

## SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES ALLIAGES ZINC-ALUMINIUM.

par MM. W. Broniewski et W. Kowalski.

Présentée par M. W. Broniewski à la séance de l'Académie des Sciences Techniques à Varsovie le 16 juin 1937.

*Structure.* La structure des alliages zinc-aluminium a été récemment étudiée au Laboratoire de Métallurgie à l'École Polytechnique de Varsovie <sup>1)</sup>. Ces alliages peuvent se présenter soit sous une forme stable, soit sous une forme labile. A l'état stable la combinaison  $Al_2Zn_3$  entourée de solutions solides se forme au dessous de  $445^\circ$  et se dissocie au dessous de  $270^\circ$ ; un eutectique se présente à 5 p. 100 d'aluminium et  $382^\circ$ ; la solution solide du côté de l'aluminium atteint 48 p. 100 de zinc à la température du solidus ( $445^\circ$ ) pour être réduite à 2 p. 100 environ à la température ordinaire; la solution solide du côté du zinc ne paraît pas dépasser 1 p. 100 d'aluminium.

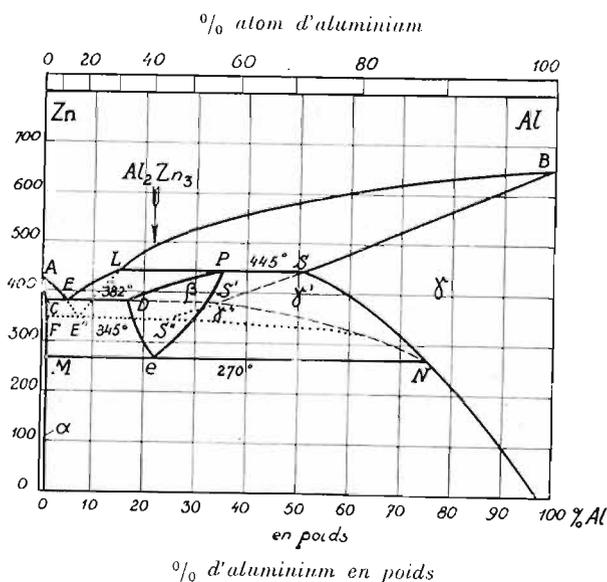


Fig. 1. Diagramme d'équilibre des alliages zinc-aluminium. L'équilibre stable est indiqué par des lignes continues, l'équilibre labile par des lignes interrompues ou pointillées.

à 5 p. 100 d'aluminium et  $382^\circ$ ; la solution solide du côté de l'aluminium atteint 48 p. 100 de zinc à la température du solidus ( $445^\circ$ ) pour être réduite à 2 p. 100 environ à la température ordinaire; la solution solide du côté du zinc ne paraît pas dépasser 1 p. 100 d'aluminium.

A l'état labile, produit par un refroidissement rapide, la combinaison  $Al_2Zn_3$  ne se forme pas et l'eutectique se trouve déplacé à 7 p. 100 d'aluminium et  $345^\circ$ ; la solution solide du côté de l'aluminium peut alors atteindre 75 p. 100 de zinc à la température du solidus ( $345^\circ$ ) pour être réduite, comme à l'état stable, à 2 p. 100 environ à la température ordinaire; de même, comme à l'état stable, la solution solide du côté du zinc ne dépasse pas 1 p. 100 d'aluminium (fig. 1).

### Points singuliers de la courbe

Température	445°	382°	345°	270°	15°
% d'Al	16	1	(1)	1	1
	52	17	(25)	75	97
		(35)			

*Historique.* Les propriétés mécaniques des alliages laminés du côté de l'aluminium ont été étudiés par Rosenhain et Archbutt <sup>2)</sup>.

<sup>1)</sup> Broniewski, Kucharski et Winawer, Revue de Métall. 1937.

<sup>2)</sup> Rosenhain et Archbutt, Revue de Métall. 10 (1913) p. 822.

Les résultats de cette étude sont indiqués sur la figure 2.

Pour les alliages laminés zinc-aluminium, riches en zinc, aucune étude systématique des propriétés mécaniques ne paraît avoir été faite.

Les propriétés mécaniques des alliages zinc-aluminium coulés ont fait l'objet des études de MM. Ewen et Turner<sup>1)</sup> et de M. Portevin<sup>2)</sup>. Dans cette dernière étude on trouve aussi des indications sur les paramètres de traction de 4 alliages (5, 10, 16 et 21% d'Al) forgés.

*Préparation des échantillons.* Les alliages binaires zinc-aluminium sont peu employés dans l'industrie à cause de leur faible dureté. Afin de les rendre plus durs on leur ajoute ordinairement de 2 à 4 p. 100 de cuivre. Notre étude se rapporte donc:

I) aux alliages binaires zinc-aluminium,

II) aux alliages zinc-aluminium, contenant 3% de cuivre.

Dans les deux cas cette étude était faite sur des échantillons contenant de 0 à 25 et de 76 à 100 p. 100 d'aluminium.

Les métaux constituants étaient le zinc électrolytique et l'aluminium technique à 99,6% de pureté, contenant du fer et du silicium presque en parties égales.

Les alliages étaient fondus au four à résistance électrique sous une couche de laitier, formé par 5 parties de chlorure de barium et une partie de chlorure de chaux.

La coulée en coquille se faisait à une température, autant que possible, rapprochée du liquidus, les coulées chaudes donnant un métal poreux.

Les lingots ainsi obtenus de 17 mm de diamètre étaient réduits par laminage et étirage en fils de 5 mm de diamètre et en barres de 8 × 10 mm. Pour les alliages riches en zinc le laminage était fait entre 180° et 120° et l'étirage à froid; pour les alliages riches en aluminium, aussi bien le laminage que l'étirage étaient faits à froid en supprimant périodiquement l'écroutissage par un recuit de 30 min. à 400°.

*Traitement thermique.* Tous les alliages étudiés subissaient un traitement thermique par recuit, trempe et revenu.

Par suite d'une étude préliminaire les conditions suivantes furent adoptées pour le traitement thermique.

Pour les alliages riches en zinc le recuit était fait par un échauffement de 30 min. à 100° et un refroidissement à l'air. La trempe se faisait à 350° après un échauffement d'une heure à cette température.

Après trempe les alliages subissaient un revenu spontané de 5 semaines à la température ordinaire de 20°, l'état d'équilibre paraissant presque atteint dans ces conditions.

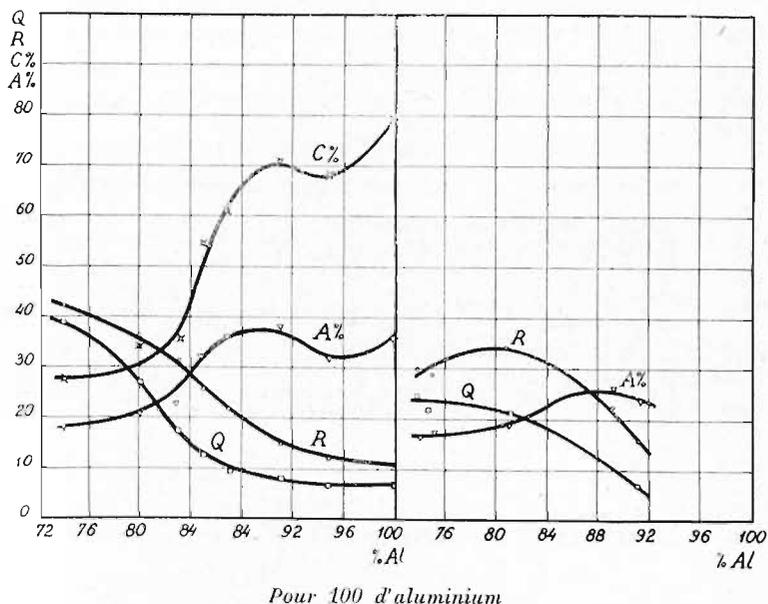


Fig. 2. Essais de traction sur des alliages aluminium-zinc suivant Rosenhain et Archbutt. A gauche, après laminage à chaud; à droite après laminage à froid. R — résistance à la traction en kg/mm<sup>2</sup>; Q — limite élastique; C% — striction et A% — allongement sur 2 pouces d'éprouvette de 0,5 pouce de diamètre.

<sup>1)</sup> Ewen et Turner J. Inst. Mét. 4 (1910) p. 149.

<sup>2)</sup> Portevin, Revue de Métall. 8 (1911) p. 721.

Pour les alliages *riches en aluminium* le recuit était fait par un échauffement de 50 min. à 400°, suivi d'un refroidissement lent dans la silice infusoire.

La trempe se faisait à 540° après un échauffement d'une heure à cette température.

Après trempe les alliages subissaient un revenu spontané de 10 jours à la température ordinaire de 20°, l'état d'équilibre paraissant presque atteint dans ces conditions.

Les propriétés mécaniques de chaque alliage binaire ou ternaire étaient mesurés sur des échantillons recuits et sur des échantillons ayant subi un revenu spontané après trempe.

*Mesures.* Les paramètres suivants ont été établis:

- $R$  — résistance à la traction en kg par mm<sup>2</sup> 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 éprouvettes internationales<sup>1)</sup> dont la distance entre les repères est égale à 10 fois leur diamètre, soit 50 mm;
- $a_{\%}^u$  allongement uniforme calculé en mesurant le diamètre  $d_0$  de l'éprouvette avant l'essai et le diamètre  $d_1$  après rupture au voisinage des repères; on trouve alors:

$$a_{\%}^u = \left( \frac{d_0^2}{d_1^2} - 1 \right) 100;$$

- $b_{\%}^s$  — allongement de striction établi par la différence

$$b_{\%}^s = A_{\%} - a_{\%}^u$$

- $c_{\%}^s$  — 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 une dureté Brinell normale ( $D = 10$  mm,  $P = 500$  kgs);

- $U$  — résilience, mesurée en kgm par cm<sup>2</sup> sur des éprouvettes de petit modèle allemand de  $10 \times 8 \times 100$  mm avec entaille de 3 mm à l'angle de 45°. Ces éprouvettes paraissent donner le plus de garantie de rupture.

Les paramètres ainsi obtenus ont permis de calculer les coefficients suivants:

- $K$  — coefficient de Brinell égal à  $\frac{R}{H}$ ;

- $T$  — surface du diagramme de traction proportionnelle au travail de rupture de l'éprouvette. Pour les alliages non dépourvus d'un allongement uniforme ce facteur peut être calculé<sup>2)</sup> par la formule

$$T = A \frac{3R + Q}{4}.$$

Le travail de rupture exprimé en kilogrammètres est alors  $\frac{Sl}{10^3} \cdot T$  où  $S$  et  $l$  sont la section et la distance entre repères de l'éprouvette en mm. Pour les éprouvettes employées dans cette étude  $S \cdot l \cdot 10^{-3} = 0,98$  de sorte que la valeur de  $T$  exprime approximativement le travail de rupture de l'éprouvette.

<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 Métallurgie 1931, 28, p. 583, form. 15.

<sup>2)</sup> Cet aspect prend la formule

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

établie par MM. Broniewski et Lewandowski (Revue de Fonderie Moderne, t. 27, 1933, p. 175) lorsqu'on remplace  $\pi$  par 3. La formule primitive donnait des nombres de 1 à 2% plus élevés que le planimétrage des courbes de traction de sorte que la formule simplifiée s'accorde davantage avec les données de l'expérience.

Les alliages zinc-aluminium manifestent à l'essai de traction des effets de rempage qui tendent à diminuer le chiffre de la résistance à la traction et à augmenter celui de l'allongement.

Afin de réduire cet effet de rempage, particulièrement sensible pour les alliages riches en zinc, nous avons effectué l'essai de traction en un temps, autant que possible uniforme de 5 minutes, un essai préliminaire de traction indiquant la vitesse de mise en charge pour les mesures définitives.

### Les alliages binaires zinc-aluminium.

Les résultats des mesures des propriétés mécaniques des alliages binaires zinc-aluminium sont indiqués au tableau I et reproduits sur les figures 3, 4, 5, 6 et 7.

Pour les alliages *riches en zinc* on remarque une forte augmentation de l'allongement (fig. 5) et de la striction (fig. 4) par la trempe, lorsque la proportion d'aluminium atteint 18%, ce qui correspond approximativement à la limite de la solution solide du zinc dans le composé  $Al_2Zn_3$  (fig. 1) qui se dissocie au refroidissement en un eutecticoïde

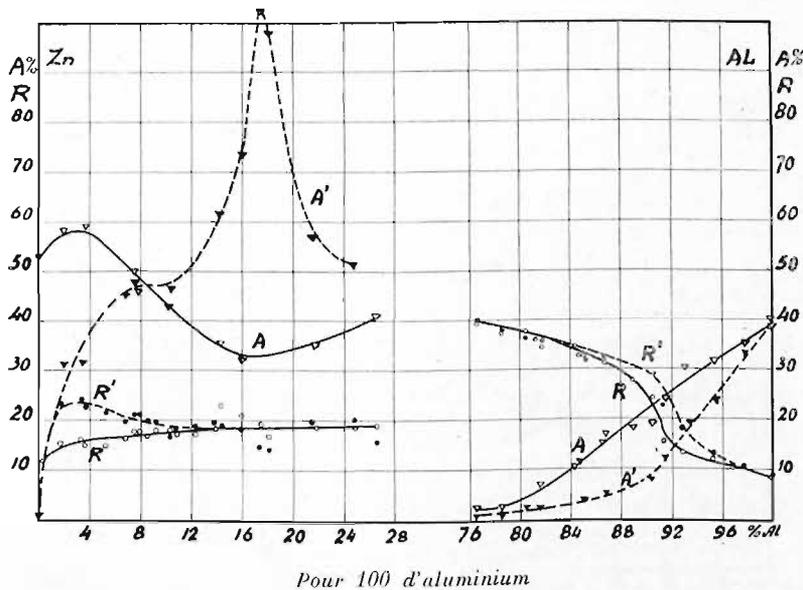


Fig. 3.  $R$  — résistance à la traction et  $A\%$  — allongement total. La ligne continue ( $R$  et  $A$ ) correspond aux alliages recuits, la ligne interrompue ( $R'$  et  $A'$ ) aux alliages vieillissants après trempe.

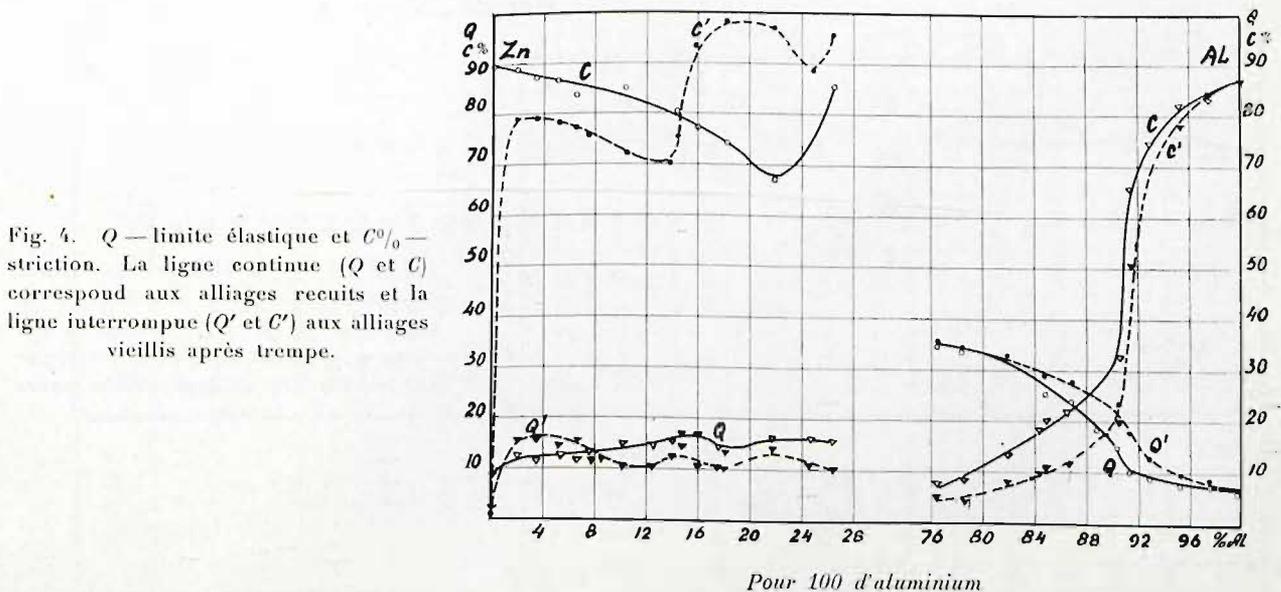
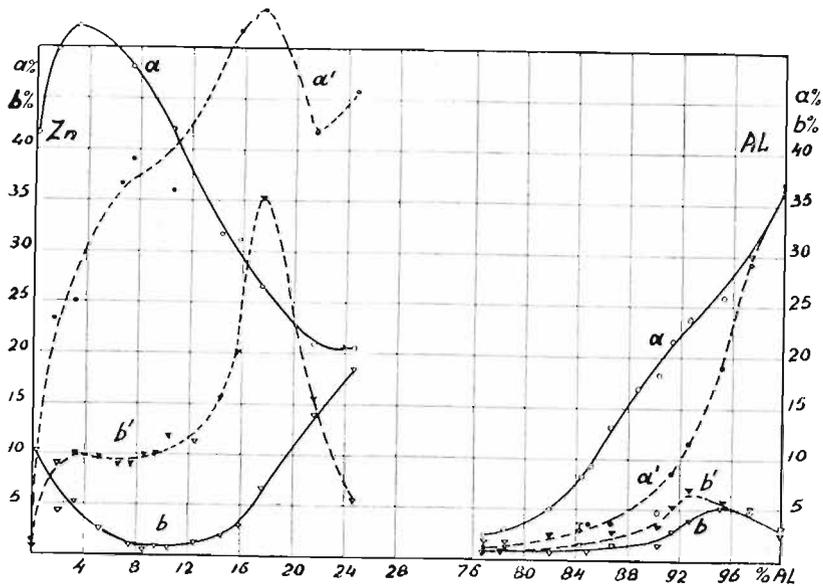


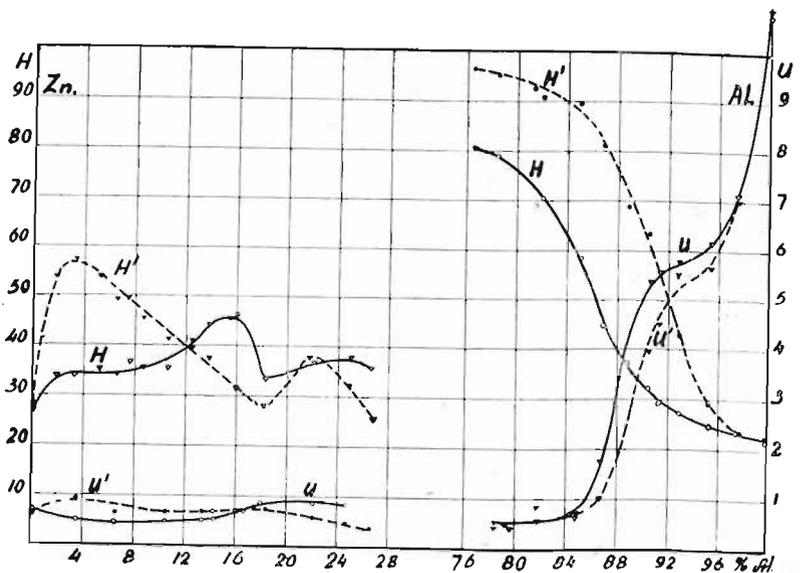
Fig. 4.  $Q$  — limite élastique et  $C\%$  — striction. La ligne continue ( $Q$  et  $C$ ) correspond aux alliages recuits et la ligne interrompue ( $Q'$  et  $C'$ ) aux alliages vieillissants après trempe.



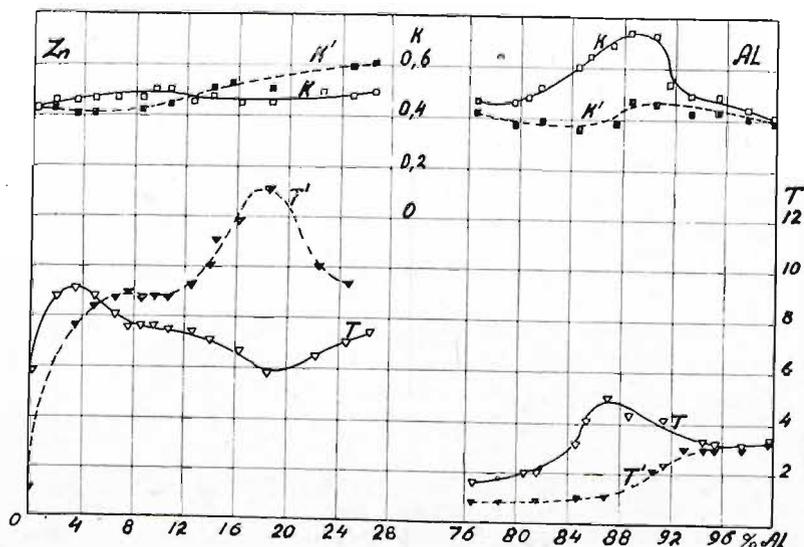
Pour 100 d'aluminium

Fig. 5.  $\alpha^0/0$  — allongement proportionnel et  $\beta^0/0$  — allongement de striction. La ligne continue ( $\alpha$  et  $\beta$ ) correspond aux alliages recuits et la ligne interrompue ( $\alpha'$  et  $\beta'$ ) aux alliages vieillis après trempe.

Fig. 6.  $H$  — dureté Brinell et  $U$  — résilience. La ligne continue ( $H$  et  $U$ ) correspond aux alliages recuits et la ligne interrompue ( $H'$  et  $U'$ ) aux alliages vieillis après trempe.



Pour 100 d'aluminium



Pour 100 d'aluminium

Fig. 7.  $K$  — coefficient de Brinell;  $T$  — travail de rupture à la traction. La ligne continue ( $K$  et  $T$ ) correspond aux alliages recuits et la ligne interrompue ( $K'$  et  $T'$ ) aux alliages vieillis après trempe.

TABLEAU I.  
Propriétés mécaniques des alliages zinc-aluminium.

% d'Al	Recuits										Trempeés										
	R	Q	A <sup>0</sup> %	a <sup>0</sup> %	b <sup>0</sup> %	C <sup>0</sup> %	H	U	K	T	R'	Q'	A' <sup>0</sup> %	a' <sup>0</sup> %	b' <sup>0</sup> %	C' <sup>0</sup> %	H'	U'	K'	T'	
0	12,0	8,0	55	45	10	89	27	0,6	0,44	5,8	5	—	27	25	4	—	28	0,6	0,11	0	
2,0	16,0	12,5	58	50	8	88	34	—	0,47	8,8	24	15	36	26,5	9,5	78	55	—	0,45	5,9	
3,5	16,5	12,5	59	54	5	87	34	0,5	0,49	9,1	22,5	15	42	33,5	8,5	77	53	0,9	0,41	7,6	
5,2	16,5	12,5	56	54	2	86	35	—	0,47	8,7	22	15	45	36,5	8,5	77	49	—	0,42	8,5	
6,6	16,5	12,5	52	50,5	1,5	84	34	0,5	0,48	8,1	20	16	45	36,5	8,5	77	49	0,5	0,41	8,6	
7,5	18,0	14,0	49	48	1	—	37	—	0,49	8,5	21	15	47	39	8	75	49	—	0,45	8,9	
7,8	17,0	13,0	47	46,5	0,5	—	35	—	0,49	7,5	21,5	12	47,5	—	—	—	—	—	—	—	9,1
8,5	17,0	13,0	47	46,5	0,5	84	35	—	0,49	7,5	20	12	47,5	28	9,5	74	45	—	0,44	8,6	
9,1	18,0	14,0	45	44	1	—	—	—	—	7,7	20	12	47,5	28	10,5	—	45	—	0,46	8,5	
10,4	18,5	15,0	45	42	1	85	35	0,4	0,52	7,5	19	11	48	36	12	72	41	0,7	0,46	8,2	
12,5	17,5	15,0	59	58	1	—	41	—	0,43	6,6	19,5	11	52	41	11	—	59	—	0,50	9,0	
13,9	19,5	16,0	56	55	1	80	45	0,5	0,45	6,7	20	15	58	46	12	70	57	0,6	0,54	10,6	
14,5	22,5	17,5	58	55	2	80	46	0,6	0,49	8,0	19	15	62	47,5	4,5	75	46	0,6	0,41	11,1	
15,9	20,0	18,0	55	50	5	77	45	0,7	0,44	6,4	18	11	72	52	20	93	52	0,7	0,56	11,7	
17,7	18,5	14,0	55	26	7	—	—	0,8	—	5,7	15	10	105	65	42	98	29	—	0,52	14,5	
18,0	17,5	14,0	55	25	8	74	58	—	0,46	5,5	14,5	10	98	65	55	97	28	0,8	0,52	13,1	
21,7	19,5	16,0	55	22	15	67	57	0,9	0,53	6,5	18,5	14	57	42	15	97	57	0,6	0,50	9,9	
24,7	18,5	16,0	59	21	18	—	57	0,8	0,5	7,0	20	11	52	46	6	88	52	0,5	0,65	9,2	
26,8	19,0	16,0	41	—	—	85	56	—	0,55	7,5	16	10	—	—	—	95	25	—	0,64	—	
76,5	59,5	55,5	4,2	2,5	1,9	7	80	—	0,49	1,6	59,8	36,0	2,0	1,5	0,7	5	96	—	0,41	0,78	
78,5	57,5	54,5	4,0	5,1	0,9	9	79	0,5	0,47	1,4	57,5	34,2	2,5	1,0	1,5	4	95	0,5	0,59	0,84	
80,2	57,4	55,0	4,9	—	—	11	74	0,6	0,51	1,8	57,4	—	2,5	—	—	—	94	0,6	0,4	—	
81,5	56,5	—	—	5	2	12	68	—	0,54	—	—	—	—	—	—	—	95	—	—	—	
81,7	54,5	52,0	7,9	5,1	2,8	15	70	0,6	0,49	2,7	56	32,5	2,5	1,5	1,2	7	90	0,7	0,56	0,88	
84,2	54,5	29,0	10,5	7,1	3,2	17	57	0,8	0,60	5,4	—	—	—	—	—	—	—	0,4	—	—	
84,7	52,5	25,8	11,2	8	3,2	18	—	—	—	5,5	53,8	30,5	4,1	2,9	1,2	9	89	—	0,58	1,55	
85,1	52,6	26,0	15,8	8,4	5,4	18	50	—	0,65	4,5	52	29,2	4,5	4,1	0,4	11	—	—	—	1,4	
86,8	51,6	24,0	16,0	13,2	2,8	25	—	1,8	—	4,8	52,5	28,0	4,5	5,8	0,7	12	—	0,9	—	1,4	
86,9	51,5	25,5	17,5	14,5	5	25	44	—	0,71	5,1	52,4	—	5,5	5,9	1,4	12	82	—	0,4	—	
88,8	27,8	19,0	18,7	16,8	1,9	—	58	—	0,75	4,8	—	—	—	—	—	—	68	—	—	—	
90,4	24,1	14,8	19,5	18,5	1,2	55	52	5,1	0,75	4,2	29,5	25,0	8,0	4,6	5,4	20	66	5,9	0,45	2,2	
91,5	15,9	10,5	24,5	21,5	2,8	66	50	5,6	0,55	5,6	22,5	16,7	12,5	7,4	5,1	50	60	4,2	0,57	2,6	
92,8	15,7	9,0	50,7	26,7	4,0	75	27	5,9	0,51	5,8	18,1	12,6	19,6	11,8	7,8	67	45	5,7	0,42	3,5	
95,2	12,1	7,5	52,5	26,4	5,9	82	25	6,1	0,48	5,5	15,5	9,0	25,9	18,7	5,2	78	50	5,8	0,45	5,0	
97,6	10,5	7,5	55,0	50,0	5,0	85	24	7,0	0,44	5,4	10,7	7,0	55,6	29,2	4,4	85	24	7	0,45	5,5	
100	8,5	6,5	40,1	57,0	5,1	87	22	10,8	0,59	5,2	8,6	6,4	59,6	57	2,6	87	22	10,8	0,59	5,2	

à structure très fine. L'augmentation de l'allongement est due autant à l'allongement de striction qu'à l'allongement proportionnel (fig. 5) et a pour conséquence une augmentation sensible du travail de rupture à la traction ( $T'$ , fig. 7), qui atteint alors 15 kgm.

Par contre le zinc pur paraît perdre presque complètement par la trempe son allongement et sa striction ce qui peut être dû à son passage dans la modification allotropique  $\beta$  stable à haute température (fig. 5).

La dureté des alliages riches en zinc est faible et n'atteint les 50 unités de Brinell, normales pour l'application technique, que par la trempe des alliages contenant de 2 à 7% d'aluminium.

Pour les alliages riches en aluminium on voit que la trempe augmente leur résistance à la traction et leur limite élastique, mais diminue davantage l'allongement (fig. 3 et 4) de sorte que le travail de rupture à la traction se trouve réduit par la trempe (fig. 7). La striction (fig. 4) tombe fortement lorsque la proportion de zinc dépasse 8% et se trouve encore davantage réduite par la trempe. La dureté des alliages dépasse alors 50 unités, mais leur résilience diminue rapidement (fig. 6).

### Les alliages zinc-aluminium additionnés de 3 p. 100 de cuivre.

Les résultats des mesures sur les propriétés mécaniques des alliages zinc-aluminium, additionnés de 3 p. 100 de cuivre, sont indiqués au tableau II et reproduits sur les figures 8, 9, 10, 11 et 12.

Pour les alliages riches en zinc on observe à 2% d'aluminium une dépression pour

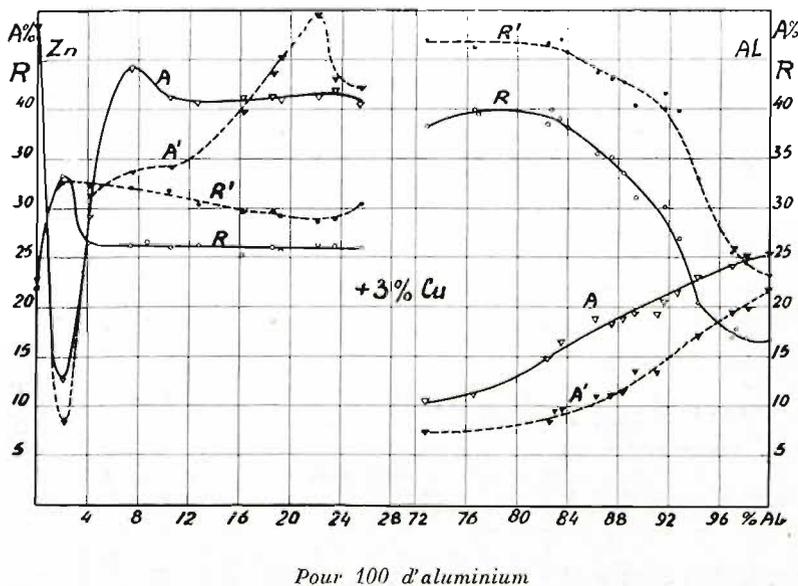


Fig. 8.  $R$  — résistance à la traction et  $A\%$  — allongement total. La ligne continue ( $R$  et  $A$ ) correspond aux alliages recuits, la ligne interrompue ( $R'$  et  $A'$ ) aux alliages vieillis après trempe.

l'allongement (fig. 8 et 10) et pour la striction (fig. 9), analogue à celle que manifeste le zinc pure par la trempe.

Le maximum de ces paramètres qui se manifestait à 18% d'aluminium pour les alliages binaires se trouve déplacé par la présence du cuivre à 22%.

La dureté des alliages riches en zinc (fig. 11) se trouve sensiblement augmentée par la présence du cuivre et atteint ainsi les valeurs normales pour les applications industrielles aussi bien à l'état trempé qu'à l'état recuit. Par contre la résilience (fig. 11) qui déjà était faible pour les alliages binaires se trouve davantage réduite par l'addition du cuivre.

Le travail de rupture à la traction ( $T$ , fig. 12) se maintient pour les alliages recuits contenant de 7 à 25% d'aluminium à un niveau très satisfaisant de 10 kgm et se trouve encore amélioré par la trempe suivie d'un revenu spontané.

Pour les alliages riches en aluminium additionnés de cuivre et trempés on voit la résistance à la traction dépasser 45 kg lorsque la proportion de zinc dépasse 15 p. 100, mais l'allongement tombe alors au dessous de 10% (fig. 8), de sorte que le travail de

TABLEAU II.

Propriétés mécaniques des alliages zinc-aluminium-cuivre. La composition des alliages correspond à 97 p. 100 d'alliage zinc-aluminium indiqué et 3 p. 100 de cuivre.

% d'Al	Recuits										Trempeés									
	R	Q	A <sup>0</sup> / <sub>10</sub>	a <sup>0</sup> / <sub>10</sub>	b <sup>0</sup> / <sub>10</sub>	C <sup>0</sup> / <sub>10</sub>	H	U	K	T	R'	Q'	A' <sup>0</sup> / <sub>10</sub>	a' <sup>0</sup> / <sub>10</sub>	b' <sup>0</sup> / <sub>10</sub>	C' <sup>0</sup> / <sub>10</sub>	H'	U'	K'	T'
0	23,0	18	50,5	45,0	5,5	85	52	0,4	0,4	11,0	22,0	19	48	55	15	79	51	0,8	0,45	9,8
2,2	33,5	27	13,0	8,0	5,0	20	67	0,2	0,5	4,2	32,5	29	6	5,8	0,2	17	85	0,7	0,39	1,9
4,0	26,5	18	29,0	22,0	7,0	64	62	0,2	0,43	7,1	32,5	28	51,5	19,5	12	62	80	0,5	0,41	9,8
7,5	26,5	19	44,0	31,0	15,0	80	—	0,2	—	10,9	32,0	28	33,5	22	11,5	65	77	0,5	0,42	10,4
8,7	26,5	18	—	31,0	—	—	47	0,2	0,56	—	32,0	27	34	21,5	12,5	—	—	0,4	—	10,5
10,4	26,0	17	41,5	27,0	14,5	—	45	0,2	0,58	9,9	32,0	27	34	21,5	12,5	66	75	0,4	0,45	10,5
2,7	26,5	18	40,5	26,0	14,5	75	46	0,2	0,58	10	30,5	26	36	—	—	66	70	0,2	0,44	10,5
16,2	25,5	18	41,5	—	—	—	45	—	0,6	9,7	30,0	24	40	—	—	—	67	—	0,45	11,4
18,6	26,0	19	41,0	28,5	12,5	—	45	0,4	0,58	9,9	29,7	24	43,5	24	19,5	—	65	0,4	0,46	12,5
19,4	26,0	19	41,0	—	—	71	46	0,5	0,57	9,9	29,5	24	45,5	—	—	75	64	0,5	0,46	12,7
22,2	26,8	19	41,5	29,5	12,0	72	46	0,4	0,58	10,5	28,5	25	49,5	27	22,5	86	61	—	0,47	13,4
23,4	26,5	18	42,0	29,0	13,0	71	46	0,4	0,58	10,5	29,0	25	45	24	19	76	61	0,4	0,48	12
25,7	26,0	20	40,5	28,5	12,0	72	47	0,4	0,55	10	30,5	28	42	22	20	78	62	0,4	0,49	12,5
72,8	38,5	30	12,0	8,0	4,0	17	80	—	0,48	4,5	47,0	41	7,5	4,5	3,0	19	120	—	0,59	3,4
76,6	40,0	32	11,5	7,5	4,0	18	83	0,5	0,48	4,4	46,5	42	—	4,5	—	18	119	0,5	0,59	—
82,0	38,5	30	12,0	8,0	4,0	20	75	0,7	0,51	4,5	46,5	45	8,5	—	—	18	—	0,4	—	5,9
83,5	38,0	32	16,5	10,0	6,5	22	75	1,2	0,50	6	46,0	40	10,0	5,0	5,0	20	119	0,5	0,59	4,4
84,4	36,0	—	18,0	—	—	—	72	—	0,50	—	46,5	—	10,0	—	—	—	—	0,5	—	—
86,1	35,5	26	21,0	—	—	—	62	1,5	0,57	7,4	44,0	38	11,5	—	—	—	110	0,5	0,4	4,9
87,4	35,0	25	16,0	11,0	5,0	29	61	—	0,57	5,2	45,0	36	11,5	6,0	5,5	27	107	—	0,4	4,7
88,5	35,5	24	19,5	12,0	7,5	37	59	—	0,57	6,1	42,5	35	11,6	6,5	4,8	32	106	—	0,4	4,7
89,2	31,0	24	19,0	12,5	6,5	38	—	2,6	—	5,5	40,5	35	13,5	8,0	5,5	35	105	0,7	0,59	5,2
91,0	30,0	21	19,5	12,5	7,0	42	52	—	0,58	5,4	40,5	35	13,5	8,0	5,5	37	100	0,8	0,4	5,2
92,7	27,0	14	11,5	7,5	4,0	—	50	—	0,54	2,7	40,0	31	—	—	—	40	95	—	0,45	—
94,1	20,5	15	23,0	16,5	5,5	60	42	3,4	0,49	4,5	35,0	27	17,5	8,5	9,0	44	85	1,5	0,4	5,5
96,9	17,0	12	24,0	18,0	6,0	65	37	4,5	0,46	3,8	25,5	19	19,5	11,5	8,0	48	67	3,5	0,58	4,6
98,0	17,0	12	25,0	17,5	7,5	62	35	—	0,49	4,0	24,5	19	20,0	13,0	7,0	53	58	—	0,42	4,6
100	17,0	11	25,5	19,5	6,0	65	35	4,9	0,51	3,9	25,0	16	22,0	13,5	8,5	60	51	4,6	0,45	4,7

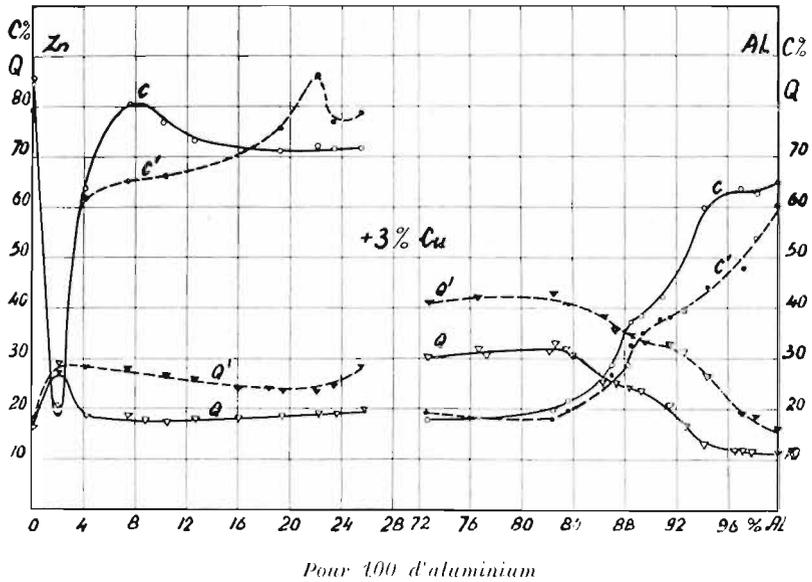
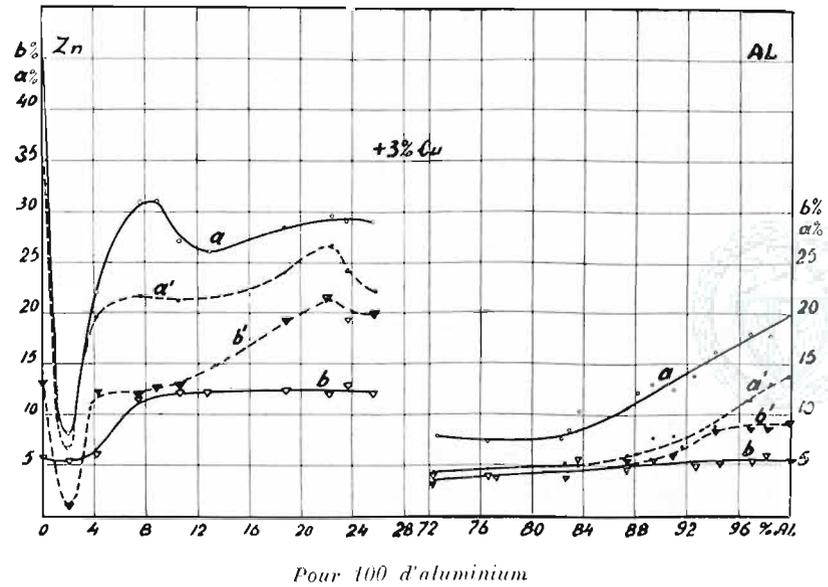


Fig. 9.  $Q$  — limite élastique et  $C^0/0$  — striction. La ligne continue ( $Q$  et  $C$ ) correspond aux alliages recuits, la ligne interrompue ( $Q'$  et  $C'$ ) aux alliages vieillis après trempe.

Fig. 10.  $a^0/0$  — allongement proportionnel et  $b^0/0$  — allongement de striction. La ligne continue ( $a$  et  $b$ ) correspond aux alliages recuits et la ligne interrompue ( $a'$  et  $b'$ ) aux alliages vieillis après trempe.



Pour 100 d'aluminium

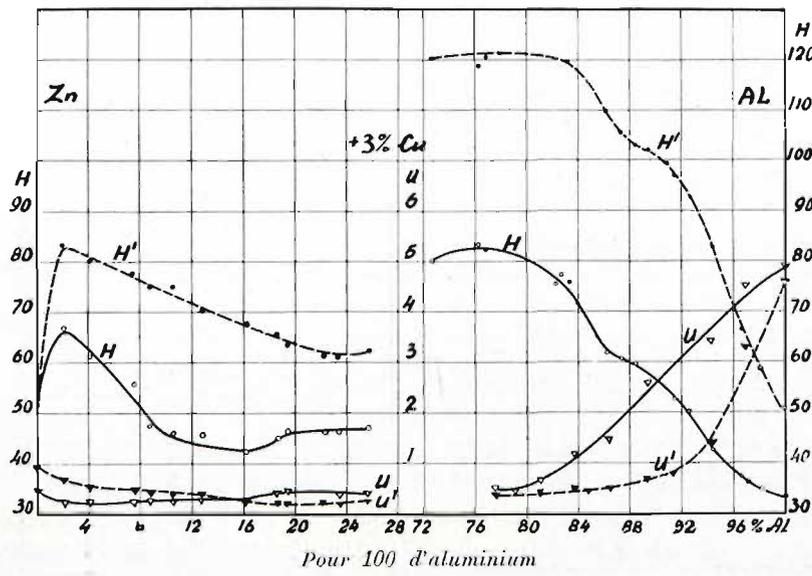


Fig. 11.  $H$  — dureté Brinell et  $U$  — résilience. La ligne continue ( $H$  et  $U$ ) correspond aux alliages recuits et la ligne interrompue ( $H'$  et  $U'$ ) aux alliages vieillis après trempe.

Pour 100 d'aluminium

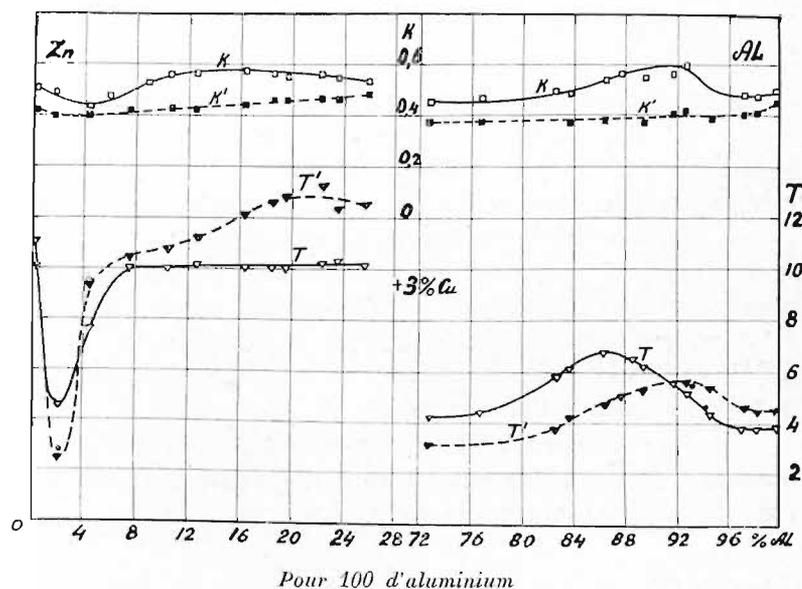


Fig. 12.  $K$  — coefficient de Brinell;  $T$  — travail de rupture à la traction. La ligne continue ( $K$  et  $T$ ) correspond aux alliages recuits et la ligne interrompue ( $K'$  et  $T'$ ) aux alliages vieillis après trempe.

rupture à la traction (fig. 12) ne dépasse pas 5 kg et apparaît sensiblement inférieur à celui des duralumins <sup>1)</sup> qui manifestent aussi une meilleure aptitude au laminage.

La dureté (fig. 11) des alliages légers aluminium-zinc se trouve sensiblement augmentée par l'addition de cuivre et peut atteindre par la trempe et le revenu spontané 120 unités lorsque la proportion du zinc dépasse 17 p. 100 mais la résilience de ces alliages (fig. 11) est assez faible, inférieure à 0,5 kgm.

### R é s u m é.

1. L'étude des propriétés mécaniques a été faite pour les alliages laminés zinc-aluminium contenant de 0 à 25 et de 76 à 100% d'aluminium et soit recuits, soit trempés et revenus à la température ordinaire. Pour les alliages riches en zinc, le recuit était fait par échauffement de 30 min. à 100° et un refroidissement à l'air; la trempe à 350° était suivie d'un revenu spontané de 5 semaines.

Pour les alliages riches en aluminium, le recuit de 30 min. à 400° était suivi d'un refroidissement dans la silice infusoire; la trempe à 540° était suivie d'un revenu spontané de 10 jours.

2. L'étude des propriétés mécaniques a été faite aussi pour les alliages ternaires contenant 3 p. 100 de cuivre, additionnés aux alliages binaires zinc-aluminium précédemment mis à l'étude. Ces alliages ternaires subissaient le même traitement thermique que les alliages binaires.

3. 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.

4. Pour les alliages binaires, riches en zinc, on remarque une augmentation de l'allongement jusqu'à 100% par la trempe, lorsque la proportion de l'aluminium atteint 18%. Par contre, le zinc paraît perdre presque complètement, par la trempe, son allongement et sa striction. La dureté de la majeure partie de ces alliages est trop faible pour les applications techniques.

<sup>1)</sup> Broniewski et Pilko, Sur les propriétés mécaniques des alliages légers aluminium-cuivre. Annales de l'Académie des Sciences Techniques à Varsovie, t. 3 (1936) p. 231, (Dunod, Paris).

5. Pour les alliages binaires, riches en aluminium, on voit que la trempe augmente leur résistance à la traction et leur limite élastique, mais diminue davantage l'allongement, de sorte que le travail de rupture à la traction se trouve réduit par la trempe.

6. La dureté des alliages riches en zinc se trouve sensiblement augmentée par la présence de 5% de cuivre, de sorte que les alliages contenant de 7 à 25 p. 100 d'aluminium remplissent toutes les conditions des alliages industriels.

7. L'addition de cuivre aux alliages riches en aluminium augmente sensiblement leur résistance à la traction et leur dureté, qui pour les alliages trempés, peuvent dépasser respectivement 45 kg/mm<sup>2</sup> et 120 unités, mais l'allongement à la traction et la résilience tombent alors respectivement vers 7% et 0.5 kgm. Parmi les alliages légers zinc-aluminium à 5% de cuivre, les meilleurs propriétés mécaniques moyennes paraissent avoir ceux à 14% de zinc à l'état recuit.

Ces alliages à l'état laminé n'arrivent pas à égaler les duralumins, mais il est à remarquer que ceux-ci ont pu être perfectionnés par des travaux nombreux ayant établi le rôle d'additions multiples ce qui n'a pas encore été fait pour les alliages zinc-aluminium.