L'ALUMINIUM

ET

SON APPLICATION AUX LIGNES ÉLECTRIQUES

(SUITE ET FIN)

ÉCHAUFFEMENT DES CONDUCTEURS

La notion d'échauffement des conducteurs sous l'effet du courant qui les traverse est sans intérêt pour les installations télégraphiques et téléphoniques. J'indiquerai donc sommairement que, en raison de leur différence de résistivité, les conducteurs de cuivre et d'aluminium s'échaufferont par effet Joule à des degrés différents, sous le passage d'un même courant, suivant qu'ils auront même section ou même conductibilité. On peut admettre comme résultat moyen, aux fréquences industrielles, que, pour les conducteurs d'aluminium et de cuivre de même forme, et placés dans les mêmes conditions de refroidissement :

a) S'ils ont même section, l'échauffement sera le même lorsque la densité de courant dans l'aluminium sera les trois quarts de la densité de courant dans le cuivre ;

b) S'ils ont même conductibilité (c'est-à-dire $S_{Al} = 1,67 S_{Cu}$), l'échauffement du conducteur d'aluminium, sous le passage d'un même courant, sera de 25 % inférieur à l'échauffement du conducteur de cuivre ;

c) Enfin, pour que les deux conducteurs subissent le même échauffement sous le passage du même courant, il faut que la section de l'aluminium soit égale à 1,4 fois la section du cuivre.

On voit donc que partout où la question d'échauffement sera seule en jeu, l'importance de la chute de tension étant indifférente, ce qui est le cas de nombreuses connexions nues, isolées ou armées, dans les tableaux et entre les appareils, le conducteur en cuivre pourra être remplacé par un conducteur d'aluminium de section de 42 % seulement plus élevée, c'est-à-dire ne pesant que les 43 centièmes du poids du conducteur en cuivre.

On voit également que les conducteurs d'aluminium, et cela est surtout important pour les conducteurs isolés ou armés, pourront supporter, avec des risques moindres, des surcharges supérieures à celles des conducteurs en cuivre.

SECTION DES CABLES

La section considérée, quand il est question de câbles, est la section utile, c'est-à-dire la somme des sections droites des fils composants. Avec le pas d'enroulement de 9 à 10 fois le diamètre de la couche, habituellement employé, la longueur de chaque brin est d'environ 5 % supérieure à la longueur du câble. C'est pourquoi l'on admet une majoration de 5 % de la résistance par rapport à celle d'un conducteur cylindrique de même section.

Le poids du câble est également majoré de 5 %.

Le diamètre total d'un câble en millimètres est sensiblement $1,29 \sqrt{Su}$ pour les câbles à 7 et à 19 brins, tandis que celui du conducteur cylindrique équivalent est $1,128 \sqrt{Su}$. Su exprime la section utile en millimètres carrés.

EFFET DE COURONNE

L'effet de couronne, c'est-à-dire la perte d'énergie par ionisation de l'air sous l'effet du champ électrique qui prend naissance à la surface des conducteurs de petit diamètre soumis à de très hautes tensions, est sans intérêt dans les installations téléphoniques et télégraphiques. Je me bornerai donc à indiquer que, dans l'industrie des transports d'énergie, l'aluminium, par sa plus grande section à égalité de conductibilité, présente à ce point de vue un intérêt considérable. En raison du plus grand rayon de courbure, la tension critique d'effluve à la surface d'un conducteur d'aluminium est de 20 % supérieure à la tension d'effluve à la surface d'un conducteur de cuivre de même conductibilité. Il en résulte une diminution sensible des pertes par ionisation dans les conducteurs nus des réseaux à haute tension et une moindre fatigue de l'isolant dans les conducteurs isolés. Cela se traduira, dans le premier cas, par un rendement de la ligne tellement meilleur que l'aluminium arrive presque à s'imposer dans les lignes à plus de 100.000 volts ; dans le deuxième cas, une certaine économie d'isolant pourra être réalisée par la diminution de son épaisseur, sous la réserve toutefois, pour les câbles distributeurs de courant alternatif, que le souci de ne pas augmenter la capacité n'oblige à maintenir un certain rapport entre l'épaisseur de l'isolant et le rayon du conducteur. Dans les câbles distributeurs de courant continu, où la notion de capacité est absente, l'économie d'isolant sera certaine.

INDUCTANCE ET CAPACITÉ

La diminution de l'inductance et l'augmentation de la capacité à égalité de conductibilité résultent, toutes choses égales d'ailleurs, de l'aug-

mentation du diamètre de l'aluminium. A égalité de diamètre, toutes choses égales d'ailleurs, l'inductance et la capacité seront donc les mêmes.

PERTES PAR COURANT DE FOUCAULT

Les courants de Foucault étant moindres dans l'aluminium que dans le cuivre, à une inductance artificielle donnée créée sur un conducteur d'aluminium, par exemple pour réaliser son amélioration au point de vue des transmissions téléphoniques et télégraphiques, correspondra une résistance additionnelle, du fait des courants de Foucault qui en résultent, moindre que dans le cuivre.

CONSÉQUENCES D'ORDRE ÉCONOMIQUE DE LA SUBSTITUTION DE L'ALUMINIUM AU CUIVRE

Si l'on poursuit l'examen des chiffres du tableau I, on voit que le rapport du poids de l'aluminium au poids du cuivre est de :

30 à 100 à égalité de section des conducteurs ;

42 à 100 à égalité d'échauffement des conducteurs sous le passage d'un même courant ;

50 à 100 à égalité de conductibilité.

Le premier rapport intéresse les conducteurs et les pièces où les questions de chute de tension et d'échauffement ne jouent aucun rôle : fils de sonneries, pièces de connexions, douilles, bagues, plaques, etc... Il intéressera la plupart des lignes téléphoniques et télégraphiques ainsi que nous le verrons plus loin. Si m est le rapport du prix de l'aluminium au prix du cuivre, le pourcentage de l'économie brute réalisée, dans ce cas, par l'emploi de l'aluminium a pour valeur :

$$e = 100 - 30 m.$$

Le deuxième rapport intéresse la plupart des canalisations intérieures pour lesquelles la question d'échauffement est prédominante. Le pourcentage de l'économie brute due à l'emploi de l'aluminium a pour valeur :

$$e = 100 - 42 m.$$

Le troisième rapport intéresse la majeure partie des conducteurs d'énergie électrique. L'emploi de l'aluminium procure, dans ce cas, une économie brute dont le pourcentage a pour valeur :

$$e = 100 - 50 m.$$

A la veille de la guerre, le rapport m ayant pour valeur 1,5, l'économie brute réalisée était donc respectivement dans les trois hypothèses précédentes :

$$\begin{array}{l} 55 \% \\ 37 \% \\ 25 \% \end{array}$$

Ces valeurs sont bien changées aujourd'hui et, en raison de la situation troublée que nous traversons, elles subissent des modifications incessantes, si bien que nous ne pensons pas qu'il soit possible, en vue d'une comparaison économique, de faire état des valeurs actuelles. Il faut attendre qu'une nouvelle ère de calme ait permis aux cours de se stabiliser.

Il ne faut pas perdre de vue que l'économie brute réalisée sur l'acquisition du métal sera augmentée ou diminuée, suivant la nature des ouvrages, par l'augmentation ou la diminution des frais accessoires.

CONSÉQUENCES D'ORDRE TECHNIQUE DE LA SUBSTITUTION DE L'ALUMINIUM AU CUIVRE

Nous nous placerons ici principalement au point de vue des lignes téléphoniques et télégraphiques. La substitution semble, dans ce cas, être envisagée à égalité de section dans les lignes en câbles et à égalité de sécurité mécanique dans les lignes aériennes.

Je vais examiner sommairement quelques-unes des conséquences de la substitution ainsi réalisée, n'ayant nullement l'intention d'épuiser le sujet, mon incompetence en matière de télégraphie et de téléphonie ne me le permettant pas, mais ayant simplement pour but plus modeste de vous faire entendre que si l'aluminium est inférieur au cuivre par certains côtés, il lui est supérieur par d'autres et que, en tout cas, il fait assez bonne figure à côté de son concurrent pour toujours mériter de faire l'objet d'une étude parallèle.

a) INFLUENCE DU POIDS

La substitution, diamètre pour diamètre, de l'aluminium au cuivre dans les câbles sous plomb fera réaliser une économie de poids particulièrement intéressante lorsque ces câbles devront être suspendus entre des supports aériens. Si n est le nombre de conducteurs de diamètre d en millimètres, l'économie de poids par mètre sera en kg. :

$$\frac{n d^2}{1000} (7 - 2,12) = \frac{4,88 n d^2}{1000}$$

Ainsi, dans la construction du câble aérien qui a été posé entre Saint-Denis et la Barre, qui comporte 56 paires de conducteurs de 8/10, et qui est suspendu à un câble d'acier formé de 7 fils de fer de 4 mm., on

aurait réalisé, par l'emploi de l'aluminium, une économie de poids de :

$$\frac{4,88 \times 112 \times 0,64}{1000} = c \text{ kg. } 349 \text{ par mètre courant.}$$

Ce n'est pas énorme, mais ce n'est cependant pas négligeable.

Pour un câble à 200 paires, cette économie de poids deviendrait 1 kg. 24 environ et pour un câble à 350 paires, 2 kg. 16 environ. Il en résulterait une économie évidente dans le prix de revient des organes de support.

b) INFLUENCE DU COEFFICIENT DE TEMPÉRATURE

Le coefficient de température de l'aluminium semble ⁽¹⁾ être d'environ 5 % supérieur au coefficient de température du cuivre. C'est dire que si deux conducteurs de cuivre et d'aluminium sont calculés pour avoir la même conductibilité à une température donnée, pour toute autre température, il y aura un écart d'environ 5 % entre les résistances des deux conducteurs.

Mais si l'on considère la variation de la résistance pour chaque conducteur, elle sera, par degré-centigrade, $R_0 \alpha$ pour le cuivre et $R_0 \alpha'$ pour l'aluminium.

$$\text{Comme } \alpha' = 1,05 \alpha \\ \text{et } R_0' = 1,666 R_0$$

la variation de résistance du conducteur d'aluminium surpassera donc de :

$$(1,666 \times 1,05 - 1) \times 100$$

soit de 75 % la variation de résistance du conducteur de cuivre de même section ou de même diamètre.

Ainsi la variation en ohms de la résistance kilométrique d'un conducteur sera, par degré de variation de la température :

$$\begin{aligned} \frac{20,75 \times 0,00393}{d^2} &= \frac{0,082}{d^2} \text{ pour un fil de cuivre de diam } d \text{ en mm.} \\ \frac{33,4 \times 0,00419}{d^2} &= \frac{0,144}{d^2} \text{ — d'aluminium — — —} \\ \frac{16,3 \times 0,00393}{S} &= \frac{0,0642}{S} \text{ — de cuivre de section } S \text{ en mm}^2. \\ \frac{27,22 \times 0,00419}{S} &= \frac{0,114}{S} \text{ — d'aluminium — — —} \end{aligned}$$

Une variation de température de 20 degrés, qui est normale pour des conducteurs aériens, entraînera donc dans un fil de 1 mm. de diamètre une variation de la résistance kilométrique :

$$\begin{aligned} \text{de } 20 \times 0,144 &= 2,88 \text{ ohms si le fil est en aluminium,} \\ \text{et de } 20 \times 0,082 &= 1,64 \text{ — — — — — cuivre.} \end{aligned}$$

Cette différence pourra avoir quelque influence sur le fonctionnement des relais téléphoniques qui n'admettent pas une marge trop grande dans la variation de la résistance du circuit qu'ils commandent.

c) RÉSISTANCE EFFECTIVE AUX COURANTS PÉRIODIQUES

On sait que la densité du courant sur l'axe d'un conducteur cylindrique est une fraction d'autant plus petite de la densité à la périphérie que la fréquence du courant est plus élevée, la perméabilité du métal plus grande, sa résistivité plus faible et le conducteur plus gros. C'est l'effet de surface ou « skin effect ». Aux fréquences industrielles de 25 à 50 périodes, la densité du courant est sensiblement la même dans toute la section des conducteurs non magnétiques, c'est-à-dire des conducteurs de cuivre et d'aluminium, cylindriques, pleins, dont le diamètre ne dépasse pas un centimètre. On n'a donc que rarement à se préoccuper du « skin effect » dans les installations industrielles. Mais il n'en est plus ainsi avec les courants alternatifs rapides tels qu'on se propose de les utiliser aujourd'hui pour réaliser la téléphonie et la télégraphie multiples. Il faut donc connaître la résistance effective des conducteurs aux courants de haute fréquence dont la périodicité peut atteindre 500.000 alternances à la seconde en télégraphie.

Le rapport $\frac{R}{R_0}$ de la résistance effective R d'un conducteur au courant alternatif à sa résistance R_0 au courant continu peut se calculer en partant de la formule de Rayleigh. On forme l'expression :

$$a = \frac{\omega \times 10^{-1}}{R_1}$$

ω étant la pulsation du courant et R_1 la résistance linéaire du conducteur en ohms par kilomètre. Pour un conducteur de cuivre de diamètre d en millimètres on a $R_1 = \frac{20,75}{d^2}$ à 0° C et pour un conducteur d'aluminium, on a $R_1 = \frac{34,4}{d^2}$ de sorte que :

(1) Nous disons « semble » parce que les chiffres donnés par différents auteurs sont assez discordants.

$$\begin{aligned} a &= 0,301 \cdot 10^{-1} f d^2 \text{ pour le cuivre.} \\ a &= 0,182 \cdot 10^{-1} f d^2 \text{ pour l'aluminium.} \end{aligned}$$

Pour les valeurs de $a < 25$, on tire $\frac{R}{R_0}$ du graphique fig. 1.

Pour les valeurs de $a > 25$, on a pratiquement :

$$\frac{R}{R_0} = \sqrt{\frac{a}{2}} + 0,25$$

Fig. 1

Fig. 2.

Si l'on prend l'échelle des fréquences :

$$10 \times 10^4 \quad 20 \times 10^4 \quad 30 \times 10^4 \quad 40 \times 10^4 \quad 50 \times 10^4$$

auxquelles correspondent les longueurs d'onde :

$$3.000 \text{ m.} \quad 1.500 \text{ m.} \quad 1.000 \text{ m.} \quad 750 \text{ m.} \quad 600 \text{ m.}$$

on peut établir le tableau II qui donne pour ces différentes fréquences les valeurs de $\frac{R}{R_0}$ pour des fils de cuivre et d'aluminium de 8/10, 10/10, 20/10 et 30/10.

TABLEAU II

Fréquences	$\frac{R}{R_0}$							
	0,8 m/m		1 m/m		2 m/m		3 m/m	
	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al
0	1	1	1	1	1	1	1	1
10×10^4	1,26	1,09	1,48	1,21	2,73	2,18	3,95	3,12
20×10^4	1,66	1,34	2,0	1,61	3,68	2,97	5,45	4,3
30×10^4	1,99	1,58	2,4	1,93	4,50	3,54	6,60	5,20
40×10^4	2,24	1,81	2,7	2,18	5,17	4,07	7,60	5,97
50×10^4	2,47	1,98	3,02	2,4	5,75	4,50	8,50	6,65

La figure 2 traduit graphiquement les chiffres de ce tableau.

Il est facile maintenant de calculer les résistances des fils de cuivre et d'aluminium aux fréquences considérées. On obtient ainsi les chiffres du tableau III.

TABLEAU III
RÉSISTANCES EN OHMS PAR KILOMÈTRE À 0° C.

Fréquences	0,8 m/m		1 m/m		2 m/m		3 m/m	
	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al
0	32,5	53,8	20,75	34,4	5,18	8,6	2,31	3,82
10×10^4	41	58,7	30,7	42,6	11,2	18,7	9,15	11,85
20×10^4	54	72,1	41,5	55,2	19,2	25,5	12,6	16,4
30×10^4	64,7	85,1	49,8	66,3	23,3	30,4	15,25	19,85
40×10^4	73	97,5	57	75	26,7	35	17,55	22,8
50×10^4	80,5	106,5	62,4	82,6	29,8	38,6	19,6	25,3

On voit que la résistance effective de l'aluminium qui, à égalité de diamètre est, en courant continu, 1,666 fois celle du cuivre, n'est plus, aux fréquences très élevées que 1,30 fois environ cette résistance (1).

Remarque. — Il pourra y avoir intérêt à rechercher la valeur de la résistance effective aux courants de haute fréquence dans les conducteurs composés, non pas d'un seul fil massif, mais de brins câblés par 3 ou par 7, tels qu'il sera peut-être intéressant de les employer dans les lignes aériennes, ainsi que nous le verrons plus loin. L'étude de la répartition du courant dans ces conducteurs est, je crois, entièrement à faire. Il est probable, si le contact électrique est assuré entre chaque brin, que le courant se localisera dans une pellicule périphérique et que la densité de courant sera faible dans le brin central et dans les parties des brins enveloppants voisins du centre de figure. L'utilisation de la section du câble serait donc assez médiocre. Il n'en serait plus de même, et l'utilisation de la section serait au contraire bien meilleure que dans un conducteur cylindrique de même section, si les brins pouvaient être séparés les uns des autres par un isolement suffisant. Or, l'aluminium se recouvre naturellement à l'air d'une pellicule d'alumine parfaitement adhérente et isolante. En augmentant l'épaisseur et l'adhérence de cette couche d'oxyde par des moyens artificiels, on a pu fabriquer, en aluminium nu, des bobines d'électro-aimant et même des inducteurs de petites machines bien plus économiques par conséquent que les mêmes appareils isolés au coton, à la soie ou à l'émail. Mais les moyens actuellement connus ne permettent pas d'obtenir des couches d'oxyde résistant à plus de quelques volts. Il conviendrait donc de rechercher le moyen d'augmenter la résistance électrique et la résistance mécanique de la couche d'oxyde ou d'employer des fils d'aluminium émaillé. On pourrait alors réaliser des conducteurs câblés aériens en métal nu extrêmement favorables à la transmission des courants de haute fréquence. C'est là un sujet intéressant digne des recherches de vos laboratoires.

Connaissant l'influence de la température sur la résistance et la valeur de la résistance effective aux différentes fréquences, on pourra voir maintenant quelle influence aura sur l'affaiblissement des courants la substitution de l'aluminium au cuivre à égalité de section dans un circuit donné. Cette substitution ne changera évidemment rien à l'inductance,

(1) Les chiffres de ces divers tableaux ont été obtenus avec la règle à calcul de 15 centimètres. Ils présentent donc un caractère de précision très relatif, mais suffisant pour un premier travail d'approche.

à la capacité et à la perdite du circuit. L'affaiblissement ne sera donc modifié que par la différence de résistance.

Pour avoir une idée de l'ordre de grandeur de cette modification, j'ai pris dans le numéro de mars 1920 des *Annales des Postes, Télégraphes et Téléphones*, un exemple de calcul de l'amortissement total dans un câble de 2 km, 24 composé de fils de cuivre de 0,8 m/m pour des fréquences de 10.000, 20.000 et 30.000 altern. Les valeurs ainsi calculées par la formule

$$B = \frac{R}{2} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

concordent avec celles mesurées directement. Si le câble était constitué par des fils d'aluminium de 8/10, l'amortissement total pour 20.000 périodes par exemple passerait théoriquement de la valeur 0,454 à la valeur 0,589, soit une augmentation de 30 %. C'est sensiblement l'augmentation qui serait donnée par la résistance seule puisqu'il s'agit d'un circuit de faible perdite. L'expérience, à ma connaissance du moins, ne peut malheureusement fournir encore à ce sujet aucun chiffre pratique.

Les calculs comparatifs se feraient de la même façon sur toutes espèces de lignes, chargées ou non, en prenant pour chacune d'elles la formule appropriée de l'affaiblissement et la périodicité du courant qui les traverse.

SUBSTITUTION DE L'ALUMINIUM AU CUIVRE DANS LES LIGNES AÉRIENNES

Dans les lignes aériennes, le problème électrique de la substitution de l'aluminium au cuivre se double d'un problème mécanique. Nous avons vu, en effet, dans notre tableau comparatif des propriétés de l'aluminium et du cuivre que les constantes physiques de l'aluminium, densité, coefficient de dilatation, élasticité, rupture, étaient sensiblement différentes de celles du cuivre. Il en résulte que des conducteurs suspendus en cuivre et en aluminium ne se comporteront pas de la même façon sous l'influence de leur poids propre et sous l'influence des charges extérieures et des variations de température.

On sait que par temps calme et à la température de la pose, la flèche d'un conducteur suspendu est en mètres :

$$f = \frac{x^2 \delta m}{8R}$$

x étant la portée en mètres,

δ la densité du métal (89×10^{-4} pour le cuivre),
(27×10^{-4} » l'aluminium),

R la charge de rupture par millim. carré comptée au point bas de la chaînette,

m le coefficient de sécurité affecté au travail du métal.

Pour le cuivre on a $\frac{R}{\delta} = 5,06$

et pour l'aluminium $\frac{R}{\delta} = 8,15$

Il en résulte que si à deux conducteurs suspendus, l'un d'aluminium et l'autre de cuivre, on donne la même flèche et le même coefficient de sécurité au même instant, les longueurs des portées seront dans le rapport :

$$\frac{x_{al}}{x_{cu}} = \sqrt{\frac{R_{al} \delta_{cu}}{\delta_{al} R_{cu}}} = \sqrt{1,61} = 1,27$$

ou bien, à égalité de flèche et de longueur de portée, les coefficients de sécurité seront dans le rapport :

$$\frac{m_{al}}{m_{cu}} = \frac{8,15}{5,06} = 1,61$$

ou bien, à égalité de portée et de coefficient de sécurité, les flèches seront dans le rapport :

$$\frac{f_{al}}{f_{cu}} = \frac{\delta_{al} R_{cu}}{R_{al} \delta_{cu}} = \frac{5,06}{8,15} = 0,62$$

c'est-à-dire : à égalité de fatigue et de flèche, la portée du conducteur d'aluminium pourra dépasser de 27 % la portée du conducteur de cuivre ; à égalité de portée et de flèche, la fatigue du cuivre dépassera de 61 % la fatigue de l'aluminium ; à égalité de portée et de fatigue, la flèche du conducteur d'aluminium ne sera que les 62/100 de la flèche du cuivre.

Mais ces constatations n'ont d'intérêt réel que dans le cas où les conducteurs seraient à l'abri des influences atmosphériques, variations de température, effort du vent, surcharges de neige, de glace, etc.

Le règlement technique du 21 mars 1911, consécutif à la loi du 15 juin 1906 sur les distributions d'énergie, n'a retenu de ces surcharges, que celles dues à l'effort du vent et il a prescrit de calculer la résistance mécanique des ouvrages, avec des coefficients de sécurité de

3,5 ou 10, suivant la situation des lignes sur le domaine public, en tenant compte soit d'un vent de 120 k. par m² (ou 72 k. par mètre carré de la section longitudinale des pièces cylindriques), à la température moyenne de la région, soit d'un vent de 30/18 k. à la température minima.

La recherche assez compliquée des conditions de travail des conducteurs suspendus, dans les différentes hypothèses de température et de surcharge, a été simplifiée par la méthode de M. Blondel, trop connue pour que je l'expose ici.

Les graphiques et les abaques, établis suivant cette méthode pour le cuivre et pour l'aluminium, permettent de poursuivre la comparaison que nous avons commencée tout à l'heure, des conducteurs suspendus de cuivre et d'aluminium. L'un de ces graphiques, que nous reproduisons ici (fig. 3), et qui donne le rapport du poids apparent pris par un conducteur suspendu sous l'effort du vent, à son poids propre, montre que l'influence du vent est plus considérable sur les conducteurs d'aluminium que sur les conducteurs de cuivre de même diamètre et que

pas de fixer les portées au préalable, comme on a l'habitude de le faire, et de rechercher les conséquences de la substitution pure et simple, sur ces portées, d'un métal à l'autre, mais bien de rechercher la portée économique qui convient à chaque métal et d'établir en conséquence les éléments de la ligne et en particulier la grandeur des portées. On arrivera toujours ainsi, à égalité de sécurité mécanique et électrique, et avec, bien entendu, un rapport normal des cours tel qu'il était avant guerre, à une économie sensible en faveur de l'aluminium.

Dans les lignes téléphoniques et télégraphiques, la question ne se pose pas sous cette forme. Il y a, en France, une portée normale qui était autrefois de 80 à 100 m., mais que l'on a peu à peu ramenée à 75 puis à 60 m., chiffre actuel, au fur et à mesure de l'accroissement du nombre des conducteurs sur les supports. Cette portée normale est déterminée, non par la résistance des conducteurs, mais par la résistance des supports. Il faut donc que le conducteur s'adapte à cette portée, avec la sécurité voulue, quel que soit son diamètre et quelle que soit sa nature, en dehors de toute notion d'économie.

En Suisse, le règlement de 1908 a fixé la portée normale à 40, 45 ou 50 m., suivant la section totale des fils tendus.

En Belgique, la longueur des portées est déterminée par la notion de résistance des conducteurs. La portée normale atteint ainsi 60 à 80 m. pour des fils de cuivre de haute conductibilité et 100 à 120 m. pour des fils de bronze phosphoreux. Quant aux supports, ils sont établis ou renforcés suivant le nombre des fils, de manière à toujours présenter un coefficient de sécurité déterminé.

Cette notion de portée normale économique a fait l'objet d'une très remarquable étude de M. Pillonel, Ingénieur de la Direction des Télégraphes fédéraux, parue d'août 1915 à mars 1916 dans le *Journal télégraphique* de Berne. Je regrette vivement de n'avoir pas le temps d'analyser ici cette étude et je ne saurais trop conseiller à ceux qui s'intéressent au problème de la stabilité des lignes aériennes d'en prendre connaissance, je suis sûr qu'ils en tireront grand profit.

Quoi qu'il en soit, en admettant que, pour l'instant du moins, les conducteurs d'aluminium aient à s'adapter à une portée normale de 60 m., voyons comment ils se comporteraient sous l'empire du règlement français.

Prenons des fils de 3 millim. de diamètre par exemple.

D'après le règlement, ces fils, qu'ils soient en aluminium ou en cuivre, devront travailler avec un coefficient de sécurité égal à 3 sous l'action d'un vent de 72 k. s'exerçant à la température moyenne, soit 10° C environ.

Pour le fil de cuivre, cette condition sera réalisée si on lui donne en air calme à + 10° une flèche de 0 m. 50, soit une tension de 8,4 k. m/m² ;

à — 20° cette flèche deviendra 0 m. 28 et la tension 14 k., soit une sécurité de 3,2 ;

à 0° cette flèche deviendra 0 m. 40 et la tension 10 k., soit une sécurité de 4,5 ;

à + 35° cette flèche deviendra 0 m. 73 et la tension 5 k. 5, soit une sécurité de 8,2.

La tension totale du conducteur variera donc de 5 k. 5 × 7 k. 1 = 39 k. au minimum, à 15 k. 7 × 7 k. 1 = 106 k. au maximum.

Sous l'effort du vent de 72 k., le poids apparent p' de ce fil devient égal à 3,6 fois son poids propre p, de sorte que le déplacement latéral angulaire à partir de la verticale sera tel que $\cos \alpha = \frac{1}{3,6} = 0,2777$ c'est-à-dire $\alpha = 73^{\circ}50'$.

Pour le fil d'aluminium, le règlement sera satisfait et la même sécurité que pour le cuivre sera réalisée dans la même hypothèse, si on lui donne en air calme à + 10° une flèche de 1 m. 60 correspondant à une tension de 0 k. 79 par m/m² ;

à — 20° cette flèche deviendra 1 m. 30, la tension 0 k. 97 et la sécurité 21,7 ;

à 0° cette flèche deviendra 1 m. 50, la tension 0 k. 85 et la sécurité 25 ;

à + 35° cette flèche deviendra 1 m. 84, la tension 0 k. 7 et la sécurité 30.

La tension totale du conducteur variera donc de 0 k. 7 × 7 k. 1 = 5 k. environ au minimum, à 7 k. 7 × 7 k. 1 = 50 k. environ au maximum. Le poids apparent de ce fil, sous l'effort du vent de 72 k. devient égal à

11,2 fois le poids propre $\frac{p'}{p} = 11,2$. Le déplacement latéral angulaire sera donc tel que $\cos \alpha = \frac{1}{11,2} = 0,0892$ c'est-à-dire $\alpha = 84^{\circ}25'$.

Les résultats de ces calculs sont traduits graphiquement sur la fig. 4. Il est de toute évidence qu'une ligne aérienne en aluminium comportant de telles flèches serait inutilisable. La ligne de cuivre, elle, serait acceptable, mais, bien qu'établie réglementairement, il n'en est pas moins

Fig. 3.

l'écart est d'autant plus considérable que les diamètres sont plus réduits. Il en résulte que, sous l'empire du règlement français, il devient pratiquement impossible d'employer les conducteurs d'aluminium de petit diamètre autrement que sur des portées très courtes, même dans les régions où l'intensité du vent n'atteint jamais les valeurs du règlement.

Il est facile de déterminer quelle est, suivant le diamètre du conducteur, la réduction de portée qu'il faudra faire subir au conducteur d'aluminium dans les différentes hypothèses que l'on peut se fixer : égalité de flèche à la température maxima, égalité de sécurité dans telle ou telle condition atmosphérique, etc.

Dans les transports d'énergie, où l'on n'emploie que des conducteurs de diamètre relativement gros et où ailleurs la comparaison entre aluminium et cuivre se fait toujours à égalité de conductibilité, c'est-à-dire avec un diamètre de 30 % plus grand pour l'aluminium que pour le cuivre, les conséquences de l'action du vent ne sont pas aussi défavorables à l'aluminium. D'ailleurs, dans cette industrie, on se rend compte de plus en plus que le problème des conducteurs suspendus en cuivre est une chose et que celui des conducteurs suspendus en aluminium en est une autre et que, si l'on veut établir la comparaison économique des deux métaux, dans la construction d'une ligne donnée, il convient non

facile de voir qu'une surcharge de neige de 380 gr. (1) par mètre courant à la température de 0°C amènera le conducteur ainsi tendu au delà de sa limite d'élasticité. Les deux conducteurs bien qu'établis réglementairement se trouvent donc en aussi mauvaise posture l'un que l'autre, l'un du fait du vent qui exige de trop grandes flèches, l'autre du fait des surcharges de neige qui pourront le détruire, et qui le détruisent bien en effet quelquefois.

Fig. 4.

En Suisse, les lignes aériennes ne se calculent pas comme en France. Les fils sont tendus de manière à présenter un coefficient de sécurité égal à 3 à la température de -20° , sans tenir compte des surcharges, ce qui semble logique, car il n'y a pas lieu de mettre en avant plutôt la surcharge de vent que la surcharge de glace ou de neige, puisque tout est affaire de région et de climat. Cette réglementation est cependant fortement critiquée en Suisse et elle fait en ce moment l'objet d'une étude de révision (voir dans le *Bulletin de l'Association suisse des Electriciens* de mars 1918 la discussion très approfondie, par M. Pillonel, des propositions nouvelles). On estime en Suisse, et on en donne la preuve, que le coefficient de sécurité $1/3$ à -20° est trop élevé et qu'il faut le ramener à $1/5$. On estime aussi que l'on doit déterminer par une statistique permanente, pour chaque diamètre de fil, la nature et la valeur de la plus grande surcharge qui peut l'atteindre (vent, neige, glace, suivant la région) et vérifier que, sous cette surcharge, la limite d'élasticité ne sera pas atteinte.

Chercher à déterminer une bonne fois la valeur des surcharges sur lesquelles on doit compter, introduire la notion de la limite d'élasticité qui est le seul critérium de la matière, renoncer à l'emploi du coefficient de sécurité qui est souvent, comme on l'a dit, un coefficient d'ignorance, telles sont les directives actuelles de nos voisins.

Quoi qu'il en soit, il m'a semblé intéressant de voir comment se comporteraient notre aluminium et notre cuivre avec la formule actuelle du règlement suisse, en conservant toutefois la portée normale de 60 m.

Pour le fil de cuivre de 3 m/m. le règlement sera satisfait si on lui donne :

- à $+10^{\circ}$ en air calme une flèche de 0 m. 45, c'est-à-dire une tension de 9 k., ce qui correspond à un coefficient de sécurité de 4,9 ;
- à 0° en air calme la flèche deviendra 0 m. 37, la tension 11 k. et le coefficient de sécurité 4,1 ;
- à -20° en air calme la flèche deviendra 0 m. 27, la tension 15 k. et le coefficient de sécurité 3 ;
- à $+35^{\circ}$ en air calme la flèche deviendra 0 m. 70, la tension 6 k. et le coefficient de sécurité 7,5.

Sous l'effort du vent de 72 k. à la température de $+10^{\circ}$, prévu par notre règlement, la flèche inclinée sera 0 m. 93, la tension 15 k. 5, le coefficient de sécurité 2,9, c'est-à-dire presque le coefficient exigé par notre règlement.

Sous l'effet d'une surcharge de neige de 380 gr. par mètre courant à 0°C , la flèche atteindra 1 m. 28 et la tension s'approchera de la limite d'élasticité de 24 à 25 k.

Le conducteur de cuivre se comportera donc tout aussi bien et même un peu mieux que dans le cas du règlement français.

Pour le conducteur d'aluminium, le règlement sera satisfait si on lui donne :

- à $+10^{\circ}$ en air calme une flèche de 0 m. 35, c'est-à-dire une tension de 3 k. 6, ce qui correspond à un coefficient de sécurité de 5,8 ;
- à 0° en air calme, la flèche deviendra 0 m. 27, la tension 4 k. 7 et le coefficient de sécurité 4,5 ;
- à -20° en air calme la flèche deviendra 0 m. 18, la tension 7 k. et le coefficient de sécurité 3 ;

(1) M. Pillonel, *loc. cit.*, cite des poids mesurés de 580 gr. par mètre courant de neige humide sur des fils de 15/10 et de 700 gr. sur des fils de 20/10.

à $+35^{\circ}$ en air calme, la flèche deviendra 0 m. 67, la tension 1 k. 86 et le coefficient de sécurité 11,3.

Sous l'effort de notre vent réglementaire de 120/72 k. à $+10^{\circ}\text{C}$, la flèche inclinée deviendra 1 m. 355, la tension 10 k. 5, le coefficient de sécurité 1,9. Ce coefficient est évidemment inférieur à notre coefficient réglementaire de 3, mais peut-on prétendre que l'existence de la ligne sera compromise de ce fait? Je ne le crois pas. L'effort du vent est essentiellement intermittent. Contrairement à l'effet du froid et de la neige, il procède par oscillations brusques qui affectent la résistance vive de la matière et qui ne la fatiguent pas dangereusement, même en la poussant jusqu'à sa limite d'élasticité, puisque dans chaque intervalle de repos, le métal élastique peut reprendre sa cohésion.

Sous l'effet de la surcharge de neige de 380 gr. par mètre courant, la tension, comme pour le cuivre, se rapprochera de la limite d'élasticité, mais en raison même de la grande élasticité de l'aluminium, le conducteur s'allongera relativement davantage de sorte que la tension augmentera beaucoup plus lentement que dans le cuivre et que finalement le conducteur d'aluminium supportera une surcharge relativement plus grande avant de se rompre. C'est pourquoi il n'est pas rare, après de fortes chutes de neige, de voir des conducteurs de cuivre rompus à côté de conducteurs d'aluminium demeurés intacts. Les résultats graphiques des calculs précédents font l'objet de la figure 5.

Fig. 5.

Nous voyons donc que la réglementation suisse pourrait nous permettre de réaliser une ligne d'aluminium de moindre flèche, sauf pendant les surcharges momentanées de neige ou de vent, qu'une ligne de cuivre de même diamètre, et dont la sécurité serait la même par les grands froids, un peu moindre, mais encore très suffisante, par les grands vents, et certainement supérieure pendant les chutes de neige.

C'est ce caractère que présenteraient les lignes d'aluminium construites par l'Administration des Télégraphes fédéraux, avec plus de sécurité encore, puisque les portées peuvent être réduites à 50, 45 et même 40 m. C'est ce caractère qu'elles ne peuvent pas présenter actuellement en France, en raison soit de la réglementation existante, soit de la valeur de la portée normale.

La comparaison de l'aluminium aux bronzes de haute résistance et de faible conductibilité, nous amènera de toute évidence à constater que les flèches du bronze seront, à égalité de sécurité, inférieures à celles de l'aluminium.

Au bronze dur, si l'aluminium pur ne pouvait, en suite de ce que nous venons de constater, donner satisfaction à tous les besoins, on pourrait peut-être opposer soit le duralumin, soit le conducteur mixte aluminium-acier.

Le duralumin est un alliage à 95 % d'aluminium, avec environ 3 % de cuivre et 1 % de magnésium, dont la conductibilité n'est pas supérieure à 50 % de celle du cuivre, c'est-à-dire comparable à celle du bronze dur, mais dont la dureté et la résistance mécanique dépassent le double de la dureté et la résistance mécanique de l'aluminium pur. Ces propriétés sont acquises par un traitement à chaud analogue à la trempe de l'acier. Elles ont été mises à profit dans la construction d'un grand nombre de pièces mécaniques qui exigent à la fois légèreté et résistance, notamment dans l'aéronautique. C'est ainsi que sont faites en duralumin les membrures métalliques des dirigeables rigides et des avions.

Le duralumin se lamine et se tréfile comme l'aluminium.

La comparaison technique et économique du duralumin et du bronze dur se ferait comme nous venons de faire celle de l'aluminium et du cuivre. Le temps ne me permettra même pas de l'effleurer, pas plus qu'il ne me permettra de traiter comme il l'eût fallu l'importante question des câbles d'aluminium avec âme en acier que je ne puis cependant passer complètement sous silence.

CÂBLES ALUMINIUM-ACIER

Les conducteurs d'aluminium-acier sont constitués par une âme en acier galvanisé de haute résistance mécanique, à un brin ou à sept brins, sur laquelle sont câblés, en une ou plusieurs couches, les fils d'aluminium.

Imaginé en France, ces câbles sont employés depuis 8 ou 10 ans dans les grandes lignes à très haute tension d'Amérique, et ils ont permis la réalisation de portées normales de 200, 250 et même 300 mètres.

En Europe, je ne connais pour l'instant qu'une seule ligne en aluminium-acier. C'est celle que j'ai fait construire pendant la guerre, comme directeur de la Société Hydro-Electrique de l'Eau d'Olle, en Dauphiné, pour la traversée, à 2.000 mètres d'altitude, du massif de Belledonne. Elle comporte 6 conducteurs sous la tension de 60.000 volts dont 3 de 112 mm² de section, dont la charge de rupture est de 2.900 kg., et 3 de 88 mm² de section, dont la charge de rupture est de 2.270 kg. La pose a été faite de manière à permettre aux conducteurs de travailler à leur limite d'élasticité sous une charge constatée de 9 kg. de glace par mètre courant. Cet ouvrage est soumis, dans la zone élevée, à des températures de — 35° C et à des vents d'une très grande violence et cependant, depuis deux ans qu'il a été mis en service, le fonctionnement n'a été interrompu que deux fois, une première fois par suite du glissement d'un support, une autre fois par suite du contact accidentel avec le câble inférieur d'un conducteur trop surchargé de neige.

Cet essai encourageant permet de penser que les câbles aluminium-acier rendront en France de réels services dans la construction des grands réseaux inter-régionaux qui sont actuellement projetés. Aussi la Commission instituée par l'Union des Syndicats de l'Electricité n'a-t-elle pas manqué de mettre ces câbles à l'étude. Une théorie provisoire du travail des métaux de propriétés différentes qui composent ce câble hétérogène lui a été présentée. On en a déduit les propriétés mécaniques et électriques de cet ensemble, considéré comme une masse homogène, et on a dressé les résultats en un tableau dans lequel on a fait figurer les propriétés équivalentes de l'aluminium pur et du cuivre (tableau IV).

Je crois que de tels conducteurs méritent d'être mis à l'essai dans la construction des grands réseaux télégraphiques et téléphoniques aériens.

MISE EN ŒUVRE DES CONDUCTEURS D'ALUMINIUM

Le fil de cuivre exige une manipulation très scrupuleuse, disait-on, il y a 30 ans, dans les Manuels de télégraphie pratique, aux monteurs habitués à manipuler le fer. C'est exactement le même raisonnement qu'il faut tenir aujourd'hui pour l'aluminium aux monteurs habitués à manipuler le cuivre.

Les tourets et les couronnes d'aluminium doivent donc naturellement faire l'objet, depuis l'atelier de fabrication jusqu'au montage, d'une série de précautions parmi lesquelles je mentionnerai seulement la vérification minutieuse et sévère de la surface du conducteur sur toute sa longueur, car une blessure superficielle dans les fils tréfilés n'agit pas seulement par diminution de la section mais surtout par diminution de la cohésion du métal dans la section atteinte et par conséquent de la résistance vive.

Fig. 6.

C'est cette crainte de la blessure qui a engagé les électriciens à renoncer aux conducteurs massifs pour n'admettre que des conducteurs câblés malgré les inconvénients inhérents à leur constitution, plus grand poids.

TABLEAU IV

COMPARAISON DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET ÉLECTRIQUES DE L'ALUMINIUM COMMERCIAL, DU CUIVRE COMMERCIAL, DE L'ALUMINIUM-ACIER À 7 BRINS, DE L'ALUMINIUM-ACIER À 37 BRINS.

	Aluminium commercial	Cuivre commercial	Alum.-acier à 7 brins	Alum.-acier à 37 brins	Acier
Poids spécifique en gr. : cm ³	2,7	8,95	3,55	3,85	7,80
Conductivité électrique (relative).....	60	100	51,5	49	0 (1)
Coefficient de dilatation linéaire.....	22,8 × 10 ⁻⁶	16 × 10 ⁻⁶	18,2 × 10 ⁻⁶	17,25 × 10 ⁻⁶	11,5 × 10 ⁻⁶
Tension de rupture, en kg. : mm ²	20	42	29	32	100 à 120
Limite d'élasticité, en kg. : mm ²	11 à 12	23 à 25	16	17 à 18	90 à 95
Coefficient d'allongement { massif.....	148 × 10 ⁻⁶	78 × 10 ⁻⁶			45,4 × 10 ⁻⁶
câble.....	185 × 10 ⁻⁶	97 × 10 ⁻⁶	127 × 10 ⁻⁶	115 × 10 ⁻⁶	au max. (2)
Module d'élasticité, en kg. : mm ² { massif.....	6.750	13.000	—	—	22.000
câble.....	5.400	10.300	7.850	8.680	au minimum
Rapport des sections à égalité de conductibilité.....	1,666	1	1,943	2,05	
Rapport des diamètres — —.....	1,29	1	1,395	1,43	
Rapport des poids — —.....	0,5	1	0,73	0,835	
Poids d'un câble en kg. par mm ² de section totale et par km. de longueur.....	2,81	9,4	3,55	3,85	
Résistance kilom. à 0°, en ohms, d'un câble de S mm ² de section.....	28,6	17,2	23,4	25,2	
Tension maxim. en kg. : mm ² d'un conducteur suspendu.....	8	8	8	8	
Avec coef. de sécurité = 3.....	6,7	14	9,7	10,7	
Avec coef. de sécurité = 5.....	4	8,5	5,8	6,4	
Avec coef. de sécurité = 10.....	2	4,25	2,9	3,2	
Tension critique en volts, produisant l'effet de couronne, à égalité de conductibilité.....	1,20 × n	n	1,23 × n	1,27 × n	

(1) On ne tient pas compte de la présence de l'acier, au point de vue de la conductibilité électrique, dans les câbles aluminium-acier.

(2) L'accroissement du module d'élasticité de l'acier augmente la résistance mécanique du câble en faisant supporter à l'âme d'acier une part plus grande de la tension totale.

Il faudrait une conférence spéciale rien que pour commenter ce tableau et en tirer les conclusions nécessaires. Je me contenterai de vous donner trois chiffres : si, d'après le règlement français actuel, qui n'est pas favorable aux métaux légers, on tend sur une portée de 300 m., avec la même condition de sécurité, trois câbles de conductibilité équivalente, l'un en cuivre de 92 mm², l'autre en aluminium de 153 mm², le troisième en aluminium-acier de 189 mm², la flèche maxima du câble d'aluminium sera de 13 m., celle du câble de cuivre sera de 11 m., et celle du câble d'aluminium-acier de 8 m. 20.

plus grand diamètre apparent, plus grande résistance électrique linéaire.

La fixation des conducteurs sur les isolateurs doit être faite de manière à éviter, sur la porcelaine ou sur le verre, tout frottement continu qui pourrait à la longue user le métal et entraîner la rupture. L'intercalation d'une petite bande d'aluminium enroulée autour du conducteur constitue une bonne précaution contre cet accident. Les modes de fixation habituels à l'aide d'un fil à ligature ou à l'aide d'une baguette enroulée en spires jointives sur le conducteur de part et d'autre de l'isolateur donnent d'excellents résultats (fig. 6).

La jonction des lignes aériennes ne doit pas se faire par soudure car cette opération altère les propriétés mécaniques du métal. Une jonction excellente, qui n'introduit pas de résistance appréciable dans le conducteur, est obtenue à l'aide du manchon ovale en aluminium recuit qui emprisonne sous une forte pression après torsion, les extrémités à raccorder préalablement bien nettoyées (fig. 7).

Il peut arriver que l'on ait à jonctionner entre eux des conducteurs de cuivre et d'aluminium. On pourrait alors craindre les phénomènes thermiques dus à l'effet Peltier ou les phénomènes chimiques dus à la présence accidentelle d'un électrolyte, mais l'effet Peltier est insensible. Quant aux actions électrolytiques, qui ne risquent de se produire que dans des cas très rares, par exemple dans des salles d'accumulateurs, il est facile de les éviter, soit en étamant ou en galvanisant le cuivre, l'étain et le zinc étant plus près de l'aluminium dans la série électrochimique que le cuivre, soit mieux encore, en recouvrant le joint une fois fait de plusieurs couches de peinture ou de vernis.

Dans les conducteurs isolés des câbles sous plomb, on devra recourir à la jonction par soudure. Cette soudure, un peu délicate pour les pièces de grosses dimensions, en raison de la formation rapide d'une pellicule d'oxyde qui s'oppose au contact intime de métal à métal, se fera sans difficulté pour les conducteurs de petit diamètre à l'aide du procédé de soudure autogène employé dans les tréfileries pour le raccordement des brins. Ce procédé consiste dans l'emploi d'un fondant à base de chlorures alcalins qui dissolvent l'alumine au fur et à mesure de sa formation et qui empêchent l'accès de l'air au contact des extrémités chauffées.

Fig. 7.

Fig. 8.

Mais la soudure n'est pas indispensable dans la jonction des conducteurs de câbles sous plomb ; elle a, d'ailleurs, l'inconvénient de gêner les modifications ultérieures et la recherche des défauts ; — le joint américain Matthews, très employé aux États-Unis, permet d'effectuer les jonctions des fils sous plomb avec ou sans soudure (fig. 8).

AUTRES APPLICATIONS DE L'ALUMINIUM

L'aluminium peut être forgé, laminé, étiré, embouti, estampé, décollé, fondu et moulé aussi facilement que le cuivre et le laiton. C'est dire que l'on peut fabriquer en aluminium, avec le même succès, sauf quelques rares exceptions, tout le petit appareillage et tous les objets actuellement construits en cuivre ou en laiton. Pour les moulages cependant, la fonte d'aluminium (Al. 90, — Sn 5 à 1, — Cu 2 à 5) est supérieure à l'aluminium pur. Cette fonte se moule bien au sable et en coquille. Avec ce dernier procédé, les pièces ont un aspect de fini très satisfaisant et un degré de précision permettant de supprimer une grande partie et souvent la totalité des opérations d'usinage. On obtient ainsi des plaques indicatrices, des bagues, des boîtiers, des couvercles, des carters, des manettes, des poignées, des volants de manœuvre, des leviers, des cadres, des socles, des contacts, des clés de manœuvre, des supports et griffes de lampe, des lanternes, des appliques, des consoles, des roues dentées de compteurs, des vis, etc.

Pour leur donner un bel aspect, ces pièces peuvent être nickelées, car le nickelage réussit parfaitement sur des alliages de 0 à 10 % de cuivre.

Par découpage, estampage et emboutissage, avec quelques recuissons à 350 ou 400°, on peut fabriquer sans crique ni rupture des douilles de lampe, des aiguilles, des amortisseurs, des disques de compteurs, des réflecteurs, des armatures de tubes isolants, etc.

Je n'en finirai pas d'énumérer toutes les pièces qui sont déjà ou peuvent être construites en aluminium, dans le matériel de chemins de fer, de tramways, dans les machines électriques, dynamos, alternateurs, transformateurs, moteurs, connexions de toutes dimensions, etc. Mais au cours de cette énumération aride, vous avez déjà entrevu tout le parti que l'on pouvait tirer de l'aluminium dans la construction du

matériel de téléphonie et de télégraphie, de radiotélégraphie, de radio-téléphonie, de poste pneumatique, etc. Toute énumération nouvelle serait donc superflue.

À côté des conducteurs qui peuvent absorber un tonnage important de métal, tous ces objets sont menus et légers, mais répétés par milliers, ils absorberont, eux aussi, une part respectable de notre production nationale et contribueront dans la même mesure au soulagement de notre dette extérieure. À ce titre, ils sont donc également dignes de votre attention.

CONCLUSION

L'aluminium a fait ses preuves dans le transport, la distribution et la production de l'énergie électrique. On peut dire, au moins pour le transport et la distribution, qu'il est maintenant considéré comme l'équivalent du cuivre au point de vue technique, tandis qu'il lui est généralement supérieur au point de vue économique.

En matière de télégraphie et de téléphonie, l'expérience, sauf dans l'appareillage, fait encore défaut, mais il y a de sérieuses présomptions pour que l'aluminium puisse aussi, dans cette industrie, prendre une place importante.

NOTE ANNEXE

ANALYSE CHIMIQUE D'UN ÉCHANTILLON D'ALUMINIUM

Méthode de dosage. — On dose, dans les échantillons prélevés, le silicium et le fer ; l'aluminium est obtenu par différence.

1° Dosage du silicium. — On pèse 2 gr. exactement de métal que l'on place dans une capsule de porcelaine à fond plat de 250 cm³ de contenance ; on y ajoute 50 cm³ d'un mélange composé comme suit :

Acide nitrique pur (densité 1,42).....	100 cm ³
Acide chlorhydrique pur (densité 1,20).....	300 —
Acide sulfurique pur (densité 66°).....	100 —
Eau distillée.....	100 —

L'attaque se fait à froid et se trouve complètement terminée en 10 ou 12 minutes. Lorsque le métal est complètement dissous, on ajoute 15 cm³ d'acide sulfurique pur et on chauffe la capsule sur un bec Bunsen jusqu'à l'apparition des fumées blanches. Cette opération a pour but d'insolubiliser la silice.

La capsule est retirée du feu à ce moment et mise à refroidir pendant 10 minutes environ. On ajoute 100 à 150 cm³ d'eau distillée pour dissoudre le sulfate d'alumine formé et, s'il y a lieu, on broie les croûtes cristallines avec un agitateur en verre, on porte ce mélange à l'ébullition, tout se dissout, la liqueur devient claire ; seule la silice insolubilisée surnage en flocons.

On filtre alors sur un filtre sans cendres, on lave par décantation et à la fin on termine le lavage sur filtre jusqu'à ce que le liquide filtré ne précipite plus par le chlorure de baryum, ce qui indique que tout le sulfate est éliminé. Le filtre et son contenu sont placés dans un petit creuset en porcelaine. On porte le tout au moufle, on calcine à la température du moufle pendant 10 minutes. On met le creuset à refroidir au dessiccateur, puis on pèse le contenu du creuset.

Ce précipité renferme la silice. Le poids trouvé multiplié par 0,47 et par 50, donne le Si %.

2° Dosage du fer. — On pèse également 2 gr. de métal exactement, que l'on met dans un matras à fond plat de 500 cm³ de contenance avec 50 cm³ d'un mélange ainsi composé :

Acide chlorhydrique pur (22° B.).....	500 cm ³
Eau distillée.....	500 —

et on laisse l'attaque se produire à froid ; quand elle se fait mal, on accélère en chauffant un peu. L'attaque étant complètement terminée (ce que l'on constate par la cessation de tout bouillonnement), on ajoute à la liqueur, au moyen d'une pipette de 5 cm³, une liqueur manganéuse ainsi composée :

Sulfate de manganèse pur.....	50 gr.
Acide phosphorique pur (à 65 %).....	100 cm ³
Acide sulfurique pur.....	100 —
Eau distillée, compléter à.....	1 litre

On ajoute au liquide 150 cm³ environ d'eau distillée, puis on titre sur le contenu total du matras avec une solution de permanganate de potassium contenu dans une burette de Mohr, la liqueur est décolorée et on arrête le titrage au moment où le contenu du matras prend une faible coloration rose. On lit alors le nombre de centimètres cubes de solution employée. La liqueur de permanganate est préparée de telle façon qu'un centimètre cube corresponde à 2 milligrammes de fer, soit à 0,10 %.

Le but de l'emploi de la solution manganéuse est d'empêcher que du chlorure provenant d'une décomposition éventuelle de l'acide chlorhydrique de la liqueur d'attaque ne réagisse sur la solution de permanganate.

M. DUSAUGEY,
Ingénieur Civil des Mines.