

# CUIVRE LAITONS ALLIAGES

REVUE TECHNIQUE ET DE VULGARISATION



N° 69 - SEPTEMBRE - OCTOBRE 1962

# LE CUIVRE ET SES ALLIAGES

## DANS L'INDUSTRIE

### comportement

### DU CUIVRE ET DE SES ALLIAGES

### aux

### températures extrêmes

#### INTRODUCTION

La technique moderne exige de plus en plus des matériaux capables de résister mécaniquement aux températures extrêmes.

Dans l'aviation, par exemple, certains aciers doivent rester parfaitement rigides alors qu'ils sont portés à des températures de plusieurs centaines de degrés C; par contre, des récipients ou conduites traversés par des combustibles liquides pour fusées spatiales doivent conserver leurs propriétés mécaniques à des températures de  $-250^{\circ}\text{C}$ . Entre ces deux extrêmes s'étale toute

la gamme des températures intermédiaires, différentes de la température ambiante.

Lors de l'établissement d'un projet, ingénieurs et techniciens auront un besoin impératif de connaître le comportement d'un métal quelconque placé dans des conditions d'emploi déterminées. Généralement bien renseigné sur les données relatives aux caractéristiques à des températures normales, le chercheur ne trouvera que difficilement celles relatives aux températures anormales.

Nous tenterons ici de donner un aperçu des propriétés du cuivre et de ses alliages aux températures extrêmes.



TABLEAU 1  
INFLUENCE DE LA TEMPERATURE  
SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES DU CUIVRE (en  $^{\circ}\text{C}$ )

Température $^{\circ}\text{C}$ .....	20	600	850	1 000	1 083	1 083			
Densité .....	8,9	8,7	8,5	8,4	8,3 (1)	7,9 (2)			
Température $^{\circ}\text{C}$ .....	-225	-175	-75	-20	20 à 100	20 à 300	20 à 500		
Coefficient de dilatation .....	4,5	10,0	15,0	16,3	16,8	17,7	18,6	$\times 10^{-6}$	
Température $^{\circ}\text{C}$ .....	-273	-175	-75	0	400	800			
Chaleur spécifique cal/g/ $^{\circ}\text{C}$ .....	(0)	0,06	0,085	0,09	0,10	0,11			
Température $^{\circ}\text{C}$ .....	-269	-260	-246	-184	20	0	200	400	600
Conductibilité thermique cal/cm/s/ $^{\circ}\text{C}$ ..	17	32	11,5	1,3	0,93	0,91	0,89	0,87	0,84
Température $^{\circ}\text{C}$ .....	25	100	150	200	527	1 083			
Conductibilité électrique m/Ohm/mm <sup>2</sup> ..	58	47	41	35	20	8,7			
Température $^{\circ}\text{C}$ .....	-250	-184	-73	25	100	150	200	527	1 083
Résistivité électrique Ohm/mm <sup>2</sup> /m .....	<0,001	0,003	0,01	0,017	0,022	0,025	0,03	0,05	0,11 (1) 0,21 (2)

(1) solide. - (2) liquide.

**TABEAU 2**

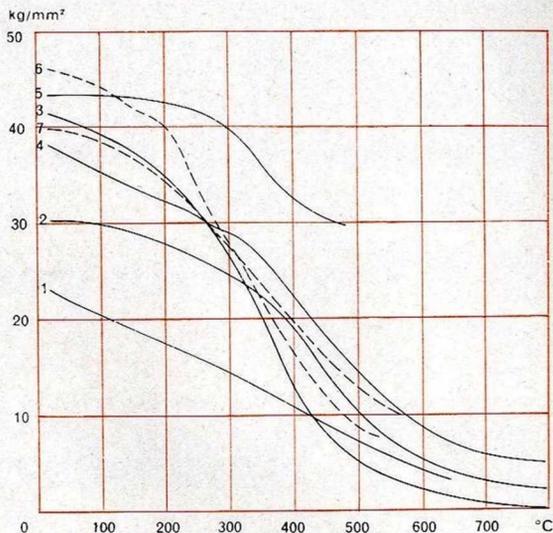
**INFLUENCE DE LA TEMPERATURE  
SUR LA CONDUCTIBILITE THERMIQUE  
ET LA RESISTANCE ELECTRIQUE DES ALLIAGES  
DE CUIVRE**

Métal ou alliage	Température °C	Conductibilité thermique	Résistance électr. spéc.
		cal cm sec C	Ohm mm <sup>2</sup> m
Cuivre désoxydé au phosphore ....	-184	≈ 0.50	
	20	0.74	0.023
	200	0.80	0.035
Laiton 95/5 .....	-184		0.015
	20	0.57	0.030
	200	0.64	0.043
Laiton 90/10 .....	-184		0.024
	20	0.45	0.040
	200	0.54	0.053
Laiton 80/20 .....	-184		0.036
	20	0.34	0.054
	200	0.41	0.070
Laiton 70/30 et 60/40 .....	-184		0.044
	20	0.30	0.062
	200	0.36	0.080
Laiton UZ 39 Pb 2 .....	20	0.27	0.067
	200	0.32	0.089
Cupro-nickel 70/30 Fe .....	20	0.07	0.363
	200	0.07	0.366
	500	0.09	0.375
Cupro-nickel 90/10 .....	20	0.15	0.141
	200	0.18	0.155
Maillechort à 18 % Ni .....	20	0.08	0.294
	200	0.10	0.308
Bronze phosphoreux UE 7 P .....	-184		0.116
	20	0.17	0.127
	200	0.20	0.141
Cupro-aluminium UA 10 .....	20	0.17	0.126
	200	0.19	0.156
Cupro-silicium-mangan. (3 Si/1 Mn)	20	0.08	0.266
	200	0.11	0.277
Cuivre au beryllium (2.2 Be).....	20	0.19	0.095
	200	0.23	0.112

**INFLUENCE DE LA TEMPERATURE  
SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES**

Des tableaux ci-joints on peut tirer les conclusions suivantes : le coefficient de dilatation, la chaleur spécifique et la résistance électrique varient en fonction directe de la température, tandis que la densité et la conductibilité électrique varient en fonction inverse.

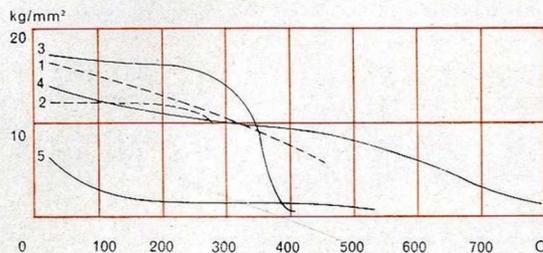
Les alliages de cuivre accusent à température élevée une légère augmentation de la conductibilité électrique; le cuivre, par contre, à basse température, possède une plus grande conducti-



**Fig. 1**

**Résistance à la traction du cuivre et de ses alliages à températures élevées.**

- 1 Cuivre désoxydé au phosphore (écroui 5-7 %)
- 2 Laiton 72/28 (recuit)
- 3 Laiton UZ 39 Pb 2 (recuit)
- 4 Cupro-nickel 70/30 (recuit)
- 5 Maillechort 66 Cu 10 Ni (étiré)
- 6 Cupro-aluminium 95/5 (recuit)
- 7 Cupro-silicium-manganèse 3 Si 1 Mn (recuit)



**Fig. 2**

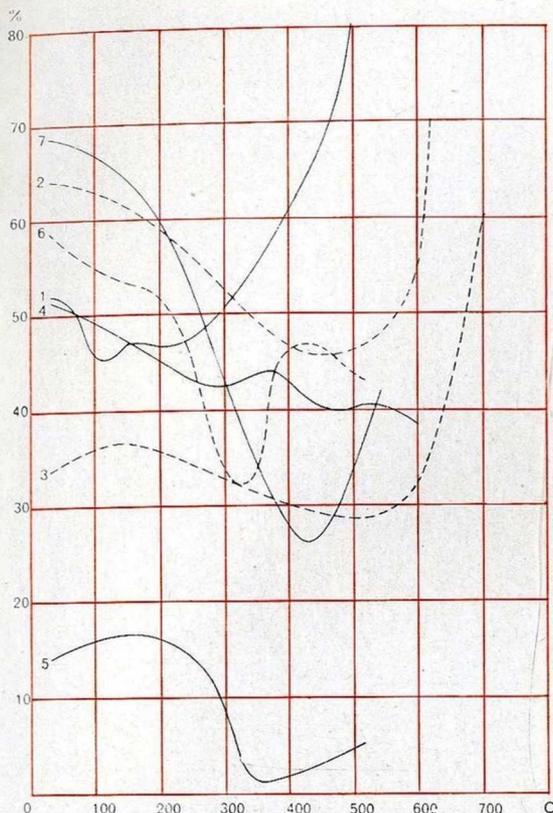
**Limite d'élasticité (0,2 %) du cuivre et de ses alliages à températures élevées.**

- 1 Cuivre désoxydé au phosphore (écroui 5-7 %)
- 2 Laiton 70/30 (recuit)
- 3 Laiton amirauté (recuit)
- 4 Cupro-nickel 70/30 (recuit)
- 5 Cupro-silicium-manganèse 3 Si 1 Mn (recuit)

**COMPORTEMENT  
A HAUTES TEMPERATURES**

La première condition qui détermine l'emploi d'un matériau est, certainement, celle de ses bonnes caractéristiques mécaniques. Celles-ci sont établies, en laboratoire, par des essais sur éprouvettes soumises à certaines contraintes parfaitement connues en grandeur et en temps : essais de traction, choc, fatigue. Ceux-ci se pratiquent, généralement, à température ambiante, mais peuvent tout aussi bien se faire à chaud sur des machines spécialement conçues à cet effet.

Quelques résultats portant sur la résistance, la limite élastique, l'allongement et le module d'élasticité du cuivre et de ses alliages — pour des températures comprises entre 20 et 800°C — sont consignés sur les figures 1 à 4.



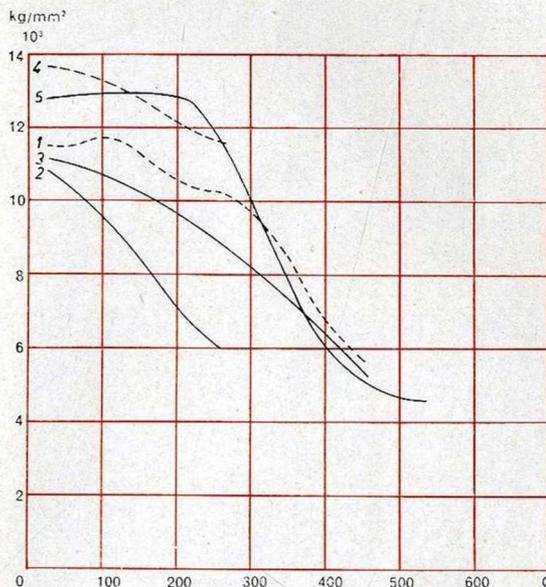
**Fig. 3**

**Allongement du cuivre et de ses alliages à températures élevées.**

- |   |                                       |                |
|---|---------------------------------------|----------------|
| 1 | Cuivre désoxydé au phosphore          | (écroui 5-7 %) |
| 2 | Laiton 72/28                          | (recuit)       |
| 3 | Laiton UZ 39 Pb 2                     | (recuit)       |
| 4 | Cupro-nickel 70/30                    | (recuit)       |
| 5 | Maillechort 66 Cu 10 Ni               | (étiré)        |
| 6 | Cupro-aluminium 95/5                  | (recuit)       |
| 7 | Cupro-silicium-manganèse<br>3 Si 1 Mn | (recuit)       |

bilité thermique. Au voisinage du zéro absolu, la résistance électrique spécifique du cuivre est extrêmement faible, avant même qu'intervienne le phénomène de supra-conductivité. Cette propriété est exploitée industriellement dans le cas d'électro-aimants remplis d'hydrogène liquide, et d'un nouveau commutateur (cryotron) travaillant à — 269°C environ.

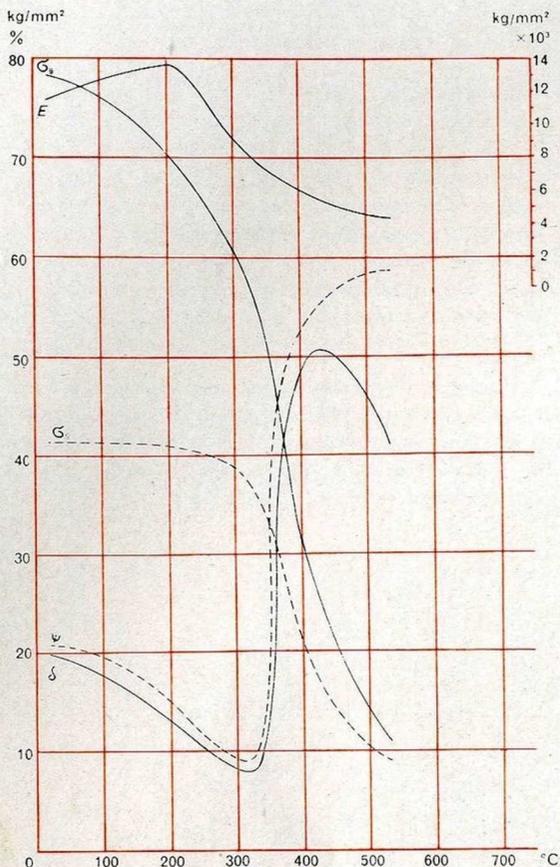
Enfin, le constructeur sera intéressé par les valeurs relatives aux caractéristiques mécaniques : résistance, limite élastique, allongement et, également, comportement sous efforts continus ou alternés.



**Fig. 4**

**Module d'élasticité du cuivre et de ses alliages à températures élevées.**

- |   |                                       |          |
|---|---------------------------------------|----------|
| 1 | Cuivre désoxydé au phosphore          | (recuit) |
| 2 | Laiton 60/40                          | (recuit) |
| 3 | Laiton amirauté                       | (recuit) |
| 4 | Cupro-nickel 90/10                    | (recuit) |
| 5 | Cupro-aluminium 92/8 avec<br>2,6 % Fe | (recuit) |



**Fig. 5**

**Propriétés mécaniques d'un cupro-aluminium à plusieurs constituants.**

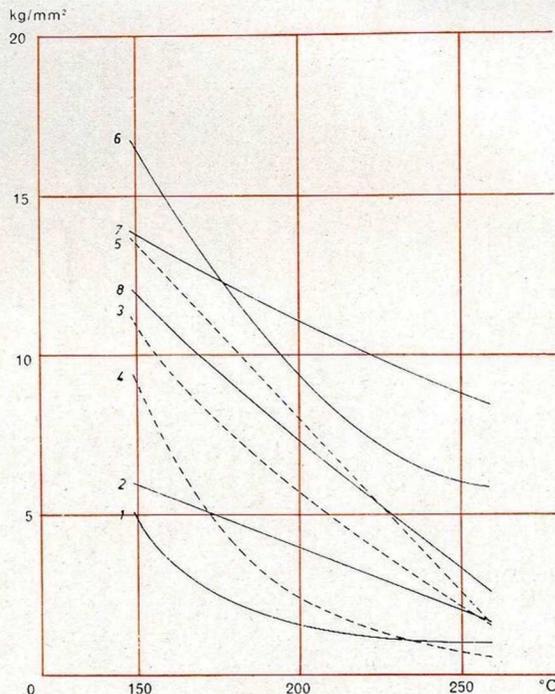
(Cu 81,2 %, Al 10,1 %, Fe 3,0 %, Ni 5,75 % recuit)

$\sigma_B$	Résistance à la traction	kg/mm <sup>2</sup>
$\sigma_S$	Limite d'élasticité	kg/mm <sup>2</sup>
$\delta$	Allongement	%
$\psi$	Striction	%
E	Module d'élasticité	kg/mm <sup>2</sup>

La figure 5 indique les propriétés du cupro-aluminium entre 20 et 540°C. Lorsque la température augmente, la résistance, la limite élastique et le module d'élasticité subissent un abaissement général.

L'allongement et la striction du cuivre, et de la plupart de ses alliages, diminuent à température élevée mais augmentent sensiblement au-delà de la température de recristallisation.

Dans les essais pratiqués à température ambiante, le facteur vitesse est plus ou moins négligeable. Il en va tout autrement lorsque l'on travaille à températures élevées et la vitesse intervient de façon primordiale dans les résultats.



**Fig. 6**

**Limite de fluage (0,01 % en 1 000 h) du cuivre et de ses alliages à températures élevées.**

- |   |  |          |
|---|--|----------|
| 1 | Cuivre désoxydé au phosphore                   | (recuit) |
| 2 | Laiton 85/15                                   | (recuit) |
| 3 | Laiton 70/30                                   | (recuit) |
| 4 | Laiton à l'aluminium 76/22/2                   | (recuit) |
| 5 | Laiton amirauté                                | (recuit) |
| 6 | Cupro-nickel 90/10 Fe                          | (recuit) |
| 7 | Cupro-aluminium spec. (9,7 Al, 2,6 Fe, 4,8 Ni) | (recuit) |
| 8 | Bronze phosphoreux 95/5                        | (recuit) |

On peut simplement considérer la limite d'élasticité à chaud comme la charge maximale que peut supporter le matériau sans subir de déformation permanente.

A température élevée, les matériaux métalliques se déforment sous un effort constant par suite d'un phénomène d'écoulement fonction des charges appliquées et de leur temps d'application : c'est le fluage. A cause du fluage, les caractéristiques relevées sont en général bien inférieures à celles correspondantes aux essais aux températures de service.

Ici intervient la notion de limite de fluage, que l'on peut considérer comme la contrainte sous laquelle l'allongement d'une éprouvette se stabilise, ou n'augmente que de façon minime après un certain temps.

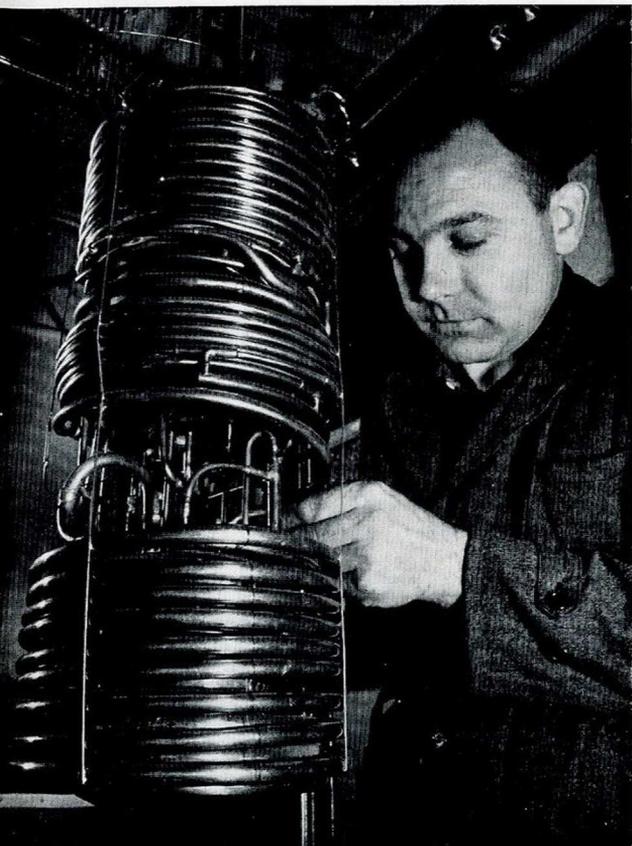


Fig. 7

Liquéfacteur mixte d'hydrogène et d'hélium.  
On distingue la partie intérieure de l'appareil  
qui comporte des tubes de cuivre (Doc. T.B.T. Grenoble).



Fig. 8

Vue générale du liquéfacteur en production  
d'hydrogène liquide (T.B.T. Grenoble).

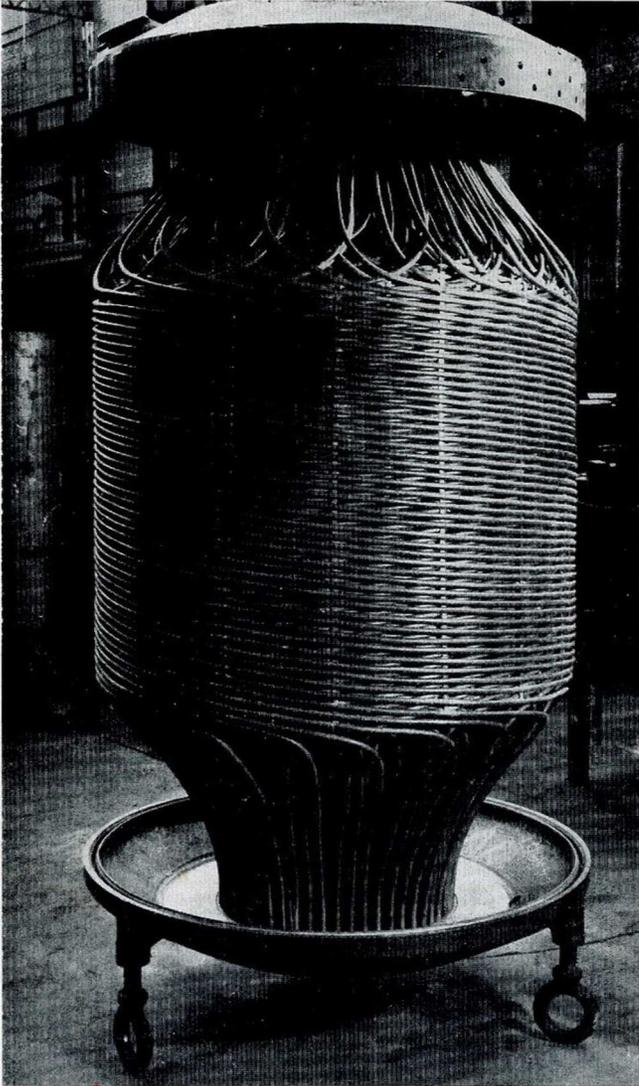


Fig. 9

Vaporisateur auxiliaire bobiné pour oxytonne  
(Air Liquide, Usine de Champigny-sur-Marne)

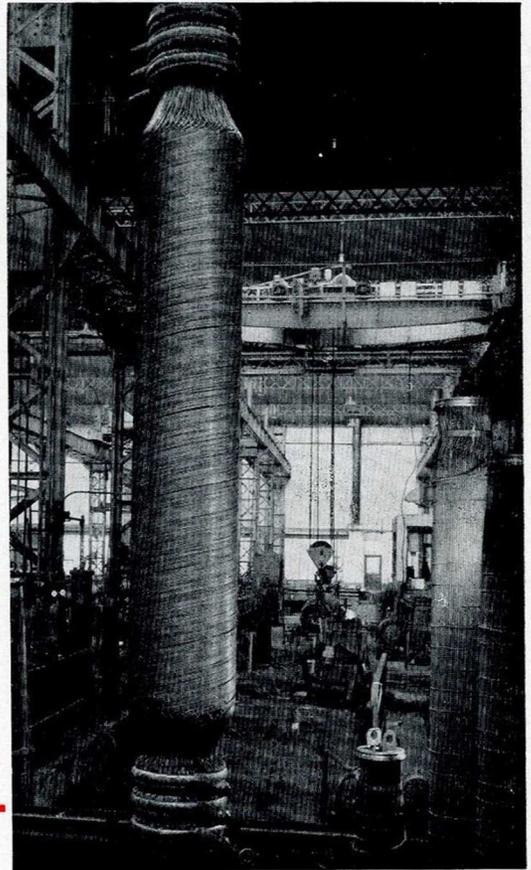


Fig. 10

Echangeur bobiné à collecteur torique triple,  
à haute pression (200 kg/cm<sup>2</sup>) pour appareil oxytonne.  
(Air Liquide, Usine de Champigny-sur-Marne)

En général, la charge admissible, sous laquelle un matériau subit un allongement déterminé (1), est obtenue expérimentalement et les résultats figurent sur une courbe temps/allongement.

La figure 6 indique — pour des températures comprises entre 150 et 260°C — les limites de fluage pour le cuivre et certains alliages. On constate que les cupro-aluminiums sont parmi ceux qui résistent le mieux aux hautes températures.

La charge limite des cupro-aluminiums atteint 9,5 à 16 kg/mm<sup>2</sup> lorsque l'allongement ne dépasse pas 0,001 % par jour. Si l'allongement toléré va jusqu'à 0,01 %, les charges peuvent alors atteindre 16 à 25 kg/mm<sup>2</sup>.

Pour une charge déterminée la vitesse de fluage dépend, non seulement de la composition chimique et de la température, mais aussi du traitement thermique, donc de la dureté et de la grosseur du grain.

Dans le cas d'un alliage ductile, si la déformation admissible d'un élément est très faible, la durée de service peut être limitée, non par sa rupture mais par son allongement. C'est pourquoi les tolérances sur dimensions et déformations ne doivent pas être indûment limitées afin de ne pas trop réduire la charge maximale.

C'est ainsi, par exemple, que la contrainte admissible d'un bronze phosphoreux à 5 % d'étain, état recuit, ne doit pas dépasser 0,5 kg/mm<sup>2</sup> à 260°C, si la déformation tolérée après 5 000 heures doit rester inférieure ou égale à 0,007 %. Cette contrainte passe à 7,4 kg/mm<sup>2</sup> si l'allongement admissible est de 1,1 %.

Par ailleurs, en dehors des essais classiques sous charge constante, des essais de fatigue sont nécessaires pour bien connaître un matériau.

Dans ces essais une éprouvette est soumise, sous une certaine charge, à des alternances en très grand nombre. L'éprouvette tient pendant un certain temps et se rompt, ou bien tient indéfiniment. A chaud, de nombreux facteurs entrent en jeu : charge, nombre de cycles, fréquence et mode d'essai. La résistance à la fatigue des alliages à durcissement structural est influencée par le traitement thermique. Par exemple, un cupro-aluminium à 9 % d'Al, 5 %

de Ni et 5 % de Fe, écroui à 50 %, possède une résistance à la fatigue de 30 kg/mm<sup>2</sup> à 20°C, et de 25 kg/mm<sup>2</sup> à 400°C, pour 25 × 10<sup>6</sup> alternances.

Dans certaines conditions de service, des contraintes thermiques se superposent aux contraintes mécaniques et provoquent une sollicitation additionnelle. Les tubes d'un échangeur de chaleur, exposés à un flux de chaleur constant, subiront une déformation uniforme. Des pièces métalliques autres peuvent subir, en service, des dilatations et contractions consécutives comparables à un essai de fatigue.

Si les déformations occasionnées par les variations de température atteignent un certain degré, des ruptures par fatigue peuvent en résulter.

En dehors des questions mécaniques, la résistance à haute température doit tenir compte des attaques chimiques de l'atmosphère (oxygène de l'air).

Métaux nobles exclus, tous les matériaux métalliques s'oxydent à haute température. Le degré d'attaque dépend principalement de la propriété du matériau de se recouvrir d'une couche protectrice dont la formation peut être provoquée par de simples additions en faibles proportions. L'oxydation des laitons  $\alpha$ ,  $\beta$  est considérablement diminuée par l'adjonction de 0,05 % à 0,20 % d'aluminium. Il se forme, dans ce cas, une couche d'oxyde protégeant le métal sous-jacent. Les cupro-aluminiums à teneur égale ou supérieure à 5 % d'aluminium résistent particulièrement bien aux températures élevées.

Des déformations mécaniques, des efforts alternés ou des contraintes thermiques, peuvent provoquer le déchirement et l'écaillage de la couche protectrice, et donner ainsi naissance à une destruction par corrosion localisée.

Le comportement aux chocs est contrôlé par l'essai de résilience qui montre que celle du cuivre et de ses alliages est excellente.

Le tableau n° 3 indique quelques chiffres de résilience sur alliages de cuivre. La résilience diminue, en général, avec l'écrouissage et l'augmentation de température.

A certaines températures élevées, la résilience des laitons est inférieure à 1,5 kgm/cm<sup>2</sup>. Le domaine de cette fragilité à chaud s'étend de 320 à 700°C pour les laitons à 65/70 % de cuivre, et de 320 à 580°C pour ceux à 58/60 % de cuivre.

(1) 0,1 % en 10 000 heures par exemple.

TABLEAU 3

RESILIENCE DU CUIVRE ET DE SES ALLIAGES A TEMPERATURES ELEVEES (en mkg/cm<sup>2</sup>)

Métal ou alliage	Etat	Température °C										Essai		
		20	100	150	200	250	300	350	400	450	500		550	
Cuivre désoxydé .....	recuit	8,1	6,4	6,1	5,6									C
Laiton 90/10 .....	recuit	6,0	5,5	5,2	4,8	4,5	4,1	3,8	2,9	2,6	2,4	2,6	I	
Laiton 80/20 .....	recuit	8,4	7,6	7,3	6,6	5,7	4,5	3,6	2,9	2,2	2,0	2,1	I	
Laiton 70/30 .....	recuit	7,7	7,4	7,3	7,1	6,3	4,3	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	I	
Laiton 63/37 .....	écroui	10,0	10,1	10,5		3,3	0,7		0,6		0,7		C	
Laiton 60/40 .....	recuit	9,5	8,6	8,1	7,4	6,4	3,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	I	
Laiton UZ 39 Pb 2 .....	recuit	3,8	4,1	3,7		3,9	0,7		0,6		0,8		C	
Laiton amirauté 70/29/1 Sn .....	recuit	10,5	3,3	8,3	7,8								C	
Cupro-nickel 70/30 .....	recuit	11,5	9,2	9,1	8,7								C	
Cupro-aluminium 90/10 .....	normalisé	10,4	10,0		10,2		13,3	10,0	5,2	2,6	2,2	3,3	C I	
Cupro-aluminium spécial (9 Al/5 Fe/5 Ni) ...	forgé	2,2	2,3		3,5		3,8	3,1	3,1	2,9	2,4	2,1	C I	
Cupro-silicium-manganèse (3 Si/1 Mn) .....	recuit	11,5	10,3	9,5	8,7								C	

C Essai Charpy - I Essai Izod - C I Essai combiné Charpy-Izod.

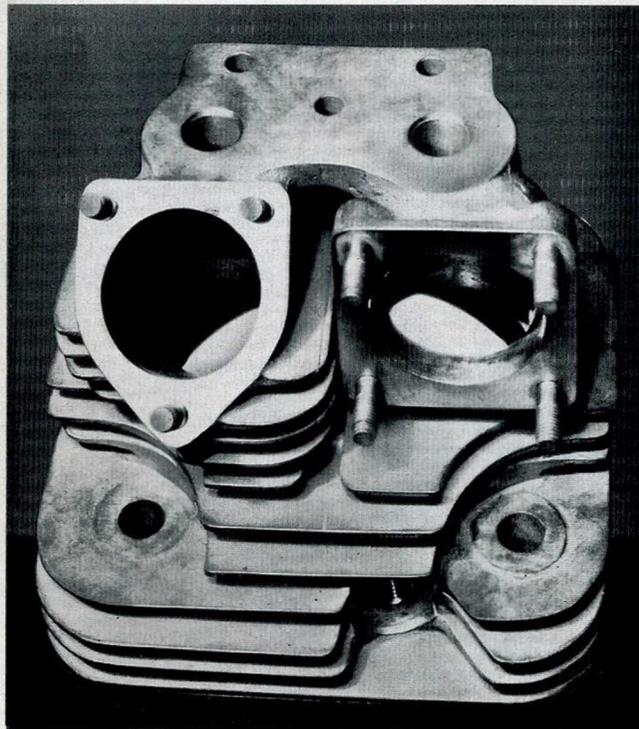


Fig. 11  
Tête de cylindre pour  
moteurs d'avions en  
bronze à l'aluminium  
coulé.

**TABLEAU 4**
**PROPRIETES MECANIQUES DU CUIVRE ET DE SES ALLIAGES A TEMPERATURE AMBIANTE ET A -180°C**

Métal ou alliage	Etat	Température °C	Résistance à la traction kg/mm <sup>2</sup>	Limite d'élasticité kg/mm <sup>2</sup>	Allongement %	Striction %	Résilience mkg/cm <sup>2</sup>
Cuivre électrolytique .....	recuit	20	22.1	6.0	48	76	7.4 I
		-180	40.8	8.1	58	77	8.6 I
	écroui 50 %	20	41.3	37.6	8.4	51.5	6.6 C
		-183	45.6	42.0	11.2	61.2	7.4 C
Laiton 70/30 .....	recuit	20	35.9	19.8	49	77	11.4 I
		-180	51.7	20.8	75	73	13.5 I
Laiton 67/33 .....	recuit	23	40.1	27.6	50.4	72	14.4 C
		-183	53.7	40.2	50.8	70.7	14.1 C
	écroui 40 %	23	60.0	59.5	6.3	66.5	8.1 C
		-183	72.3	71.5	10.1	66.5	9.4 C
Laiton 60/40 .....	recuit	20	40.5	14.0	51.3	75.5	8.6 C
		-183	53.3	20.0	55.3	71.0	8.3 C
	écroui 25 %	20	56.0	40.0	19.8	65.5	5.1 C
		-183	69.2	56.3	24.4	64.1	5.3 C
Laiton UZ 39 Pb 1 .....	recuit	20	37.1	14.5	50.2	62.5	4.4 C
		-183	48.5	20.3	50.6	62.1	4.6 C
	écroui 12 %	20	44.9	32.2	28.2	57.0	2.2 C
		-183	60.9	49.2	30.8	57.0	2.2 C
Cupro-nickel 70/30 .....	recuit	24	38.2	15.1	52	80.5	18.1 C
		-196	58.8	21.7	61.5	77.5	21.8 C
Cupro-nickel 80/20 .....	recuit	20	36.2	19.5	26	78	13.3 I
		-180	51.8	22.8	36	72	14.7 I
Cupro-nickel 90/10 .....	recuit	14	32.4	28.8	37	68.5	10.0 C
		-196	45.4	33.4	46	50.5	11.4 C
Cupro-nickel au fer 95/5 Fe .....	recuit	14	28.8	24.1	37	70.5	23.2 C
		-196	39.5	27.1	51	55.0	26.8 C
Maillechort (64 Cu/17 Ni) .....	recuit	20	45.7	20.7	47	62	—
		-180	58.4	26.7	57	70	—
Maillechort (55 Cu/30 Ni) .....	recuit	20	52.9	19.6	33	53	13.8 I
		-180	73.3	20.0	41	55	15.0 I
Bronze phosphoreux UE 5 P .....	recuit	20	43.3	—	36	65	—
		-180	65.5	—	56	53	—
Bronze phosphoreux UE 7 P .....	dur	27	84	78	20	—	—
		-253	120	108	25	—	—
Cupro-aluminium 93/7 .....	recuit	20	54.3	13.7	26	29	4.1 I
		-180	67.5	20.5	29	30	3.6 I
Cupro-aluminium spécial (10 Al/3 Fe/ 4,75 Ni) ..	recuit	20	79.0	41.6	20	21	2.6 C
		-180	86.1	48.1	8	30	1.5 C
Laiton spécial (56 Cu/1,4 Mn/1,2 Pb/1 Fe) .....	recuit	20	50.9	16.9	23	44	3.4 I
		-180	66.6	20.2	37	41	3.6 I
Cupro-silicium manganèse (3 Si/1 Mn) .....	écroui 40 %	25	52.1	—	39.8	75.1	12.5 C
		-190	70.7	—	36.2	72.5	10.3 C
Cuivre au beryllium .....	trempé, revenu	20	131.2	88.2	2.6	5.0	0.3 I
		-180	150.7	109.0	3.0	6.0	0.5 I

C : Essai Charpy - I : Essai Izod.

TABLEAU 5

RESISTANCE A LA FATIGUE DE QUELQUES ALLIAGES DE CUIVRE A TEMPERATURE AMBIANTE ET A BASSE TEMPERATURE

Alliage	Température °C	Nombres d'alternances	Charge admissible kg/mm <sup>2</sup>
Laiton UZ 36 Pb 2 .....	20	5/10 <sup>7</sup>	18,3
	— 40		19
Cupro-aluminium spécial (9 Al/1 Fe/0,5 Ni/0,5 Sn)	25	10 <sup>6</sup>	28
	— 78		35
	—196		46
	— 73		31
Cupro-beryllium .....	27	10 <sup>6</sup>	23
	— 73		31

### L'EMPLOI DES ALLIAGES A HAUTES TEMPERATURES

Il est évident que les alliages de cuivre en général tiennent moins bien aux hautes températures que certains aciers ou alliages spéciaux. Néanmoins, le cuivre et ses alliages, grâce à leur excellente tenue à la corrosion, sont propres à de nombreuses applications à températures moyennement élevées : collecteurs de moteurs, électrodes de machines à souder. Celles-ci, en alliage de cuivre au chrome, gardent leurs propriétés mécaniques jusqu'à des températures de 350°C. L'addition d'autres éléments tels que nickel, aluminium, manganèse, améliorent également la résistance à température élevée.

Quelques cupro-aluminiums se distinguent, jusqu'à 450°C, par un faible abaissement de la charge de rupture, une bonne résistance au fluage et une oxydation négligeable.

Ces alliages sont employés pour sièges de soupapes, chemises de cylindres, mâchoires de machines à souder par résistance, brides de raccordement de fours électriques. Le cupro-aluminium à 9 % d'Al, 5 % de Ni, 5 % de Fe, a fait ses preuves dans la construction aéronautique, pour des températures de service comprises entre 350 et 450°C, là où les autres alliages d'aluminium et de magnésium perdent leur résistance mécanique.

Cet alliage résistant à l'oxydation est facile à forger entre 900 et 950°C, et est employé en grandes quantités pour les aubes de compresseurs des turbines à gaz. Les pièces de ce bronze spécial, forgées à chaud, présentent une résis-

TABLEAU 6

POINTS D'EBULLITION DES GAZ LIQUEFIES (à 1 atm.)

Gaz	Point d'ébullition	
	°C	°K
Freon 12 .....	— 30	243
Ammoniaque .....	— 33,3	240
CO <sub>2</sub> .....	— 78,5	194,6
Méthane .....	—161,5	111,7
Oxygène .....	—183,0	90,1
Fluor .....	—188,1	85,0
Azote .....	—195,8	77,3
Néon .....	—245,9	27,2
Deuterium .....	—249,5	23,6
Hydrogène .....	—252,8	20,4
Hélium .....	—263,9	4,26

T°K (Kelvin) = t°C + 273.15.

tance à la traction supérieure à 71 kg/mm<sup>2</sup> à 20°C et de 38 kg/mm<sup>2</sup> à 400°C. La résistance à la fatigue d'une éprouvette écrouie à 50 % atteint 15,9 kg/mm<sup>2</sup> à 300°C, et 6,3 kg/mm<sup>2</sup> à 400°C, pour un allongement admissible de 0.3 % après 2 000 heures.



### LE COMPORTEMENT A BASSES TEMPERATURES

Pour la plupart des métaux, les basses températures provoquent une diminution très sensible des qualités mécaniques, rendant, par exemple, certains aciers cassants comme du verre. Avec le cuivre et ses alliages les basses températures provoquent, au contraire, l'amélioration de toutes les caractéristiques mécaniques importantes. La dureté, la limite élastique et la résistance à la traction s'accroissent considérablement; la ductilité, même, est légèrement augmentée. La charge de rupture et la résistance au cisaillement sont doublées à — 250°C. L'amélioration de la ductilité du cuivre pur est plus prononcée, en général, à l'état écroui qu'à l'état recuit.

Le tableau 5 indique qu'aux basses températures la résistance au fluage est également augmentée.

La plupart des alliages de cuivre ont une ténacité excellente jusqu'à la température de l'hélium liquide (— 269°C). Seuls, les alliages à durcissement structural, comme le bronze au

béryllium ou certains alliages contenant du nickel ainsi que certains alliages de fonderie, présentent un abaissement modéré de la résilience aux très basses températures.

Les normes américaines A.S.T.M. exigent, pour les éléments d'installation opérant à basses températures, une résilience normale de 2,6 kgm/cm<sup>2</sup> et 3,5 kgm/cm<sup>2</sup> lorsqu'il y a sollicitations par chocs et vibrations.

Le tableau 4 donne un aperçu des propriétés les plus importantes de divers alliages de cuivre à température ambiante et à -180°C.

### EMPLOI DU CUIVRE ET DE SES ALLIAGES A BASSES TEMPERATURES

Grâce à leur excellent comportement, le cuivre et ses alliages conviennent parfaitement pour la fabrication des appareils travaillant aux basses températures. Ils sont tous employés dans la technique du froid (armoires frigorifiques, colonnes de distillation, condenseurs, transport et stockage d'hydrogène liquide). Ces fabrications font appel, non seulement aux tôles et tubes de faible épaisseur (échangeurs), mais encore de forte épaisseur (récipients pour industrie chimique).

Les températures de service varient de -30°C à -253°C pour hydrogène liquide (voir tableau 6).

Un exemple intéressant d'emploi des tubes de cuivre dans la technique des très basses températures est fourni par les colonnes de rectification destinées à la séparation de l'hydrogène liquide dans une installation pour la fabrication de l'eau lourde. Aux Etats-Unis, l'hydrogène liquide est produit en énormes quantités comme combustible pour fusées, alors que l'hélium liquide sert à certains appareils électroniques.

Dernièrement, la presse technique annonçait un nouveau refroidisseur magnétique capable de produire la température de -272,9°C. L'appareil est essentiellement composé d'un ruban de plomb connecté électro-magnétiquement, d'une bobine en lamelles de cuivre plaquées argent, le tout enfermé dans une cage en maillechort enduite de matière plastique.

### COMPORTEMENT DES BRASURES ET SOUDURES A BASSES TEMPERATURES

La plupart des appareils frigorifiques comportent des joints brasés ou soudés dont l'exécution doit être très soignée.

On sait que l'étain pur, aux températures inférieures à -13°C, peut subir certaines transformations. D'après les recherches de l'Institut Battelle, les soudures à l'étain et les brasures tendres contenant de 0,01 à 0,1 % de bismuth ne subissent pratiquement pas de transformation à basses températures. Les brasures tendres (50% étain/50 % phosphore) deviennent, cependant, cassantes aux températures inférieures à -110°C et ne conviennent donc pas dans la technique du froid. Par contre, certaines brasures tendres, riches en plomb (étain inf. à 15 %), présentent une bonne ductibilité et une bonne ténacité jusqu'à -200°C.

En général, la résistance mécanique et la ténacité des brasures dans les installations à basses températures doivent toujours être au moins égales à celles du métal de base.

De toutes façons, on aura toujours intérêt à éliminer, par un traitement thermique de détente, les tensions internes créées par suite des soudures, tensions qui pourraient nuire à la bonne tenue des appareils dans le temps et provoquer des accidents.

Dr. Kurt P. CAMENISCH.

(D'après « Pro Metal », N° 35, février 1962)



Nous avons omis de signaler que le matériel représenté sur les photos illustrant l'article « Brasage de grosses pièces de contact en cuivre », paru dans le N° 68 (juillet-août, p. 13), était de provenance : *Matériel Electrique S.W.*