

## SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES ALLIAGES LEGERS ALUMINIUM-CUIVRE.

Par MM. W. Broniewski et A. Pilko.

*Historique.* La courbe de solidification des alliages aluminium-cuivre (fig. 1) indique la présence d'une combinaison  $Al_2Cu$  formant dans l'aluminium, au solidus, une solution solide jusqu'à 5,7 p. 100 de cuivre qui se trouve réduite à la température ordinaire vers 0,5 p. 100 de cuivre. A 33 p. 100 de cuivre se manifeste un eutectique formé par la solution solide riche en aluminium et celle voisine du composé  $Al_2Cu_3$ , de sorte que les alliages contenant de 33 à 6 p. 100 de cuivre sont formés par la solution solide limitée du côté de l'aluminium, plus ou moins désagrégée et entourée par l'eutectique.

Le traitement thermique des alliages légers aluminium-cuivre a été étudié pour la première fois par MM. Zeerleder et Bossard<sup>2)</sup>. Ces auteurs admettent que la dureté maxima de ces alliages suffisamment purs est obtenue immédiatement après trempe et que le revenu, ne pouvant augmenter davantage ni la dureté ni la résistance, ne contribue qu'à la réduction de ces propriétés. L'augmentation de la résistance à la traction au revenu (fig. 2) est donc attribuée uniquement à la présence du silicium dans l'aluminium technique.

Une étude bien plus complète sur le traitement thermique des alliages légers aluminium-cuivre a été faite par MM. Kokubo et Honda<sup>3)</sup>. Les recherches concernaient le changement de la dureté, de la résistance électrique et de la densité.

Les résultats obtenus par ces auteurs pour la dureté Rockwell (échelle B) sont indiqués sur les figures 3 et 4.

Les auteurs adoptent le point de vue de M. Konno<sup>4)</sup> que l'augmentation de la dureté des alliages légers aluminium-cuivre par vieillissement et au revenu est due à une torsion du réseau atomique avant la précipitation du composé  $Al_2Cu$ . La précipitation et la coagulation des particules de ce composé au dessus de 170° produirait, par contre, une diminution de la dureté.

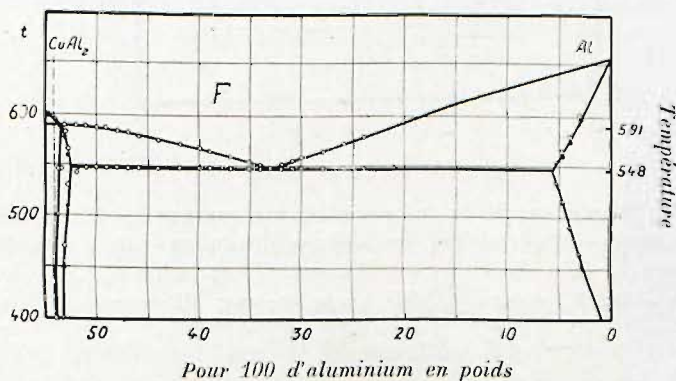


Fig. 1. Partie du diagramme de solidification des alliages cuivre-aluminium suivant M. Stockdale<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Stockdale J. Inst. Met. 31 (1924) p. 275; 52 (1933) p. III.

<sup>2)</sup> Zeerleder et Bossard. Zs. f. Metallkunde, 19 (1927) 459.

<sup>3)</sup> Kokubo et Honda. Se. Rep. Tôhoku Imp. Univ. 19 (1930) p. 365.

<sup>4)</sup> Konno. Se. Rep. Tôhoku Imp. Univ. 11 (1922) p. 269.

*Préparation des échantillons et mesures.* Les alliages étaient obtenus avec du cuivre électrolytique et de l'aluminium à 99,5 p. 100 aux impuretés constituées par du silicium et du fer presque en parties égales. La fusion s'effectuait au four à résistance électrique sous une couche de fondant constitué par 3 parties de chlorure de barium pour une partie de chlorure de calcium.

Après coulée, les lingots étaient recuits pendant 6 heures à 350° et refroidis en 5 heures environ à la température ordinaire. Jusqu'à 8 p. 100 de cuivre les alliages étaient

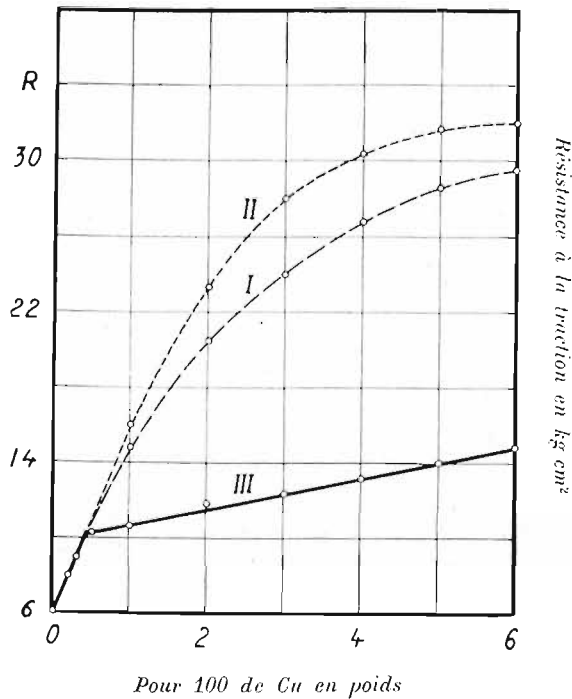


Fig. 2. Influence du traitement thermique sur la résistance à la traction des alliages aluminium-cuivre suivant MM. Zeerleder et Bossard. I, après trempe à 550°; II, revenu à 160° après trempe; III, recuit à 300°.

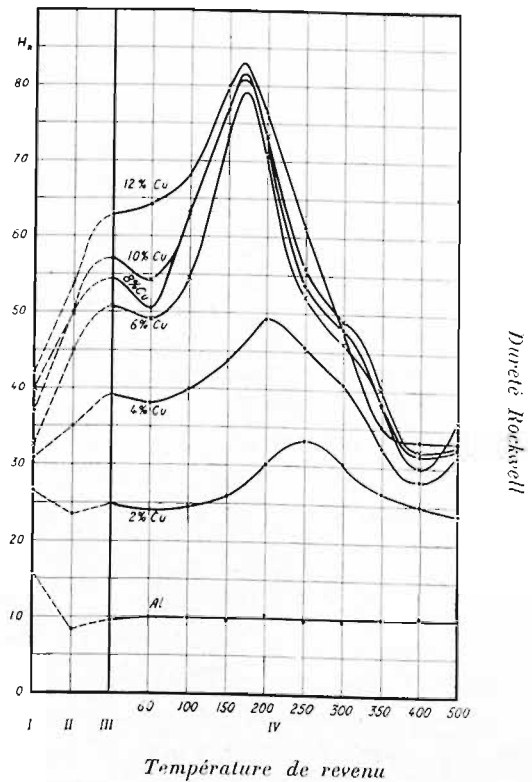


Fig. 3. Influence du traitement thermique sur la dureté des alliages aluminium-cuivre suivant MM. Kokubo et Honda. I, alliage brut de forge; II, immédiatement après trempe à 545°; III, vingt jours après trempe; revenu après trempe pendant 6 heures aux températures indiquées.

laminés et étirés à froid en subissant un recuit à 350° à chaque écrouissage de 20%. Au dessus de cette teneur en cuivre, le laminage se faisait à chaud et l'étirage définitif à froid.

Avant l'essai, les éprouvettes subissaient le traitement thermique définitif par le recuit, la trempe et le revenu. Le recuit se faisait par chauffage à 350° pendant 45 minutes et un refroidissement avec le four en 5 heures jusqu'à la température ordinaire.

La trempe se faisait dans l'eau à 20° après un échauffement de 1 heure à 525°.

Le revenu était fait sur des échantillons trempés par échauffement de 45 minutes à 185°.

Les paramètres suivants ont été établis:

$R$  — résistance à la traction en kgs par  $\text{mm}^2$  sur fils de 5 mm de diamètre.

$Q$  — limite élastique, mesurée sur la courbe de traction enregistrée, donc admise comme égale à la limite de proportionnalité.

$A\%$  — allongement total à la rupture, mesuré sur éprouvette internationale<sup>1)</sup>, dont la distance entre les repères est  $n = 10$  fois son diamètre, soit 50 mm.

<sup>1)</sup> Afin d'obtenir l'allongement pour l'éprouvette française ou l'éprouvette anglaise courte on peut se servir de la formule de M. Krupkowski. Revue de Métall., 1931, 28, p. 583, form. 15.

$a\%$  — allongement uniforme, calculé en mesurant le diamètre de l'éprouvette avant l'essai ( $d_0$ ) et après rupture ( $d_1$ ) au voisinage des repères. On avait alors:

$$a\% = \left[ \frac{d_0^2}{d_1^2} - 1 \right] 100$$

$b\%$  — allongement de striction, établi par la différence  $b\% = A\% - a\%$ .

$C\%$  — la striction, mesurée sur l'éprouvette rompue, à l'aide d'un microscope monté sur vis micrométrique.

$H$  — dureté Brinell, obtenue par le rapport de la pression de 12 kgs à la surface d'empreinte d'une bille de 3 mm et corrigée afin d'équivaloir à la dureté Brinell normale ( $D = 10$  mm.  $P = 500$  kgs).

$U$  — résilience en kgs par  $\text{cm}^2$  sur petite éprouvette allemande de  $100 \times 10 \times 8$  mm avec entaille de 3 mm à l'angle de  $45^\circ$  qui donnait le plus de garantie de rupture.

En partant de ces paramètres on pouvait calculer les coefficients suivants. Coefficient

de Brinell  $K = \frac{R}{H}$ .

Coefficient proportionnel au travail de rupture des éprouvettes à la traction<sup>1)</sup>

$$T = QA + \frac{\pi}{4} (R - Q) A.$$

### Résultats des mesures.

*Traitement thermique.* Les meilleures conditions du recuit et de revenu furent déterminées par la méthode de dureté appliquée à un alliage à 94,5 p. 100 d'aluminium. Les figures 5 et 6 indiquent les résultats obtenus.

Nous voyons que la dureté la plus basse au recuit (fig. 5) était obtenue à  $350^\circ$ . Aux températures inférieures, la dureté était plus élevée à cause de la réaction inachevée. Aux températures plus hautes, une trempe partielle paraissait avoir lieu au refroidissement qui se faisait dans de la silice infusoire. Si le refroidissement se faisait au four en 5 heures environ, la dureté limite apparaissait voisine de 35 à partir de  $350^\circ$  pour un temps de recuit dépassant 30 minutes. C'est donc un recuit à  $350^\circ$  pendant 45 minutes avec refroidissement lent au four qui a été adopté pour tous les alliages.

La température  $525^\circ$  a été admise pour la trempe, étant donné que le solidus des alliages se trouvait à  $548^\circ$ , ce qui donnait encore une sécurité suffisante à l'échauffement.

Nous voyons (fig. 6) que l'augmentation de dureté produite par le revenu de l'alliage trempé pouvait atteindre un maximum voisin de 88 aussi bien par un revenu de 30 minutes à  $200^\circ$  qu'au revenu de 60 minutes à  $175^\circ$ . Les conditions intermédiaires, soit un revenu de 45 minutes à  $185^\circ$  furent donc choisies de ce fait.

*Propriétés mécaniques en fonction de la composition.* Les résultats des mesures des propriétés mécaniques, en fonction de la composition des alliages étudiés, sont indiqués aux tableaux I, II et III.

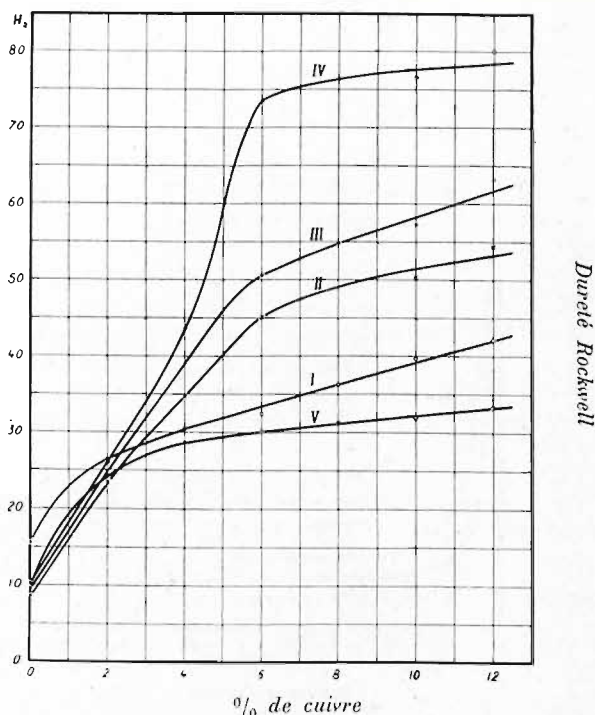
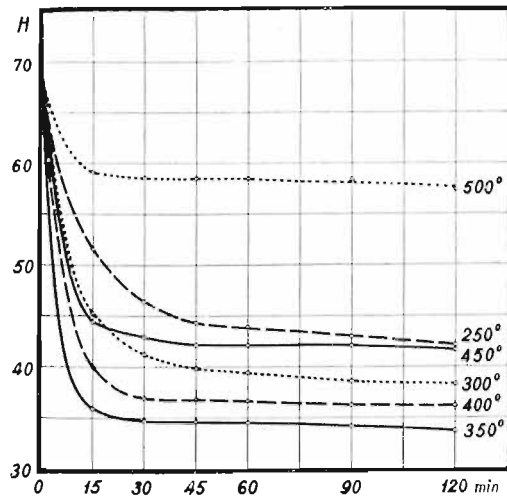


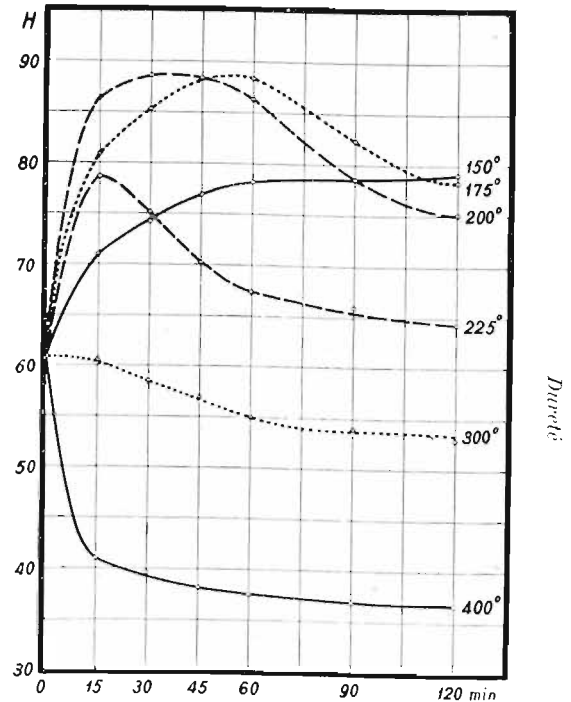
Fig. 4. Influence du traitement thermique sur la dureté des alliages aluminium-cuivre suivant MM. Kokubo et Honda. I, alliage brut de forge; II, immédiatement après trempe à  $545^\circ$ ; III, vingt jours après trempe; IV, revenu après trempe pendant 6 heures à  $150^\circ$ ; V, recuit pendant 6 heures à  $400^\circ$ .

<sup>1)</sup> Broniewski et Lewandowski. La Revue de Fonderie Moderne 1933, 27, p. 175.



Temps de recuit

Fig. 5. Dureté d'un alliage à 94,5% d'aluminium, écroui à 20%, en fonction du temps de recuit aux températures indiquées.



Temps de revenu

Fig. 6. Dureté d'un alliage à 94,5% d'aluminium, trempé à 525°, en fonction du temps de revenu aux températures indiquées.

TABLEAU I.

Propriétés mécaniques des alliages recuits 45 min. à 350°.

Al% <sub>c</sub>	R	Q	A	a	b	C	H	U	k	T
100,0	8,7	4,5	36,6	24,0	12,6	88,0	23,3	11,7*	0,268	2,85
99,0	13,7	7,2	30,3	19,0	11,3	77,0	31,0	8,5*	0,442	3,65
98,0	15,9	9,1	27,3	17,8	9,5	70,8	32,5	5,6	0,489	3,87
97,7	—	—	—	—	—	—	—	5,1	—	—
97,0	16,5	10,1	24,5	17,0	7,5	64,5	33,7	4,2	0,489	3,70
96,4	16,5	10,6	24,0	17,0	7,0	61,5	33,7	2,9	0,489	3,67
96,0	16,6	10,8	23,8	16,9	6,9	59,3	33,9	—	0,489	3,67
95,1	16,6	11,0	23,3	16,4	6,9	56,7	34,0	1,8	0,489	3,60
94,5	16,7	11,1	23,1	16,2	6,9	55,5	34,2	1,6	0,490	3,60
94,0	16,9	11,3	23,1	16,2	6,9	53,1	34,5	1,3	0,490	3,62
93,9	17,1	11,5	23,0	16,2	6,8	52,4	34,8	1,3	0,491	3,65
93,3	17,2	11,5	23,0	16,2	6,8	51,0	35,0	—	0,491	3,66
92,4	17,5	12,1	22,8	16,1	6,7	49,8	35,5	1,2	0,492	3,73
92,0	17,7	12,4	22,8	16,1	6,7	48,9	35,8	1,1	0,494	3,78
91,0	18,1	12,9	21,3	15,8	5,5	44,8	36,4	0,93	0,498	3,62
89,6	19,2	14,3	18,0	13,5	5,0	33,5	37,5	0,60	0,512	3,18
88,0	19,7	15,0	14,6	11,5	3,1	30,8	38,1	0,43	0,517	2,73
86,5	19,8	15,5	12,0	10,5	1,5	29,1	40,7	0,12	0,486	2,27

\*) Les astérisques indiquent une éprouvette pliée avec fissure.

T A B L E A U II.

Propriétés mécaniques des alliages trempés à 525° après 60 min d'échauffement.

Al <sup>o</sup> / <sub>o</sub>	R	Q	A	a	b	C	H	U	k	T
99,0	13,9	7,1	30,5	19,1	11,4	77,0	31,5	8,2*	0,441	3,75
98,0	18,9	10,3	27,1	18,5	8,6	69,2	38,5	5,4	0,491	4,62
97,7	—	—	—	—	—	—	—	4,8	—	—
97,0	23,0	13,3	24,8	17,9	6,9	62,0	45,5	4,0	0,507	5,20
96,4	26,7	16,5	24,3	17,8	6,5	57,0	50,0	2,6	0,535	5,96
96,0	28,5	17,1	24,0	17,7	6,3	56,1	52,9	—	0,539	6,31
95,1	32,2	20,5	23,4	17,1	6,3	51,0	58,5	1,4	0,552	6,96
95,5	33,8	22,0	23,2	17,0	6,2	47,4	62,2	1,2	0,542	7,20
94,0	34,7	23,5	22,5	16,9	5,6	33,2	65,2	1,1	0,532	7,26
93,9	35,5	24,0	21,6	16,4	5,2	28,0	66,8	0,99	0,531	7,16
93,3	36,2	26,2	19,2	14,2	5,0	21,1	68,8	—	0,526	6,56
92,4	36,6	29,2	16,0	11,5	4,5	16,8	71,8	0,79	0,510	5,64
92,0	35,7	29,5	15,0	11,0	4,0	15,0	72,1	0,58	0,496	5,12
91,0	37,0	30,5	11,6	9,5	2,1	13,2	75,4	0,40	0,491	4,15
89,6	37,7	32,0	10,4	8,7	1,7	11,6	78,0	0,20	0,483	3,78
88,0	37,8	33,4	7,3	6,8	0,5	9,9	81,4	0,05	0,465	2,91
86,5	38,6	35,0	5,1	5,0	0,1	8,2	84,3	0,0	0,456	1,95

\*) Les astérisques indiquent une éprouvette pliée avec fissure.

T A B L E A U III.

Propriétés mécaniques des alliages revenus après trempe pendant 45 min à 185°.

Al <sup>o</sup> / <sub>o</sub>	R	Q	A	a	b	C	H	U	k	T
99,0	13,9	7,1	30,6	19,1	11,5	76,0	31,4	8,2*	0,446	3,86
98,0	18,8	10,0	27,3	18,3	9,0	69,6	38,1	5,4	0,494	4,62
97,7	—	—	—	—	—	—	—	4,8	—	—
97,0	23,1	13,9	25,1	18,0	7,1	62,8	45,4	3,9	0,509	5,31
96,4	27,1	18,2	23,6	17,0	6,6	56,2	54,8	2,4	0,495	5,95
96,0	30,3	21,2	23,1	17,0	6,1	54,0	63,2	—	0,479	6,54
95,1	35,9	25,8	23,0	16,9	6,1	48,5	83,0	1,2	0,433	7,75
94,5	39,2	28,0	21,6	16,5	5,1	40,2	89,3	1,1	0,439	8,18
94,0	42,9	30,9	18,4	14,0	4,4	26,6	90,4	0,98	0,475	7,44
93,9	43,4	31,9	16,0	13,5	2,5	21,0	90,4	0,89	0,480	6,46
93,3	44,8	33,5	13,5	11,5	2,0	15,0	90,4	—	0,496	5,73
92,4	46,1	35,8	10,5	9,0	1,5	10,5	90,4	0,65	0,510	4,09
92,0	45,8	36,0	9,4	8,1	1,3	9,4	90,4	0,49	0,505	3,80
91,0	44,9	37,7	7,3	6,2	1,1	8,0	90,4	0,30	0,497	3,18
89,6	44,0	37,3	5,8	4,9	0,9	6,6	90,5	0,10	0,486	2,41
88,0	42,0	36,9	3,5	3,4	0,1	5,8	90,5	0,0	0,464	1,38
86,5	40,5	36,3	3,2	3,1	0,1	5,0	90,6	0,0	0,457	1,23

\*) Les astérisques indiquent une éprouvette pliée avec fissure.

*Essais de traction.* Les résultats de ces essais sont indiqués sur les figures 7, 8 et 9.

Nous voyons qu'au dessus, de 1<sup>o</sup>/<sub>o</sub> de cuivre l'effet de la trempe commence à se faire sentir pour la résistance à la traction (fig. 7) et au dessus de 5<sup>o</sup>/<sub>o</sub> pour l'allongement. Le revenu se manifeste au dessus de 3<sup>o</sup>/<sub>o</sub> pour la résistance et au dessus de 5<sup>o</sup>/<sub>o</sub> pour l'allongement.

La résistance à la traction des alliages revenus passe par un maximum de 46 kg/mm<sup>2</sup> entre 7 et 8 p. 100 du cuivre tout en conservant un allongement supérieur à 10%.

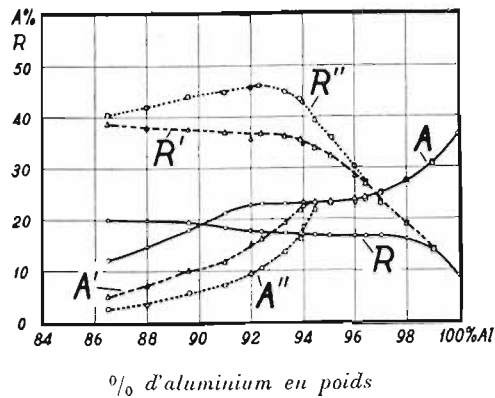


Fig. 7. *R*, résistance en kgs/mm<sup>2</sup> et *A*, allongement total à la traction en p. 100. La ligne continue (*R* et *A*) correspond aux alliages recuits, la ligne interrompue (*R'* et *A'*) aux alliages trempés et la ligne pointillée (*R''* et *A''*) aux alliages revenus.

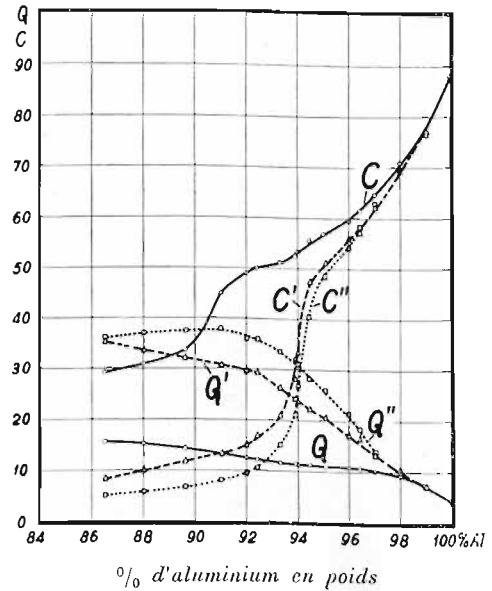


Fig. 8. *Q*, limite élastique en kgs/mm<sup>2</sup> et *C*, striction en p. 100. La ligne continue (*Q* et *C*) correspond aux alliages recuits, la ligne interrompue (*Q'* et *C'*) aux alliages trempés et la ligne pointillée (*Q''* et *C''*) aux alliages revenus.

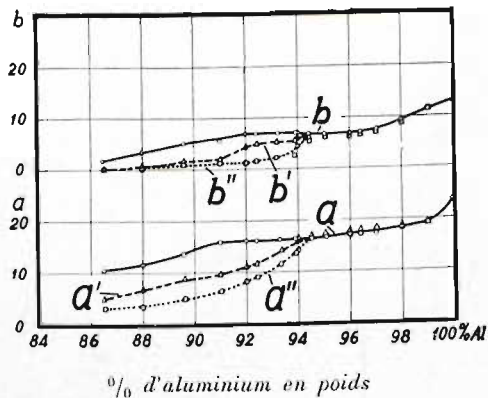


Fig. 9. *a*, allongement proportionnel en p. 100; *b*, allongement de striction en p. 100. La ligne continue (*a* et *b*) correspond aux alliages recuits, la ligne interrompue (*a'* et *b'*) aux alliages trempés et la ligne pointillée (*a''* et *b''*) aux alliages revenus.

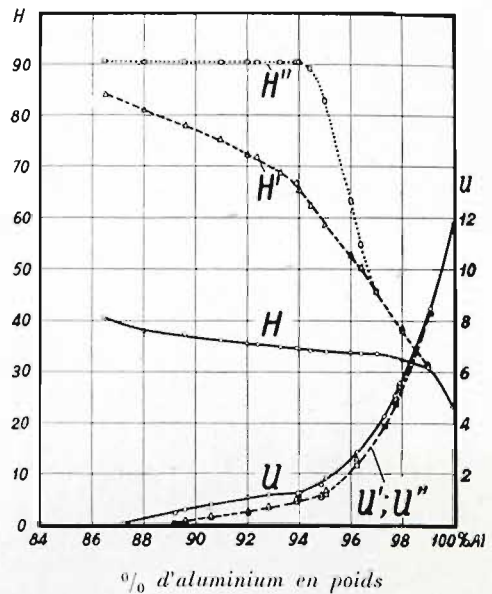


Fig. 10. *H*, dureté Brinell et *U* résilience. La ligne continue (*H* et *U*) correspond aux alliages recuits, la ligne interrompue aux alliages trempés (*H'* et *U'*) et la ligne pointillée (*H''* et *U''*) aux alliages revenus.

En comparant ces résultats à ceux de M. Zeerleder et Bossard (fig. 2) nous voyons que les nombres obtenus par ces auteurs pour la résistance à la traction diffèrent peu des nôtres pour les alliages recuits et leur sont sensiblement inférieurs pour les alliages trempés et les alliages revenus. La limite élastique (fig. 8) se comporte sous l'effet de la

trempe et du revenu comme la résistance à la traction. La striction (fig. 8) apparaît très sensible au traitement thermique et subit une forte chute au voisinage de 6% de cuivre.

Quand aux allongements proportionnels et de striction (fig. 9), ces paramètres suivent l'allure générale de l'allongement total à la rupture (fig. 7).

*Dureté et résilience.* Sur le diagramme de la dureté (fig. 10) l'effet de la trempe et du revenu se manifeste comme pour la résistance à la traction (fig. 7).

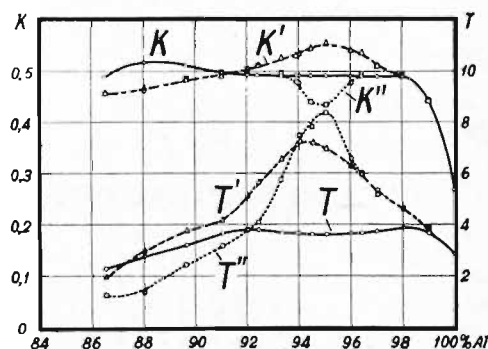
Au dessus de 6% de cuivre, la dureté des alliages revenus paraît se stabiliser vers 90 unités Brinell.

L'allure générale de nos courbes est semblable à celle de MM. Kokuba et Honda (fig. 4) mais les nombres de la dureté ne sont pas comparables étant obtenus dans des conditions et par des méthodes quelque peu différentes (Brinell et Rockwell).

Sur les courbes de résilience (fig. 10) l'effet de la trempe se fait sentir déjà au dessus de 1% de cuivre. Par contre, la résilience n'est pas sensiblement changée par le revenu après trempe.

*Coefficients K et T.* Le coefficient de Brinell *K* ne conserve une valeur stable (fig. 11) que pour les alliages recuits contenant de 2 à 8 p. 100 de cuivre. C'est donc seulement dans ces conditions assez restreintes que l'essai de traction pourrait être remplacé par l'essai de dureté.

Le travail de rupture à la traction (fig. 11) manifeste un maximum dépassant 8 kgm pour les alliages voisins de 5% de cuivre revenus après trempe.



pour 100 d'aluminium en poids

Fig. 11. *K*, coefficient de Brinell et *T*, travail de rupture à la traction. La ligne continue correspond aux alliages recuits (*K* et *T*), la ligne interrompue aux alliages trempés (*K'* et *T'*) et la ligne pointillée aux alliages revenus (*K''* et *T''*).

### R é s u m é.

1. L'étude des propriétés mécaniques des alliages de l'aluminium avec le cuivre contenant jusqu'à 13 p. 100 de ce métal a été faite sur des échantillons recuits à 350°, trempés à 525° et revenu après trempe à 185°.

2. Ont été établis dans ces conditions la résistance à la traction, la limite élastique, l'allongement total, proportionnel et de striction, la striction, la dureté, et la résilience. Ont été calculés à partir de ces données le coefficient de Brinell et le travail de rupture à la traction.

3. A partir de 1% de cuivre on aperçoit l'effet de la trempe pour la résistance à la traction, la limite élastique, la striction et la dureté; le revenu commence à se faire sentir pour ces paramètres à partir de 3% de cuivre. Pour les allongements à la traction (total, proportionnel et de striction) l'effet de la trempe et du revenu commencent à se faire sentir entre 5 et 6% de cuivre. La résilience est sensible à la trempe à partir de 1% de cuivre, mais ne paraît que peu influencée par un revenu ultérieur.

4. Le traitement thermique paraît donner son effet optimum au revenu des alliages contenant de 5 à 6 p. 100 de cuivre. La résistance à la traction atteint alors 40 kgs/mm<sup>2</sup> avec un allongement de 20%, une dureté de 90 unités, une résilience de 1 kgm et un travail de rupture de 8 kgm.

Le revenu de l'alliage contenant de 7 à 8 p. 100 de cuivre permet d'élever la résistance à la traction à 46 kgs/mm<sup>2</sup> mais au prix d'un abaissement de l'allongement à 10%.

5. Les alliages légers aluminium-cuivre, soumis à un traitement thermique approprié, permettent d'atteindre et même de dépasser les paramètres mécaniques considérés comme propres aux duralumins.