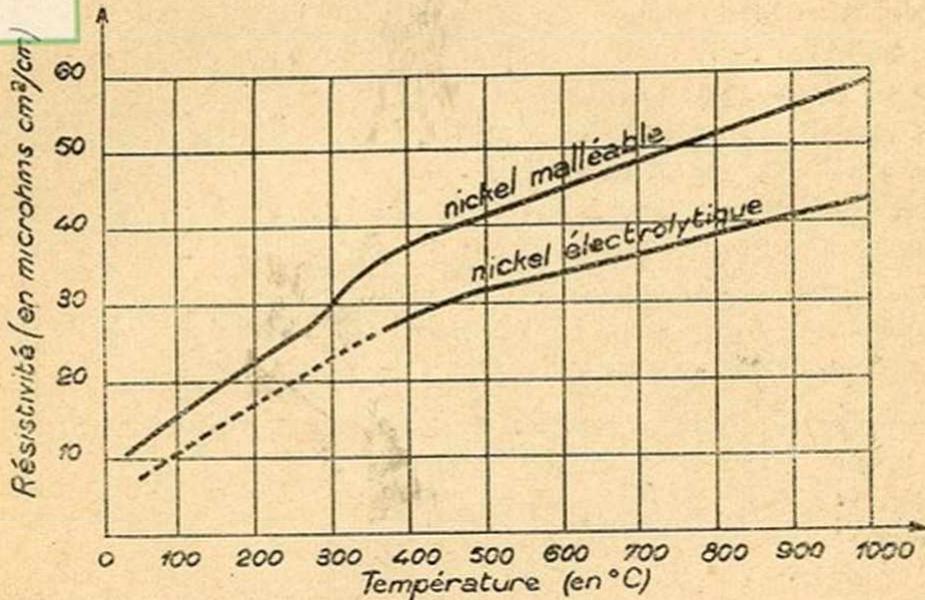


Fig. 34. — Variation de la résistivité du nickel avec la température.

ALLIAGES DE NICKEL

NICKEL-COBALT-FER.

Une addition de cobalt aux ferro-nickels du groupe de l'invar (voir alliages de fer) en abaisse la dilatabilité. Ces alliages, additionnés de titane sont utilisés, concurremment avec le platine et avec le tungstène, pour former des filaments recouverts de substances émissives de lampes radioélectriques. Outre leur prix très inférieur, ils offrent sur ces corps l'avantage d'être utilisables à une température plus basse (voir composition de l'Hastelloy aux alliages de cobalt).

CUPRO-NICKELS.

Ces alliages sont surtout utilisés pour leurs propriétés magnétiques. Leurs propriétés électriques sont fortement affectées par leur transformation magnétique. Au contraire, comme cette transformation a lieu sans changement de phase, elle agit peu sur les propriétés élastiques et mécaniques; les courbes de dureté et du module d'élasticité ont l'allure habituelle des corps composants.

L'alliage *Monel*, renfermant en moyenne 68 pour 100 de nickel, 28 pour 100 de cuivre, le surplus étant du fer, du manganèse et du silicium, laminé à chaud, possède des caractéristiques très intéressantes :

Ténacité	60-66	kg/mm ²
Limite d'élasticité.	27-33	kg/mm ²
Allongement à la rupture	40-50	%



Ce corps ne devient pas du tout fragile aux basses températures et conserve parfaitement ses propriétés mécaniques à chaud.

NICKEL-CHROME.

L'adjonction de chrome au nickel abaisse le point de Curie de ce dernier et en réduit les anomalies corrélatives de la transformation magnétique ; à partir de 3 pour 100 de chrome, les anomalies de la dilatation et de la résistivité sont à peine perceptibles. De plus, il y a accroissement de la résistivité, de la dureté, de la ténacité à froid et à chaud mais une faible action d'ensemble sur la densité, la chaleur spécifique, la dilatabilité et le module d'élasticité.

L'alliage *Pyros* est un alliage étalon utilisé par M. P. Chevenard pour établir des pyromètres à dilatation ; il comprend 6 pour 100 de chrome, du fer, du manganèse et du tungstène. Les alliages nickel-chrome, chauffés au contact de l'air, se recouvrent d'une couche protectrice d'oxyde, adhérente, solide et non fissible sous l'influence des chauffés et des refroidissements alternés, d'où leur emploi comme résistances de chauffage (voir page 168). Les nickel-chromes résistent aux atmosphères humides, aux alcalis et aux acides étendus, notamment à l'acide sulfurique.

FER-NICKEL-CHROME.

L'adjonction de fer aux nickel-chromes accroît leur résistance à l'oxydation et aux agents chimiques ; ces alliages ternaires sont plus faciles à élaborer et moins coûteux que les alliages précédents et, de ce fait, plus employés. Ces alliages sont des austénites, c'est-à-dire des solutions solides fer γ — nickel et chrome.

Dans les ferro-nickels chromés, nom qu'on donne généralement à l'alliage utilisé pour ses propriétés physiques, par opposition aux aciers au nickel-chrome dont on recherche les qualités magnétiques, le cobalt, le silicium, l'aluminium améliorent la résistance à l'oxydation produite par le chauffage à l'air ; le manganèse, le molybdène sont défavorables. En présence de fumées sulfureuses, les alliages riches en nickel sont peu avantageux et il est indiqué de remplacer une partie de ce métal par du manganèse.

Dans la série des ferro-nickels chromés utilisés dans l'industrie du feu, les teneurs en nickel vont de 8 à 80 pour 100 et les teneurs en chrome de 10 à 25 pour 100. Ces alliages doivent posséder en général des propriétés qui commandent la composition : ténacité à chaud, haute résistivité, dilatabilité donnée... Comme les nickel-chromes et ferro-nickels, les ferro-nickels chromés sont utilisés dans les fours pour traitements thermiques, les rhéostats, les résistances de chauffage...



Résistivité électrique et conductibilité calorifique des électrodes en carbone amorphe et en graphite.

CARBONE AMORPHE			GRAPHITE		
Température (°C)	ρ ($\mu\Omega$ $\times \text{cm}^2/\text{cm}$)	C (cal/s/cm ²)	Température (°C)	ρ ($\mu\Omega$ cm^2/cm)	C (cal/s/cm ²)
20	4 600	0,089	20	857	0,338
360	4 210	0,124	390	839	0,324
750	3 820	0,129	545	824	0,306
942	3 770	0,137	720	802	0,280
1 400	3 700	0,144	1 400	790	0,250

La variation de la résistivité, donnée ici à titre documentaire dépend de la composition des électrodes et de leur degré d'homogénéité, cette résistivité étant constituée non seulement de la résistivité proprement dite du carbone, mais aussi des résistances de contact entre grains constituants.

Voici, d'après Borchers, les densités de courant admissibles dans une électrode de section donnée, si l'on veut éviter une surcharge.

Diamètre (cm)	Section (cm ²)	Densité admissible (A/cm ²)
5	20	10
10	79	8
20	314	5
30	707	2,5 à 3,3
40	1 256	1,5 à 2

Ces valeurs peuvent être notablement accrues si les électrodes sont protégées par un garnissage.



LES ALLIAGES RÉSTISTANTS UTILISÉS EN CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE

QUALITES DES RESISTANCES CHAUFFANTES.

Un corps, pour être utilisé comme élément chauffant, doit posséder un certain nombre de qualités et satisfaire à des conditions déterminées, d'ordre physique, chimique et aussi économique.

a) *Résistivité* : elle doit être relativement élevée pour limiter l'intensité à une valeur convenable et réduire les dimensions du corps de chauffe.

b) *Coefficient de température* : il doit être faible, autant que possible positif et sensiblement constant dans un grand intervalle de température, dans les limites d'utilisation.

c) *Températures critiques* : la température de ramollissement et, a fortiori la température de fusion doivent être très supérieures à la température maximum que doit atteindre la matière, en service normal, afin d'éviter la destruction par fusion ou court-circuit.

d) *Résistance mécanique* : elle doit être suffisante, non seulement à la température normale de pose mais encore et surtout à la température de fonctionnement. La substance ne doit présenter aucune déformation sensible, même lorsqu'il se produit des variations plus ou moins rapides de température (dilatations et contractions successives). Les éléments de chauffage doivent résister aux chocs et aux vibrations.

e) La matière utilisée doit être *amagnétique, homogène*, toujours identique à elle-même, facile à travailler. Sa structure ne doit présenter aucune désagrégation jusqu'à la température d'utilisation. Son coefficient de dilatation doit être faible.

f) *Conductibilité thermique* : celle-ci doit être réduite afin d'éviter les pertes de chaleur aux extrémités et faciliter l'établissement des entrées et sorties de courant ; il doit en être de même de la capacité calorifique.

g) *Résistance aux agents extérieurs* : elle doit être aussi élevée que possible, en particulier à l'oxydation, aux gaz dégagés par les corps en traitement, à l'attaque des matériaux en contact...

h) *Longue durée de service.*

CLASSIFICATION DES RESISTANCES METALLIQUES

1°) Les **métaux communs** (fer, fonte, cuivre) encore utilisés dans certains cas pour les faibles températures.

2°) Les **alliages fer-nickel**, avec, éventuellement, adjonction de cuivre ou de chrome, destinés aux températures pouvant atteindre en général 500° C au maximum.

3°) Les **alliages nickel-chrome**, pour les températures atteignant 1 000 à 1 100° C.

4°) Les **alliages ternaires : fer-chrome-aluminium**, pour les températures de l'ordre de 1 000 à 1 300° C.

5°) Les **métaux précieux**, pour les températures élevées et uniquement pour de petites puissances.

Note. — Deux températures délimitent l'utilisation de ces diverses résistances : 500° et 1 000° C.

a) Jusqu'à 500°, on craint peu l'oxydation et l'on peut construire des moufles métalliques pour recevoir les résistances.

b) Au-dessus de cette température, il faut utiliser des produits réfractaires.

c) Au-dessus de 1 000°, il est préférable, à part quelques cas particuliers, d'utiliser des résistances chauffantes non métalliques.

ALLIAGES NICKEL-CHROME ET FER-NICKEL-CHROME.

Ces alliages sont obtenus au four électrique ; leur élaboration a lieu au four à induction à haute fréquence, leur traitement thermique au four à résistance.

On distingue :

A) **Alliages ternaires : fer-nickel-chrome.** — Ce sont des alliages à faible teneur pour lesquels la proportion des constituants peut être très variable : 30 à 60 pour 100 de nickel, 30 à 50 pour 100 de fer, 10 à 20 pour 100 de chrome et parfois du manganèse atteignant jusqu'à 2 pour 100.

Ils ne sont jamais utilisés au delà de 900° C, généralement pour des températures beaucoup plus basses.

B) **Alliages binaires : nickel-chrome.** — Ils ont une forte teneur en nickel : 80 pour 100, et en chrome : 20 pour 100 environ, auxquels on ajoute d'autres corps en faible quantité : manganèse, magnésium, silicium, carbone, fer, lesquels ont pour but de faciliter le laminage et le tréfilage. Leur limite d'emploi atteint 980 à 1 000° C.

Le tableau suivant donne les caractéristiques de quelques types de nickel-chromes, de constitution classique.



CARACTERISTIQUES DE QUELQUES TYPES DE NICKEL-CHROME, DE CONSTITUTION CLASSIQUE

Diamètre (mm)	Section (mm ²)	Poids par mètre (g)	Longueur par kil- gramme (m)	Résistance en ohms pour 100 m			
				0° C	300° C	600° C	1 000° C
Alliage : 35 Ni + 10 Cr + 55 Fe (température limite 700° C)							
0,10	0,007854	0,0632	15 822	12 700	14 240	15 310	
0,50	0,1963	1,5802	632	510	570	615	
1	0,7854	6,322	158	126	140	152	
1,5	1,7671	14,225	70,3	56,4	63,6	68,8	
2	3,1416	25,289	39,5	31,7	35,6	38,5	
2,5	4,9087	39,525	25,3	20,2	22,6	24,6	
3	7,0686	56,913	17,5	14	15,8	17,2	
4	12,5664	101,288	9,88	7,9	8,9	9,6	
5	19,6349	158,021	6,32	5,10	5,7	6,15	
Alliage : 60 Ni + 11 Cr + 29 Fe (température limite 1 000° C)							
0,10	0,007854	0,06479	15 069	14 130	14 830	15 368	15 760
0,50	0,1963	1,6194	603	565	594	615	631
1	0,7854	6,479	151	141	148	153	157
1,5	1,7671	14,578	67	62,8	65,9	68,3	70
2	3,1416	25,918	37,7	35,3	37,07	38,4	39,4
2,5	4,9087	40,507	24,1	22,6	23,7	24,6	25,2
3	7,0686	58,327	16,74	15,7	16,4	17	17,5
4	12,5664	103,70	9,42	8,82	9,26	9,5	9,85
5	19,6349	161,94	6,03	5,65	5,94	6,15	6,31
Alliage : 80 Ni + 18 Cr (température limite 1 100° C)							
0,10	0,007854	0,06636	15 434	12 987	13 398	13 643	13 916
0,50	0,1963	1,8591	617	519	536	546	553
1	0,7854	6,637	154,34	130	134	136	138
1,5	1,7671	14,932	68,63	57,7	59,5	60,6	61,5
2	3,1416	26,546	38,59	32,5	33,5	34,1	34,6
2,5	4,9087	41,478	24,69	20,8	21,4	21,8	22,1
3	7,0686	59,730	17,14	14,4	14,9	15,2	15,4
4	12,5664	106,186	9,64	8,12	8,37	8,53	8,64
5	19,6349	165,915	6,17	5,19	5,36	5,46	5,53

Les principales propriétés des alliages à base de fer, de nickel et de chrome, ainsi que leurs appellations commerciales, sont données dans le tableau suivant :

Désignation	Composition de l'alliage p. 100	Résistivité ρ au voisinage de 0 20° C ($\Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$)	Densité	Température de fusion (°C)	Coefficient de température moyen α entre 0 et les valeurs usuelles de la température
Chromin ...	env. 30 Ni+5 Cr+65 Fe	0,95	7,96	1 415	6,2 10 ⁻⁴
RNC 1	env. 35 Ni+10 Cr+Fe	1,00	8,05	1 450	3,2 —
NYO	env. 45 Ni+23 Cr+Fe	1,09	—	—	1,8 —
RNC 2	env. 60 Ni+11 Cr+Fe	1,11	8,25	1 450	1,2 —
Tophet C ...	env. 60 Ni+15 Cr+25 Fe	1,12	8,20	1 350	1,3 —
Chromel C .	env. 60 Ni+16 Cr+23 Fe	1,12	8,24	1 405	1,5 —
Glowray ...	env. 65 Ni+15 Cr+20 Fe	1,06	8,27	1 400	1,4 —
Nichrome. .	env. 60 Ni+15 Cr+Fe	1,12	8,25	1 350	1,7 —
BS Cr/Ni/Fe	env. 70 Ni+20 Cr+8 Fe	1,11	8,27	1 395	1,1 —
NYS	env. 75 Ni+23 Cr	1,12	—	—	0,75 —
BS Cr/Ni ..	env. 77 Ni+20 Cr+2 Mn	1,10	8,39	1 405	0,9 —
Nichrome V.	env. 80 Ni+20 Cr	1,08	8,41	1 400	1,3 —
RNC 3	env. 80 Ni+18 Cr	1,02	8,45	1 475	0,6 —
Uranus 1 ..	env. 82 Ni+14 Cr	1,00	8,50	1 450	1,9 —
Tophet A ..	env. 80 Ni+20 Cr	1,08	8,42	1 390	1,0 —
Chromel A .	env. 80 Ni+20 Cr	1,08	8,40	1 405	0,8 —
Brightray ..	env. 80 Ni+20 Cr	1,03	8,35	1 375	0,5 —

N. B. — Certaines grandeurs, qui figurent dans ce tableau, ne sont pas connues avec précision. Nous les donnons cependant à titre indicatif. D'une manière générale, les nombres donnés sont des valeurs moyennes.

Réalisations industrielles de ces alliages.

On les rencontre sous forme de fils ronds, de rubans ou de bandes. Les principaux facteurs à considérer pour leur utilisation sont multiples et parfois contradictoires. Les conditions à établir sont les suivantes :

- puissance électrique nécessaire ;
- volume à échauffer ;
- emplacement disponible pour loger les éléments chauffants ;
- nature du courant d'alimentation ;



- tension d'alimentation ;
- conditions économiques de fourniture de l'énergie suivant la puissance installée ;
- nature du traitement à effectuer (protection des éléments contre les chocs, gaz ou vapeurs) ;
- température à obtenir : valeur, précision, variations possibles ;
- résistance mécanique des fils et rubans.

REMARQUES.

Un fil rond, à section égale, offre à l'oxydation une surface extérieure minimum.

Un ruban présente une surface d'autant plus grande (à section égale), que son épaisseur est plus petite et que sa largeur est plus grande.

L'oxydation est peu importante ou négligeable aux températures usuelles et pour les atmosphères habituelles.

Dans les rubans minces, la résistance mécanique est moindre, et les irrégularités d'épaisseur peuvent provoquer des points d'accroissement calorifique réduisant la vie des résistances.

Formes d'utilisation des fils résistants.

Les fils peuvent être employés tendus sur des supports isolants, tissés sur une toile d'amiante (*Toilectro*) ou boudinés (cas le plus fréquent).

Ils peuvent être montés en éléments nus, généralement boudinés à l'air pour les appareils de chauffage ordinaires ou placés dans des briques réfractaires, dans des pièces isolantes de formes appropriées ou fixés sur des supports (cas des fours dits à résistance). Lorsque le fil a une grosse section, il est disposé sous forme de tiges rectilignes ou d'épingles à cheveux.

Les éléments protégés, enrobés dans du mica ou de la magnésie sont très employés pour les équipements de petits appareils.

Les rubans, bandes et barres de section rectangulaire et à bords généralement arrondis, s'emploient soit à plat, soit montés sur champ sur des supports appropriés.

Considérations sur l'emploi des résistances fer-nickel-chrome et nickel-chrome.

Le nickel-chrome se recouvre d'oxyde isolant, ce qui protège le métal intérieur et permet de placer les spires assez proches les unes des autres, si la tension est suffisamment faible entre ces spires ; cette couche est assez adhérente. L'oxydation superficielle peut être accélérée, surtout à haute température, par la présence du fer (alliages ternaires), par les trépidations, les chocs, l'action des chauffe-



ments et refroidissements successifs, par la nature de l'atmosphère. L'oxydation du métal diminue la section du conducteur, donc accroît la résistance et diminue la puissance dissipée.

Des détériorations accidentelles peuvent se présenter ; elles dépendent :

a) *D'un défaut de fabrication ou de construction* : manque d'homogénéité du métal (soufflure, paillette, section irrégulière...).

— disposition défectueuse des éléments entraînant une surchauffe locale par accumulation de chaleur ;

— apport supplémentaire de chaleur en provenance des éléments voisins ;

— conductibilité thermique inégale de la masse environnante ;

— aplatissement des spires provoquant des courts-circuits locaux ;

— isolement incorrect des entrées et sorties de courant.

b) *D'un défaut d'utilisation.*

— valeur trop élevée de la tension d'utilisation ;

— manque de régulation entraînant une élévation exagérée de température ;

— nature de l'atmosphère (vapeurs sulfureuses, gaz de cémentation ou de cyanuration).

Il faut attacher une grosse importance à la quantité de chaleur dissipée par unité de surface de l'élément chauffant, c'est-à-dire la *chaleur spécifique*. A titre indicatif, voici les valeurs généralement utilisées :

700 à 800° C	2 watts par cm ²
900° C	1 watt par cm ²
1 000° C	0,6 à 0,8 watt par cm ²
1 100° C	0,4 à 0,6 watt par cm ²

ALLIAGES FER-CHROME-ALUMINIUM.

Ils contiennent de 25 à 30 pour 100 de chrome, 2 à 5 pour 100 d'aluminium, le complément étant constitué par du fer, du cobalt, du magnésium... Leur élaboration est délicate. Ces alliages sont protégés par une couche superficielle d'oxyde et ils résistent beaucoup mieux que les nickel-chrome à l'oxydation et à l'attaque des gaz. Par contre, ils cristallisent à chaud, ce qui les rend fragiles et ils supportent assez mal les atmosphères réductrices et la vapeur d'eau. Leur utilisation nécessite l'emploi de réfractaires particuliers dans les fours à cémentation ou ceux de fusion d'aluminium.

Leurs principales caractéristiques sont les suivantes :

— résistivité élevée : (1,4 au lieu de 1,1 ohm × millimètre carré par mètre pour les nichromes) ;

— faible valeur du coefficient de température ;

— densité relativement faible, ce qui peut avoir une certaine répercussion sur le prix de revient ;



— coefficient de dilatation relativement élevé, ce qui peut être un inconvénient.

Dans la pratique courante, les fer-chrome-aluminium sont utilisés pour l'équipement de fours où la température de travail atteint 1 000 à 1 280° C.

Le tableau ci-dessous donne les caractéristiques des principaux alliages commerciaux.

Désignation	Composition de l'alliage p. 100	Résistivité ρ au voisinage de 0-20° C ($\Omega \times \text{mm} / \text{m}$)	Densité	Température de fusion (°C)	Coefficient de température moyen α entre 0 et les valeurs usuelles de la température
RCA 33	Fe+Cr+Al	1,38	7,20	1 500	0,5 10^{-4}
RCA 44	Fe+Cr+Al	1,40	7,10	1 500	0,6 —
Kanthal A ₁	env. 62 Fe+23 Cr+5 Al+ +22,5 Co+divers	1,45	7,10	1 530 à 1 540	0,6 —
Kanthal A	env. 69 Fe+23 Cr+4,5 Al+ +2 Co+divers	1,35	7,20	1 530 à 1 540	0,8 —
Kanthal D	env. 72 à 74 Fe+20 à 22 Cr+ +4 Al+1,5 Co+divers	1,30	7,25	1 530 à 1 540	1,0 —
Mégapyr ...	env. 65 Fe+30 Cr+5 Al	1,44	7,10	—	0,3 —
Cekas-extra.	Fe+Cr+Al	1,40	7,00	—	0,5 —

N B. — Certaines grandeurs, qui figurent dans ce tableau, ne sont pas connues avec précision. Nous les donnons cependant à titre indicatif. D'une manière générale, les nombres donnés sont des valeurs moyennes.

METAUX PRECIEUX.

Ceux-ci : nickel, platine, molybdène, tungstène, s'altèrent vite à haute température, surtout en présence de vapeur d'eau (on y pallie en les protégeant par une atmosphère artificielle d'azote ou d'hydrogène).

On les utilise, soit sous forme de fils bobinés sur un moufle en *alundum*, soit sous forme de feuilles enroulées. Leurs points de fusion étant élevés, c'est généralement le réfractaire qui limite la température d'emploi. On peut facilement atteindre, avec eux 1 700 à 2 000° C.



RESISTANCE D'ISOLEMENT

Lorsqu'un isolant est soumis à une différence de potentiel, continue ou alternative, sa résistance n'est pas infinie ; il est donc traversé par un courant de déplacement donné par :

$$I = \frac{U}{R}$$

I : courant de fuite.

U : tension appliquée (tension efficace dans le cas de courant alternatif).

R : résistance effective de l'isolant ou résistance d'isolement.

Si la tension appliquée est continue, le courant de fuite se décompose en trois éléments :

a) un courant de capacité,

b) un courant de conduction,

c) un courant anormal d'absorption dont l'intensité décroît avec le temps. Ce dernier est irréversible et s'observe surtout sur des diélectriques liquides.

Si la tension est alternative, on observe un autre phénomène, qui ne paraît pas être absolument distinct du précédent et qui se traduit par un échauffement à l'intérieur du diélectrique (voir plus loin : absorption et hystérésis diélectriques).

Lorsqu'on soumet un diélectrique à une tension progressivement croissante et qu'on relève en même temps l'intensité du courant de fuite, on obtient une courbe telle que celle de la figure 44. Cette

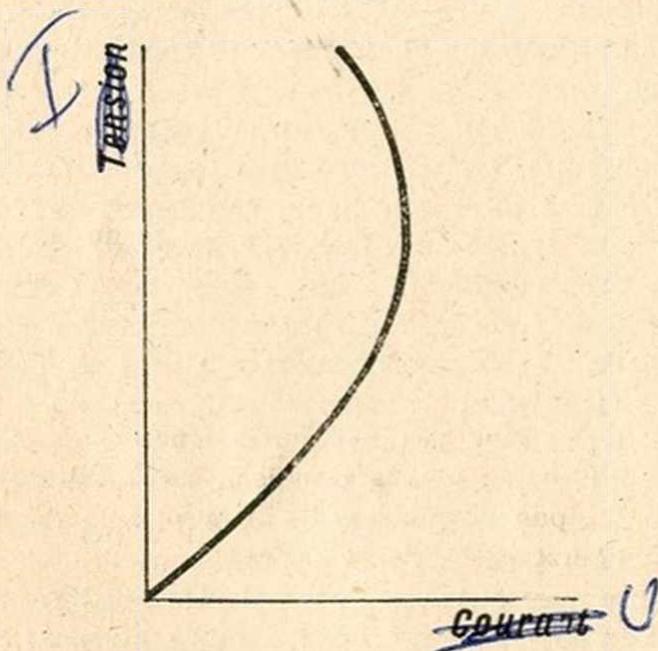


Fig. 44. — Variation de l'intensité du courant de fuite en fonction de la tension appliquée.

courbe, déterminée expérimentalement, montre qu'au début l'intensité du courant croît d'abord sensiblement proportionnellement à la tension, puis après une période où elle croît beaucoup plus vite que



celle-ci, elle atteint un point où elle continue à croître sans tension augmente.

La courbe montre donc que la loi de variation du courant de fuite avec la tension n'est pas proportionnelle sur toute son étendue. *On ne peut donc appliquer la formule d'Ohm que pour des tensions relativement faibles, dont la valeur est d'ailleurs variable suivant la nature du diélectrique considéré.*

Au point de vue constitution électronique de la matière, on peut expliquer la résistance d'isolement de la façon suivante : dans un isolant, le mouvement des électrons d'un atome à l'autre n'a pas lieu, soit parce que les atomes sont trop éloignés les uns des autres, soit parce que les électrons sont fortement attachés au système de la molécule. Lorsque les atomes sont très écartés, les électrons ne peuvent franchir la distance relativement grande séparant les atomes que sous l'action de champs électriques élevés. Il en résulte que tous les gaz et les vapeurs sont à l'état normal des isolants, même les vapeurs des métaux très conducteurs comme l'argent et le cuivre. *Gaz et vapeurs ne deviennent conducteurs que s'ils sont ionisés.*

Dans une substance à l'état moléculaire, les électrons sont moins libres que dans un corps à l'état atomique, puisque les électrons extérieurs constituent les liens chimiques réunissant les atomes. On constate qu'en général les isolants liquides ou solides ont des molécules très volumineuses, à poids moléculaire très élevé (cellulose, résines synthétiques...).

D'une façon générale, un corps aura une bonne résistance d'isolement s'il ne possède pas d'ions libres et si les électrons qu'il renferme sont très attachés au système de ses molécules.

Lorsqu'un isolant sert à protéger électriquement un conducteur métallique, la résistance qu'il oppose au passage du courant de fuite mesure la *résistance d'isolement* de ce conducteur. Pour une tension donnée, cette résistance a pour valeur : $R = U/I$, à condition que la tension U reste inférieure à une certaine valeur (voir plus haut et fig. 44).

La résistance d'isolement est toujours définie par rapport à un autre corps, isolé ou non : résistance d'isolement d'un conducteur par rapport à la terre, par rapport à une masse métallique, résistance d'isolement entre deux conducteurs isolés...

RESISTIVITE.

Pour que le courant de fuite soit faible, il faut que la résistance de l'isolant, donc sa *résistivité* soit importante. La résistivité des isolants industriels est trop variable pour qu'on puisse donner des chiffres précis ; de plus, la loi d'Ohm ne leur est généralement pas applicable. En général, pour les isolants, *la résistivité diminue quand la température s'élève.*

Le tableau suivant donne la valeur moyenne de la résistivité des principaux isolants, exprimée en *ohms* \times *centimètres carrés par centimètre*.

<u>Diélectriques</u>	<u>ρ</u>
Air sec	pratiquement infinie
Ambroïne	2 . 10 ¹⁷
Ardoise	2 . 10 ¹⁴
Argile cuite, non vernie	10 ¹⁶
Bakélite ordinaire	2 . 10 ¹⁷
Bitume	8 à 50 . 10 ¹⁹
Bois sec	0,5 à 10 . 10 ¹⁴
Bois paraffiné.	10 à 100 . 10 ¹⁴
Caoutchouc vulcanisé	10 ²¹
Celluloïd.	2 à 80 . 10 ¹⁵
Ebonite	2 à 30 . 10 ²¹
Fibre rouge.	2 à 10 . 10 ¹³
Gomme laque	9 . 10 ²¹
Grès.	3 . 10 ¹³
Gutta-percha	1 à 100 . 10 ¹⁹
Marbre blanc	2 à 20 . 10 ¹⁵
Mica	5 à 10 . 10 ¹⁹
Micanite.	5 à 10 . 10 ¹⁷
Opaline	1,5 . 10 ¹⁹
Papier	1 à 1 000 . 10 ¹⁵
Papier verni	1 à 20 . 10 ¹⁷
Papier paraffiné	10 ²²
Paraffine	3 à 300 . 10 ²²
Porcelaine vernie ordinaire à 50° C	2 . 10 ²¹
Porcelaine vernie ordinaire à 220° C	6 . 10 ¹⁵
Porcelaine poreuse	5 . 10 ¹²
Presspahn	5 . 10 ¹⁴
Quartz fondu	5 . 10 ²⁴
Toile huilée	2 à 5 . 10 ¹⁵
Vernis sterling	2 . 10 ¹⁸
Verre ordinaire à — 17° C.	8 . 10 ²¹
— à + 20° C.	9 . 10 ¹⁸
— à + 60° C.	8 . 10 ¹⁷
Verre cristal à 45° C	7 . 10 ²¹
Huile de colza	10 ¹⁸
Huile de lin cuite	5 . 10 ¹⁶
Huile de paraffine	10 ²²
Huile de transformateurs	1 à 10 . 10 ¹⁹
Pétroles	2 . 10 ²²



RESISTANCE SUPERFICIELLE

La notion de résistance superficielle intéresse particulièrement les isolants exposés normalement à l'air extérieur, tels la porcelaine, le verre et certaines matières plastiques. Cette résistance varie avec le matériau, l'état de sa surface et dépend essentiellement de son hygroscopicité.

La résistivité superficielle n'a de signification physique que si le courant passant par la masse de l'isolant est négligeable. Dans le cas contraire, la résistance R est formée de deux résistances en parallèle, celle de la surface et celle de la masse. Cette dernière dépend de l'épaisseur du diélectrique ainsi que de la surface d'appui des électrodes, c'est-à-dire de la section d'entrée du courant dans la masse. Lorsque la température d'un isolant s'élève, la bande conductrice extérieure disparaît et la véritable résistance superficielle augmente, tandis que la résistivité massique diminue ; le courant passe de plus en plus à travers le diélectrique.

CONSTANTE DIELECTRIQUE

Cette constante est l'inverse $\frac{1}{k'}$ de la constante physique k exprimant l'influence du milieu dans la loi des attractions et répulsions électriques établie par Coulomb

$$F = k \frac{q \cdot q'}{d^2}$$

C'est la propriété qui caractérise la mesure dans laquelle les corps isolants sont susceptibles de condenser l'électricité sur les lames d'un condensateur entre lesquels ils sont interposés. On l'appelle encore *pouvoir inducteur spécifique*. Celui-ci peut également se définir sous la forme suivante : c'est le rapport de la capacité d'un condensateur construit avec un diélectrique donné, à celle qu'aurait ce même condensateur, si l'on substituait l'espace vide (pratiquement l'air) à ce diélectrique.

En effet, un condensateur, formé de deux surfaces métalliques séparées par de l'air, possède une certaine capacité, c'est-à-dire que, soumis à une tension, les surfaces constituant les armatures se chargent d'une certaine quantité d'électricité. Si on remplace cet air par un isolant solide ou liquide, toutes les autres conditions restant les mêmes, on constate que la capacité est devenue k fois plus grande que la capacité primitive : k est le pouvoir inducteur spécifique ou constante diélectrique.

L'augmentation de capacité que mesure cette constante diélectrique est due à la déformation électrique des molécules ou à leur changement d'orientation sous l'action du champ électrique. Cette déforma-

Tableau du pouvoir inducteur spécifique des principaux diélectriques

Diélectriques	k	Diélectriques	k
Acétone	21	Flint lourd (d = 3,66)	7,38
Acide acétique	6,5	— léger (d = 3,20)	6,7
Air à 100 atmosphères	1,02	Gomme laque	3,10
Air à 760 mm de mercure	1,05	Glycérine	56
Air à 5 mm de mercure	1,0015	Gutta percha	3,3 à 4,9
Vide	1	Huile d'olive	3,1
Alcool amylique	15 à 16	Huile de ricin	4,4 à 4,8
Alcool éthylique	24 à 27	Huile de transformateur	2,5
Alcool méthylique	32,6	Hydrogène	0,999 7
Alcool propylique	22,8	Mica	5 à 7,8
Anhydride carbonique	1,000 4	Paraffine	1,98 à 2,32
Aniline	7,5	Pétrole	2,02 à 2,19
Essence de pétrole	2,3	Porcelaine	4,38
Benzol	2,4	Papier sec	1,5
Caoutchouc pur	2,12 à 2,34	Papier paraffiné	3,6
Caoutchouc vulcanisé	2,69 à 2,94	Quartz	4,55
Cire	1,86	Résine	2,48 à 2,57
Cristal	5,8 à 7,6	Silice	3,5 à 3,8
Eau distillée	81	Soufre	2,6 à 4
Eau à 14° C	83,8	Sulfure de carbone	2,6
Ebonite	2 à 2,8	Vaseline	2,17
Fibre douce	2,08	Verre (d = 2,5 à 4,5)	5 à 10
Fibre dure	1,19 à 2,66	Verre crown dur	6,96



tion des molécules agit comme si des charges positives et négatives séparées étaient créées dans le diélectrique : l'action de ces charges a pour effet d'accroître la capacité d'un condensateur (voir conductibilité électrique).

Le *pouvoir inducteur spécifique absolu* d'un diélectrique est le facteur par lequel il faut multiplier, pour un condensateur sphérique de rayons r_0 et r_1 , ayant ce diélectrique pour isolant, la quantité

$$\frac{r_0 r_1}{(r_1 - r_0)}$$

pour obtenir la capacité de ce condensateur.

Le *pouvoir inducteur spécifique relatif* d'un diélectrique par rapport au vide est le rapport k du pouvoir inducteur spécifique absolu de ce diélectrique au pouvoir inducteur spécifique absolu du vide. C'est cette dernière grandeur, qui caractérise le taux d'induction électrostatique d'un diélectrique, qui représente la *constante diélectrique* ou encore *inductivité*.

La connaissance de la constante diélectrique des isolants est d'une grande importance pour leur application aux condensateurs, aux câbles téléphoniques, et pour l'étude de la répartition des contraintes électriques dans les isolants composés.

Lorsqu'on l'exprime en unités électrostatiques, la constante diélectrique d'un gaz est voisine de 1 ; en unités électromagnétiques elle est voisine de $1/v^2$.

v : vitesse de propagation des ondes électromagnétiques.

Dans le sol, la constante diélectrique varie de quelques unités électrostatiques seulement, pour des sols très secs, à 20 et même 50 unités électrostatiques pour des taux d'humidité de 10 à 60 pour 100.

Note: — On appelle *indice de réfraction* par rapport au vide, pour les ondes lumineuses et électromagnétiques ayant dans le vide une longueur d'onde λ , le rapport des vitesses de propagation, dans le vide et dans le diélectrique considéré, d'ondes entretenues, de longueur d'onde λ dans le vide.

Maxwell donne dans ce cas la relation $k = n^2$.

k : constante diélectrique.

n : indice de réfraction.

Cette formule n'est valable que pour un milieu non magnétique et à condition d'exprimer k en unités électrostatiques.

Variation de la constante diélectrique avec la pression.

H. Gutton a montré que la constante diélectrique d'un gaz varie irrégulièrement en fonction de la pression, pour les pressions les plus faibles, de l'ordre de 1 à 0,1 millimètre de mercure.

Pour un même gaz, à différentes pressions, on a sensiblement

$$\frac{k - 1}{d} = \text{constante}$$

k : constante diélectrique.

d : densité absolue ou masse de l'unité de volume du gaz.



en kilovolts par centimètre, pour des échantillons d'épaisseur variable donnée en centimètres (d'après J. Blondin et A. Turpain).

ISOLANTS	e (cm)	R (kV/cm)
Ardoise		5
Caoutchouc non vulcanisé	0,08	330
Caoutchouc vulcanisé	0,12	235
Cire	0,025	1 100
Cellulose sèche.	0,03	500
Cellulose humide.	0,03	250
Ebonite	0,20	100
Fibre	2	2
Gutta-percha	0,04	230
Huiles minérales.	0,40	80
Huiles pour transformateurs	0,20	140
Huile de lin	1	80
Huile d'olive		80
Marbre blanc	1	14 à 28
Mica.	0,1	600 à 750
Micanite	0,03	400 à 500
Ozokérite	0,06	450
Papier sec.	0,01	40 à 100
Papier paraffiné.	0,01	400 à 500
Papier enduit de cire	0,01	540
Papier micaté	0,02	50 à 175
Paraffine.	0,05	600
Porcelaine	1	100
Presspahn.	1	100
Quartz fondu	0,02	75 à 100
Soufre		33
Stabilité	0,1	100 à 150
Térébenthine	0,08	500 à 750
Verre ordinaire	0,1 à 1,7	75 à 300
Verre au plomb	0,04	1 000

Lorsqu'on soumet un corps isolant à une différence de potentiel croissante, l'étincelle disruptive peut, dans certaines conditions atmosphériques auxquelles est soumis le diélectrique, dériver à la surface au lieu de traverser le corps. La tension par centimètre qui provoque cette dérivation mesure la *rigidité diélectrique superficielle*.

L'état de la surface : rugueuse ou polie, poussiéreuse ou propre humide ou sèche, modifie considérablement la valeur de cette rigidité. L'influence d'amorçages successifs est assez grande sur cette valeur ; certains isolants organiques *charbonnent* rapidement sous l'action de ces amorçages et perdent rapidement leurs propriétés isolantes.