

## GÉNÉRALITÉS SUR LE CUIVRE ET SES ALLIAGES

### 1.1 INTRODUCTION

Le cuivre et ses alliages peuvent être soudés par la plupart des méthodes actuellement en usage, dans des conditions qui sont précisées au cours des chapitres suivants.

Pour faciliter l'application de ces données, il a paru utile de rappeler, sommairement, les caractéristiques principales de ces matériaux en insistant plus spécialement sur celles qui ont un rapport avec l'aptitude au soudage.

### 1.2 DÉFINITIONS ET PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES\*

#### 1.2.1 Cuivre commercialement pur

Les différentes classes de cuivre se distinguent essentiellement par leurs teneurs résiduelles en oxygène ou en phosphore qui en déterminent les possibilités d'emploi et de mise en œuvre ; au nombre de trois, elles sont définies par la norme NF A 53 100.

##### 1.2.1.1 Cuivres raffinés contenant de l'oxygène

Cette classe comprend les nuances **Cu/a<sub>1</sub>** (affiné électrolytiquement), la plus courante, et **Cu/a<sub>2</sub>** (affiné thermiquement).

Il s'agit de cuivres à hautes conductivités électrique et thermique ; leur pureté est d'au moins 99,90 % ; ils renferment de 0,03 à 0,10 % d'oxygène, ce qui les rend sensibles aux atmosphères réductrices à chaud et difficilement soudables (voir § 4-5).

##### 1.2.1.2 Cuivre raffiné désoxydé au phosphore

Cette nuance, désignée par le symbole **Cu/b**, titre également plus de 99,90 % de cuivre et contient de 0,013 à 0,050 % de phosphore résiduel provenant de la désoxydation complète des cuivres précédents.

\* Pour des détails complémentaires, consulter la brochure « Propriétés générales du cuivre et de ses alliages », éditée par le Centre d'Information Cuivre, Laiton, Alliages.

Ce cuivre est insensible aux atmosphères réductrices et parfaitement soudable, mais le phosphore diminue les conductivités électrique et thermique d'environ 20 %.

#### 1.2.1.3 Cuivres raffinés exempts d'oxygène et de phosphore

Ces cuivres, dont il existe deux nuances : **Cu/c<sub>1</sub>** ( $\text{Cu} \geq 99,94\%$ ) et **Cu/c<sub>2</sub>** ( $\text{Cu} \geq 99,96\%$ ) réunissent les avantages des deux classes précédentes : conductivités élevées, insensibilité aux atmosphères réductrices et très bonne aptitude au soudage.

#### 1.2.2 Cuivres faiblement alliés

On désigne ainsi différents alliages à base de cuivre dans lesquels les teneurs en éléments d'addition, généralement inférieures à 1 %, ont pour effet d'améliorer certaines caractéristiques du cuivre sans altérer trop fortement ses conductivités.

##### 1.2.2.1 Cuivre à l'argent (Ag = 0,03 à 0,10 %)

A l'état écroui, ce cuivre peut être chauffé jusqu'à 300 °C environ sans s'adoucir notablement, ce qui permet d'effectuer certaines opérations comme l'étamage ou l'émaillage de fils au cours desquelles le cuivre pur serait recuit.

##### 1.2.2.2 Cuivre au tellure (Te = 0,3 à 0,7 %)

Ce cuivre possède une aptitude à l'usinage comparable à celle du laiton de décolletage, grâce à l'addition de tellure qui forme avec le cuivre un composé insoluble, finement disséminé, favorisant la rupture des copeaux.

Les autres caractéristiques générales de ces deux alliages sont les mêmes que celles du cuivre à partir duquel ils ont été élaborés (sensibilité à chaud aux gaz réducteurs s'il s'agit de cuivre renfermant de l'oxygène, par exemple). En particulier, ces cuivres ne peuvent être durcis que par écrouissage et le seul traitement thermique qui leur soit applicable est le recuit.

D'autres cuivres faiblement alliés peuvent atteindre, par traitement thermique (durcissement structural\*) des résistances mécaniques élevées.

Ce traitement comprend une **trempe de mise en solution** (refroidissement rapide après maintien à une température propre à chaque alliage) suivie d'un **revenu durcissant** (réchauffage à une température moyenne, également particulière à chaque alliage) (voir Tableau I).

Entre ces deux opérations, on peut effectuer une déformation plastique à froid (laminage, étirage, etc.) qui permet d'obtenir, par l'effet supplémentaire d'écrouissage, une résistance mécanique plus élevée que par traitement thermique seul.

En règle générale, la conductivité électrique de ces alliages est d'autant plus faible que leur résistance mécanique est plus forte.

Les principales nuances industrielles d'alliages cuivreux à durcissement structural sont les suivantes :

#### 1.2.2.3 Cuivre au chrome (Cr = 0,60 à 1 %, avec, éventuellement, Zr = 0,08 %).

Cet alliage présente, après traitement thermique, une conductivité électrique élevée (80 % IACS) associée à des caractéristiques mécaniques modérées, mais nettement plus élevées que celles du cuivre pur (Tableau I).

#### 1.2.2.4 Cuivre au cobalt-béryllium (Co = 2,6 %, Be = 0,4 %)

Cet alliage est le plus courant des cuivres à durcissement structural associant une conductivité électrique moyenne (48 % IACS) à des caractéristiques mécaniques élevées (Tableau I).

#### 1.2.2.5 Cuivre au béryllium (Be = 1,8 à 2 %, Co et/ou Ni = 0,2 à 0,6 %)

Cette nuance, dont il existe quelques variantes à teneurs plus faibles en béryllium, acquiert par traitement thermique des caractéristiques mécaniques très élevées, mais n'a qu'une conductivité électrique relativement faible pour un alliage cuivreux (22 % IACS) (voir Tableau I).

### 1.2.3 LAITONS

Les laitons sont des alliages à base de cuivre et de zinc renfermant de 5 à 45 % de ce dernier.

#### 1.2.3.1 Laitons simples.

Ce sont ceux qui sont constitués uniquement de cuivre et de zinc.

\* Voir la brochure « Traitements thermiques du cuivre et de ses alliages », éditée par le Centre d'Information Cuivre, Laiton, Alliages.

\* Pour des détails complémentaires, consulter la brochure « Les Laitons », éditée par le Centre d'Information Cuivre, Laiton, Alliages.

Au-dessous de 36 % de zinc, notamment dans la gamme de 30 à 36 %, ces laitons présentent une aptitude très élevée au formage à froid permettant, par exemple, des emboutissages profonds.

Au-dessus de 36 % de zinc, les aptitudes au formage à chaud (filage, matriçage) et à l'usinage deviennent prépondérants.

#### 1.2.3.2 Laitons au plomb (Zn = 33 à 42 %, Pb = 1 à 3,5 %)

Ces alliages sont particulièrement destinés à l'usinage à grande vitesse de coupe.

Selon leurs teneurs en zinc et en plomb, ces laitons peuvent satisfaire des exigences de mise en œuvre très variées :

- décolletage pur : Cu-Zn 40 Pb3,
- décolletage et légères déformations à froid : Cu-Zn 36 Pb3,
- matriçage avec reprises d'usinage : Cu-Zn 39 Pb2,
- frappe à froid avec reprises d'usinage : Cu-Zn 35 Pb2.

#### 1.2.3.3 Laitons spéciaux

Leur teneur en cuivre est comprise entre 52 et 70 % et ils renferment, outre le zinc, différents éléments d'additions, seuls ou associés, dans les proportions suivantes :

Al ≤ 5 %	Ni ≤ 5 %	Fe ≤ 3 %
Mn ≤ 4 %	Sn ≤ 2 %	Pb ≤ 3 %

selon leur nature et leurs teneurs, ces additions améliorent les caractéristiques mécaniques, l'aptitude au frottement, la résistance à la corrosion, etc.

Les caractéristiques mécaniques des laitons sont fortement influencées par la teneur en zinc (et en éléments d'additions pour les laitons spéciaux), par l'écrouissage et, à l'état recuit, par la grosseur du grain.

### 1.2.4 BRONZES

Les bronzes sont essentiellement des alliages de cuivre et d'étain.

Ils contiennent de 5 à 20 % d'étain. Les additions les plus fréquentes sont :

- le zinc : 1 à 7 %,
- le plomb : 3 à 7 % pour les usages généraux, jusqu'à 30 % pour les alliages de frottement,
- le phosphore : 0,01 à 0,5 %, provenant de l'excès utilisé pour la désoxydation et qui, aux plus fortes teneurs, améliore les propriétés de frottement.

En raison de leur excellente aptitude au moulage, les bronzes sont surtout des alliages de fonderie. Néanmoins, certaines nuances à moins de 10 % d'étain, sont utilisées à l'état corroyé sous forme de barres, tôles, bandes, rubans, fils et tubes.

### 1.2.5 CUPRO-ALUMINIUMS

Les cupro-aluminiums sont des alliages à base de cuivre qui contiennent de 4 à 14 % d'aluminium.

Des additions, simultanées ou non, de fer ( $\leq 5\%$ ), de nickel ( $\leq 5\%$ ) et de manganèse ( $\leq 3\%$ ) sont couramment effectuées pour relever certaines caractéristiques, telles que la résistance mécanique, la tenue à la fatigue et à la corrosion marine.

Les nuances à moins de 8 % d'aluminium sont destinées au travail à froid (laminage, emboutissage), tandis que celles qui sont plus riches en aluminium sont mieux adaptées au moulage, au travail à chaud (filage, matriçage) et au soudage.

Ces dernières présentent par ailleurs des transformations structurales au chauffage et au refroidissement dont il est nécessaire de tenir compte dans les opérations de soudage (voir § 4.7.1).

Les cupro-aluminiums sont caractérisés par une résistance élevée à la plupart des types de corrosion, alliée à des caractéristiques mécaniques qui, pour certaines compositions, sont du même ordre que celles des aciers de construction.

### 1.2.6 CUPRO-NICKELS

Le cuivre et le nickel sont mutuellement solubles en toutes proportions à l'état solide.

Les principales nuances industrielles ont des teneurs nominales en nickel de 5, 10, 20, 30, 40 et 45 %, avec éventuellement de faibles additions de fer ( $\leq 3\%$ ) et de manganèse ( $\leq 1,5\%$ ).

Certains cupro-nickels spéciaux au silicium (Ni 2 à 3 %, Si 1 %) ou à l'aluminium (Ni 14 %, Al 2 %) offrent des possibilités de durcissement structural par trempe et revenu.

La propriété dominante des cupro-nickels est leur excellente résistance à la corrosion par l'eau de mer circulant à grande vitesse, et à de nombreux agents chimiques.

Les formes les plus courantes sont corroyées (tubes pour échangeurs thermiques, notamment), mais il existe certaines nuances adaptées au moulage.

### 1.2.7 MAILLECHORTS

Ce sont des alliages de cuivre (38 à 66 %), de nickel (7 à 28 %) et de zinc (17 à 45 %).

Les maillechorts pauvres en cuivre (40 à 45 % environ, avec 8 à 15 % de nickel) sont forgeables à chaud, tandis que les nuances à plus de 55 % de cuivre sont très malléables à froid et facilement mises en forme par laminage, emboutissage, etc.

Il existe également des maillechorts à 1,5 % de plomb pour le décolletage.

Les propriétés générales des maillechorts, leur tenue à la corrosion en particulier, sont intermédiaires entre celles des laitons et celles des cupro-nickels.

### 1.2.8 CUPRO-SILICIUMS

De ces alliages, peu utilisés malgré de très intéressantes propriétés (résistance mécanique, qualités de frottement, tenue à la corrosion) il n'existe pratiquement que deux nuances, l'une à 3 % de silicium et 1 % de manganèse, l'autre à 2 % de silicium et 2,5 % d'aluminium.

### 1.2.9 CUPRO-PLOMBES (Pb = de 6 à 35 %)

Les cupro-plombs sont caractérisés par d'excellentes propriétés anti-friction (surtout anti-grippage) et sont utilisés principalement pour la fabrication des coussinets.

Les deux métaux étant mutuellement insolubles à l'état solide — et même à l'état liquide dans un certain domaine de températures et de compositions — le plomb est disséminé dans la matrice de cuivre sous forme de nodules ou de motifs interdendritiques plus ou moins importants selon la composition.

En raison de cette non-miscibilité, les cupro-plombs ne peuvent supporter la soudure autogène. Seul, le brasage tendre est utilisé pour les fixer dans des coquilles en acier.

TABLEAU I

Conditions de traitement thermique et caractéristiques mécaniques des principaux cuivres faiblement alliés à durcissement structural.

Alliage	Traitement thermique			Caractéristiques moyennes					
	Trempe	Revenu		Etat	R N/mm <sup>2</sup>	E N/mm <sup>2</sup>	A %	Dureté	Module d'élast. N/mm <sup>2</sup>
	Temp. °C	Durée h	Temp. °C						
Cuivre au chrome- zirconium	990	4	485	Trempé-revenu	> 370	> 250	> 15	> 107 HB	125 000
				Trempé-écroui-revenu	> 400	> 350	> 10	> 125 HB	125 000
Cuivre au cobalt- béryllium	900	2 à 3	480	Trempé-revenu (3 h)	770	630	12	220 HV	134 000
				Trempé-écroui 20 %- revenu (2 h)	850	750	7	240 HV	134 000
Cuivre au béryllium	780	2 à 3	320	Trempé-revenu (3 h)	1 250	1 100	6	375 HV	133 000
				Trempé-écroui 40 %- revenu (2 h)	1 420	1 260	2	430 HV	133 000

### 1.3 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DES ALLIAGES CUIVREUX

Certaines propriétés physiques ont pratiquement les mêmes valeurs pour le cuivre et pour l'ensemble des alliages cuivreux.

Les valeurs extrêmes ou typiques de ces propriétés sont indiquées ci-après. Celles qui varient d'une manière importante avec la composition chimique sont rassemblées dans le Tableau II, avec les caractéristiques mécaniques qui, elles, dépendent en plus de l'état métallurgique.

#### 1.3.1 Masse volumique

Elle est, dans l'ensemble, très proche de celle du cuivre ( $8,94 \text{ g/cm}^3$ ) et varie de  $7,6 \text{ g/cm}^3$  (alliages chargés en aluminium) à  $9,3 \text{ g/cm}^3$  (alliages chargés en plomb).

1.3.2 Chaleur massique :  $0,09 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$ .

1.3.3 Coefficient de dilatation linéaire : Également très proche de celui du cuivre, il est compris entre  $17.10^6$  et  $21.10^6$ , pour l'intervalle de température  $20\text{-}300^\circ\text{C}$ .

1.3.4 Module d'élasticité : De l'ordre de  $120\ 000 \text{ N/mm}^2$  pour la majorité des alliages cuivreux, il atteint  $133\ 000 \text{ N/mm}^2$  pour le cuivre au béryllium traité.

### 1.4 PROPRIÉTÉS PARTICULIÈRES DES ALLIAGES CUIVREUX EN RELATION AVEC LE SOUDAGE

#### 1.4.1 Conductivité thermique

L'excellente conductivité thermique des alliages cuivreux, d'autant plus élevée qu'ils sont plus riches en cuivre, peut entraîner quelques difficultés dans le soudage des pièces de forte section en favorisant la dissipation de la chaleur.

C'est pour cette raison que le soudage du cuivre et des alliages riches en cuivre nécessite des sources de chaleur puissantes et, fréquemment, un préchauffage qui doit être adapté à l'épaisseur des éléments à assembler.

Les conditions de préchauffage et de réglage des sources de chaleur sont indiquées, pour chaque alliage, dans le chapitre correspondant.

#### 1.4.2 Conductivité électrique

Cette caractéristique fondamentale du cuivre n'intervient que dans le soudage par résistance où la chaleur est produite par effet Joule dans le métal.

Cette technique est difficilement applicable aux cuivres purs et faiblement alliés, mais elle convient parfaitement pour la plupart des alliages cuivreux sous réserve de disposer de sources de courant de forte intensité.

#### 1.4.3 Dilatation thermique

Les coefficients de dilatation thermique du cuivre et de ses alliages sont relativement élevés ; ils sont supérieurs d'environ 50 % à celui de l'acier.

Pour éviter les déformations et les criques, il est indispensable, surtout dans les cas d'assemblages importants, d'observer certaines précautions, notamment :

— dans la mesure du possible, éviter de souder des pièces bridées ;

— limiter le chauffage pour soudage à la zone avoisinant immédiatement le cordon, en opérant rapidement avec une source de chaleur suffisamment puissante ;

— si le préchauffage est nécessaire, l'effectuer lentement et uniformément ;

— après soudage, refroidir lentement et régulièrement l'ensemble soudé.

#### 1.4.4 Fragilité à chaud

Pour le cuivre et la plupart de ses alliages, la variation de la malléabilité ( $A\%$ ) en fonction de la température, présente un minimum plus ou moins accentué entre  $300$  et  $600^\circ\text{C}$ .

Comme, d'autre part, la résistance à la rupture diminue lorsque la température augmente, il faut éviter que les pièces soient soumises à des contraintes mécaniques dans cet intervalle de température.

#### 1.4.5 Cuivres non désoxydés ( $\text{Cu}/a_1$ , $\text{Cu}/a_2$ )

Dans ces cuivres, l'oxygène contenu à des teneurs de  $0,03$  à  $0,10\%$  est essentiellement sous forme d'oxyde cuivreux  $\text{Cu}_2\text{O}$ , ou « oxydure ».

La solidification de ces cuivres se termine à  $1\ 065^\circ\text{C}$  par formation de l'eutectique  $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$  en un réseau intergranulaire qui est une source de fragilité.

Le corroyage et les recuits intermédiaires dans les opérations de transformation à froid dispersent les nodules d'oxyde dans la masse, ce qui améliore les caractéristiques mécaniques et, notamment, supprime la fragilité.

D'une manière générale, le soudage de ces cuivres ne donne pas de résultats très satisfaisants, quel que soit le procédé.

Après soudage sous atmosphère inerte (TIG, MIG) la partie fondue présente la structure brute de solidification, avec le réseau d'eutectique aux joints des grains. Comme la protection absolue contre l'oxydation est très difficile, en particulier lorsque les pièces doivent être préchauffées, le cordon renferme presque toujours une quantité d'oxygène supérieure à la teneur initiale du cuivre, ce qui affaiblit encore ses caractéristiques mécaniques.

Au cours du soudage à la flamme, la partie fondue est complètement désoxydée car la vapeur d'eau résultant de la réduction de l'oxyde de cuivre peut s'échapper. Mais dans la zone voisine du cordon, où la température a

atteint 1 065 °C, l'eutectique se rassemble aux joints des grains et crée une zone fragile. De plus, l'action réductrice de la flamme sur le  $\text{Cu}_2\text{O}$  entraîne souvent une désagrégation plus ou moins profonde du cuivre dans le reste de la zone affectée par la chaleur, par un mécanisme connu sous le nom de « maladie de l'hydrogène ».

#### 1.4.6 Alliages contenant des éléments volatils

Ces éléments sont le tellure (température d'ébullition 990 °C) et le zinc (température d'ébullition 907 °C).

Le cuivre au tellure n'est pas soudable par les procédés faisant intervenir la fusion du métal de base.

Pour les alliages renfermant du zinc, c'est-à-dire les laitons et les maillechorts, il est possible de limiter la distillation de zinc, qui entraîne la formation de porosités dans le cordon, en utilisant une flamme légèrement oxydante (voir chapitre 5).

Dans le cas du soudage par résistance, le procédé par étincelage ne peut évidemment pas être employé, mais les procédés par points ou à la molette sont utilisables à condition d'éviter la formation d'arcs électriques au moment de l'accostage.

#### 1.4.7 Alliages à traitements thermiques (autres que le recuit).

##### 1.4.7.1 Cupro-aluminiums

Les cupro-aluminiums polyphasés, c'est-à-dire en pratique ceux qui renferment plus de 8,5 % d'aluminium, présentent une transformation eutectoïde entre 565 et 600 °C, selon la

nature et la concentration des éléments d'addition.

Cette réaction ( $\beta \rightarrow \alpha + \gamma_2$ ) ne s'effectue normalement que si la vitesse de refroidissement est très faible, de l'ordre de 1 à 2 °C/mn.

Pour des vitesses de refroidissement supérieures, la décomposition de la phase  $\beta$  est de moins en moins complète et, pour des vitesses correspondant à la trempe à l'eau, elle subit une transformation martensitique.

Ces écarts à la transformation normale se traduisent par des modifications plus ou moins importantes des caractéristiques mécaniques mais surtout par une sensibilisation de l'alliage à la corrosion marine principalement.

Après soudage, notamment de tôles minces qui se refroidissent spontanément avec des vitesses trop élevées, il est donc nécessaire de recuire la zone soudée par réchauffage à 850-900 °C et d'assurer ensuite un refroidissement lent (vitesse inférieure à 100 °C/h) au moins jusqu'à 500 °C.

##### 1.4.7.2 Alliages à durcissement structural

Le soudage autogène de ces alliages détruit les effets du traitement thermique s'il a déjà été effectué, ainsi que ceux de l'écrouissage éventuel.

Les pièces soudées, en alliage à durcissement structural, doivent donc être trempées et revenues seulement après soudage.

La pratique qui consisterait à tremper les pièces immédiatement après soudage, pour économiser le réchauffage de mise en solution, est déconseillée car les caractéristiques obtenues après revenu sont alors difficilement reproductibles.

TABLEAU II. — Propriétés physiques et caractéristiques mécaniques <sup>(1)</sup> qui dépendent de la composition chimique et de l'état métallurgique

CUIVRES ou ALLIAGES	PROPRIÉTÉS PHYSIQUES				CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES							
	Intervalle de fusion °C	Conductivité thermique $\frac{\text{Kcal} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}}$	Conductivité électrique % IACS <sup>(2)</sup>	Résistivité électrique $\frac{\Omega \cdot \text{cm}^2}{\text{cm}}$	Charge de rupture		Limite d'élasticité		Allongement		Dureté	
					Recuit <sup>(3)</sup>	Ecroûti	Recuit <sup>(3)</sup>	Ecroûti	Recuit <sup>(3)</sup>	Ecroûti	Recuit <sup>(3)</sup>	Ecroûti
<b>cuivres</b>												
Cu/a1 - Cu/a2	1065 - 1083	335	100 - 102	$1,72 \cdot 10^{-6}$	20 - 22	25 - 35	5 - 8	10 - 32	35 - 45	25 - 5	45 - 55 HB	60 - 130 HB
Cu/b	≈ 1083	280	~ 85	$2,03 \cdot 10^{-6}$	20 - 22	25 - 35	5 - 8	10 - 32	35 - 45	25 - 5	45 - 55 HB	60 - 130 HB
Cu/c1 - Cu/c2	1083	335	100 - 102	$1,72 \cdot 10^{-6}$	20 - 22	25 - 35	5 - 8	10 - 32	35 - 45	25 - 5	45 - 55 HB	60 - 130 HB
<b>cuivres faiblement alliés</b>												
Cuivre à l'argent	≈ 1082	335	98	$1,75 \cdot 10^{-6}$	20 - 22	25 - 35	5 - 8	10 - 32	35 - 45	25 - 5	45 - 55 HB	60 - 130 HB
Cuivre au tellure	1053 - 1075	306	96	$1,80 \cdot 10^{-6}$	20 - 22	25 - 35	5 - 8	10 - 32	35 - 45	25 - 5	45 - 55 HB	60 - 130 HB
Cuivre au chrome	1070 - 1080	270	80	$2,15 \cdot 10^{-6}$								
Cuivre au cobalt-béryllium	1030 - 1070	195	48	$3,60 \cdot 10^{-6}$								
Cuivre au béryllium	865 - 980	72 - 90	22	$7,80 \cdot 10^{-6}$								
					Voir tableau I							
<b>laitons</b>												
Cu - Zn 5	1050 - 1065	202	56	$3,2 \cdot 10^{-6}$	24 - 26	25 - 47	6 - 10	23 - 41	40 - 45	25 - 4	50 - 75 HV	70 - 150 HV
Cu - Zn 10	1035 - 1045	162	44	$3,9 \cdot 10^{-6}$	26 - 29	37 - 55	6 - 12	25 - 43	40 - 45	25 - 4	55 - 80 HV	70 - 170 HV
Cu - Zn 15	1010 - 1025	137	37	$4,7 \cdot 10^{-6}$	27 - 32	30 - 63	7 - 13	27 - 45	42 - 48	26 - 4	60 - 85 HV	75 - 185 HV
Cu - Zn 20	985 - 1000	119	32	$5,4 \cdot 10^{-6}$	29 - 34	33 - 67	8 - 14	28 - 46	45 - 54	30 - 3	62 - 90 HV	80 - 190 HV
Cu - Zn 30	920 - 955	104	28	$6,2 \cdot 10^{-6}$	32 - 37	33 - 75	10 - 16	28 - 46	52 - 65	42 - 3	65 - 95 HV	85 - 205 HV
Cu - Zn 33	903 - 935	101	28	$6,2 \cdot 10^{-6}$	32 - 37	33 - 70	10 - 16	28 - 46	52 - 65	42 - 3	65 - 95 HV	85 - 200 HV
Cu - Zn 36	903 - 920	101	28	$6,2 \cdot 10^{-6}$	32 - 37	33 - 70	10 - 16	28 - 46	52 - 65	42 - 3	65 - 95 HV	85 - 200 HV
Cu - Zn 40	895 - 900	104	28	$6,2 \cdot 10^{-6}$	34 - 38	36 - 70	12 - 18	30 - 50	25 - 35	20 - 5	70 - 100 HV	105 - 205 HV
Cu - Zn 35 Pb 2	895 - 910	101	27	$6,4 \cdot 10^{-6}$	34 - 36	40 - 50	12 - 15	30 - 45	30 - 40	20 - 5	70 - 100 HV	90 - 190 HV
Cu - Zn 36 Pb 3	885 - 900	101	27	$6,4 \cdot 10^{-6}$	34 - 36	40 - 50	12 - 15	30 - 45	30 - 40	20 - 5	70 - 100 HV	90 - 190 HV
Cu - Zn 39 Pb 2	875 - 890	102	27	$6,4 \cdot 10^{-6}$	34 - 36	40 - 50	12 - 15	30 - 45	25 - 35	20 - 5	70 - 100 HV	95 - 200 HV
Cu - Zn 40 Pb 3	870 - 885	102	27	$6,4 \cdot 10^{-6}$	34 - 36	40 - 50	12 - 15	30 - 45	25 - 35	20 - 5	70 - 100 HV	95 - 200 HV
Cu - Zn 29 Sn 1 <sup>(4)</sup>	900 - 935	94	25	$6,9 \cdot 10^{-6}$	35 - 40		12 - 18				80 - 120 HV	
Cu - Zn 22 Al 2 <sup>(4)</sup>	935 - 970	86	23	$7,5 \cdot 10^{-6}$	35 - 40		12 - 18				80 - 130 HV	
Laitons à haute résistance	860 - 890	50 - 80	12 - 25	$7 - 15 \cdot 10^{-6}$	50 - 60	39 - 60	25 - 30	20 - 30	8 - 15	20 - 5	160 - 190 HB	130 - 200 HV
Cu - Zn 23 Al 4 moulé	900 - 940	32	7,5	$23 \cdot 10^{-6}$								

(1) Les limites des caractéristiques mécaniques ne sont données dans ce tableau qu'à titre indicatif. En général, elles comprennent toutes les valeurs que les alliages intéressés peuvent présenter sous leurs différentes formes (laminés, tubes, étirés, etc.). Dans chaque cas, cependant, seule la norme en vigueur peut servir de référence dans les relations commerciales.  
 (2) % IACS (International Annealed Copper Standard — Standard International [de conductivité électrique] pour le cuivre recuit). Par convention, une resistivité de  $1,724 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2/\text{cm}$  correspond à une conductivité électrique de 100% IACS.  
 (3) Ou brut de fonderie pour les pièces moulées.  
 (4) Tubes pour échangeurs thermiques livrés exclusivement à l'état « recristallisé à grains fins » (NF A 51-102).

TABLEAU II. — Propriétés physiques et caractéristiques mécaniques <sup>(1)</sup> qui dépendent de la composition chimique et de l'état métallurgique

CUIVRES ou ALLIAGES	PROPRIÉTÉS PHYSIQUES					CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES						
	Intervalle de fusion °C	Conductivité thermique Kcal · m m <sup>2</sup> · h · °C	Conductivité électrique % IACS <sup>(2)</sup>	Résistivité électrique $\frac{\Omega \cdot \text{cm}^2}{\text{cm}}$	Charge de rupture		Limite d'élasticité		Allongement		Dureté	
					Recuit (3)	Ecroûti	Recuit (3)	Ecroûti	Recuit (3)	Ecroûti	Recuit (3)	Ecroûti
<b>bronzes (Corroyés)</b>												
Cu - Sn 5 Zn 4	930 - 1000	75	19	$9,10 \cdot 10^{-6}$	30 - 32	40 - 67	12 - 15	17 - 50	40	20 - 3	80 - 110 HV	140 - 210 HV
Cu - Sn 5 P	950 - 1050	61	15	$11,10 \cdot 10^{-6}$	30 - 32	43 - 70	12 - 15	17 - 50	50	26 - 2	80 - 110 HV	140 - 210 HV
Cu - Sn 7 P (fils)	880 - 1020	54	13	$13,10 \cdot 10^{-6}$	35 - 45	50 - 100	16 - 20	20 - 70	50	20 - 2	85 - 120 HV	150 - 240 HV
Cu - Sn 9 P	860 - 1010	44	11	$16,10 \cdot 10^{-6}$	35 - 45	50 - 80	16 - 20	20 - 50	50	20 - 2	85 - 120 HV	160 - 220 HV
Bronzes moulés	800 - 1000	40 - 60	10 - 15	$12 \text{ à } 17,10 \cdot 10^{-6}$	20 - 30		7 - 15		4 - 16		60 - 100 HB	
<b>cupro - aluminium (Corroyés)</b>												
Cu - Al 6	1050 - 1070	68	18	$9,5,10 \cdot 10^{-6}$	35 - 45	40 - 63	10 - 22	24 - 60	45 - 75	50 - 5	65 - 100 HV	100 - 200 HV
Cu - Al 8	1035 - 1040	54	14	$12,5,10 \cdot 10^{-6}$	38 - 43	50 - 75	12 - 24	30 - 70	50 - 70	35 - 5	70 - 100 HV	100 - 280 HV
Cu - Al 9 Mn 2	≈ 1030	45	11	$15,10 \cdot 10^{-6}$	50 - 60	60 - 70	18 - 25	40 - 50	20 - 35	20 - 10	100 - 130 HB	140 - 185 HB
Cu - Al 10 Ni 4 Fe 2	1035 - 1050	33	9	$19,10 \cdot 10^{-6}$	55 - 75		28 - 40		15 - 30		160 - 230 HB	
Cu - Al 10 Ni 5 Fe 4	1035 - 1050	30	8	$21,10 \cdot 10^{-6}$	55 - 75		23 - 35		10 - 28		135 - 200 HB	
(Moulés)												
Cu - Al 9	1040 - 1050	54	13	$13,10 \cdot 10^{-6}$	50 - 55		20 - 23		25 - 30		130 HB	
Cu - Al 9 Fe 3	1040 - 1060	54	13	$13,10 \cdot 10^{-6}$	60 - 70		25 - 27		20 - 30		150 - 170 HB	
Cu - Al 9 Ni 3 Fe 2	1040 - 1060	54	13	$13,10 \cdot 10^{-6}$	65 - 70		27 - 30		20 - 25		170 - 180 HB	
Cu - Al 9 Ni 5 Fe 5	1040 - 1060	32	10	$17,10 \cdot 10^{-6}$	65		28		12		140 - 180 HB	
<b>cupro - nickels</b>												
Cu - Ni 10	1100 - 1150	40	9	$19,10 \cdot 10^{-6}$	32	50	11	41 - 45	40 - 42	10 - 5	60 HB	
Cu - Ni 20	1130 - 1200	32	6,5	$26,10 \cdot 10^{-6}$	34 - 35	49 - 55	13 - 14	45 - 52	40	15 - 5	70 HB	
Cu - Ni 30	1170 - 1240	25	4,6	$38,10 \cdot 10^{-6}$	41 - 43	54 - 57	15 - 18	49 - 52	43 - 45	15 - 5	80 HB	100 - 125 HB
Cu - Ni 30 Fe	1170 - 1240	22	4	$43,10 \cdot 10^{-6}$	55		26		30		85 HB	
Cu - Ni 45	1220 - 1300	18	3,5	$50,10 \cdot 10^{-6}$	48 - 50	58 - 68	20 - 27	52 - 59	40	14 - 4	90 HB	

(1) Les limites des caractéristiques mécaniques ne sont données dans ce tableau qu'à titre indicatif. En général, elles comprennent toutes les valeurs que les alliages intéressés peuvent présenter sous leurs différentes formes (laminés, tubes, étirés, etc.). Dans chaque cas, cependant, seule la norme en vigueur peut servir de référence dans les relations commerciales.

(2) % IACS (International Annealed Copper Standard — Standard International [de conductivité électrique] pour le cuivre recuit). Par convention, une résistivité de  $1,7241 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2/\text{cm}$  correspond à une conductivité électrique de 100 % IACS.

(3) Ou brut de fonderie pour les pièces moulées.

