

SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES ALLIAGES ALUMINIUM-MAGNÉSIUM

par MM. W. Broniewski, P. Bernaciak et S. Blazewski.

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

I. Conditions de mesures.

Structure. Parmi les alliages aluminium-magnésium, seules les solutions solides du côté de l'aluminium et du côté du magnésium trouvent une application pratique.

La solution solide limite du magnésium dans l'aluminium paraît s'étendre, suivant MM. Schmid et Siebel¹⁾, jusqu'à 15% à la température de son solidus, vers 450°, se retrécit ensuite jusqu'à 4,5% environ à 250° pour tomber à 5% vers 150°. Des nombres peu différents avaient été indiqués auparavant par MM. Dix et Keller²⁾. Lorsque la limite de cette solution se trouve dépassée, apparaît une nouvelle phase qui, suivant M. Hanson et M-elle Gayler³⁾ correspond au composé Al_3Mg_2 .

La solution solide limite du côté du magnésium peut contenir, à la température de son solidus (436°), environ 12% d'aluminium. Cette solution solide se dissocie assez difficilement, de sorte que les nombres indiqués pour sa teneur à des températures plus basses diffèrent sensiblement. Ainsi, pour 300° Hanson-Gayler (l. cit.) indiquent pour la solution solide limite 9 p. 100 d'aluminium, alors que MM. Schmid-Seliger⁴⁾ trouvent à cette température une solubilité de moitié inférieure.

Lorsque la solubilité du magnésium envers l'aluminium est dépassée, apparaît probablement le composé Al_3Mg_2 ⁵⁾ faisant partie de l'eutectique à 52% d'aluminium.

Historique. L'étude de M. Vachet⁶⁾ sur les propriétés mécaniques des alliages aluminium-magnésium, riches en aluminium, se rapporte aux alliages contenant jusqu'à 15 p. 100 de magnésium brut de laminage et ayant subi un traitement thermique. Suivant cet auteur, jusqu'à 8% de magnésium la trempe à l'eau donne les mêmes caractéristiques qu'un refroidissement lent. Au delà de cette teneur les alliages subissent l'effet de la trempe, du revenu et du recuit. Les résultats principaux de cette étude sont reproduits sur la fig. 1.

Dans l'étude de MM. Chaudron et Dandres⁷⁾ l'aluminium et le magnésium, employés pour les alliages, étaient d'une grande pureté voisine de 99,99%. La fig. 2 re-

¹⁾ Schmid et Siebel. Zs. Metallkunde 23 (1931), p. 202.

²⁾ Dix et Keller. Zs. Metallkunde 21 (1929), p. 205.

³⁾ Hanson et Gayler. J. Inst. Met. 24 (1920), p. 201.

⁴⁾ Schmid et Seliger. Zs. Elektrochem. 37 (1931), p. 455; J. Inst. Met. 48 (1932), p. 226.

⁵⁾ Hanson et Gayler (l. cit.).

Broniewski. Ann. Chim. et Phys. 25 (1912), p. 73; C. R. 152 (1911), p. 85.

⁶⁾ Vachet. Revue de Métallurgie 32 (1935), p. 615.

⁷⁾ Chaudron et Dandres. C. R. 200 (1935), p. 1324.

produit les résultats obtenus par les auteurs pour la résistance à la traction des alliages laminés, homogénéisés à 450° et trempés à cette température.

La présence du silicium et du manganèse élève, suivant ces auteurs (fig. 2), la résistance à la traction et abaisse l'allongement des alliages aluminium-magnésium de sorte, que la somme $R+A$ reste constante pour la même teneur en Mg . Par contre, la présence du zinc et du cadmium ne paraît pas modifier les propriétés mécaniques de ces alliages lorsqu'ils sont formés par une solution solide.

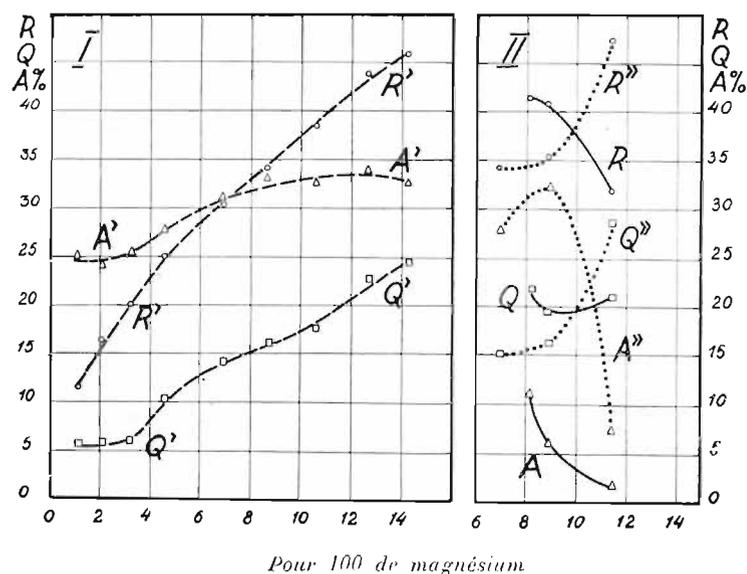


Fig. 1. Propriétés mécaniques des alliages aluminium-magnésium suivant M. Vachet. I — Limite élastique Q' , résistance à la traction R' et allongement à la rupture $A' \%$ des alliages trempés à 450° après chauffage de 5 heures. II — Q , R et $A \%$, après un recuit de 11 jours à 150° à partir de l'état brut après laminage, Q'' , R'' et $A'' \%$, après revenu des alliages trempés pendant 2 h. 30 m. à 200°.

Les données qu'on trouve sur les alliages du magnésium avec l'aluminium se rapportent donc, presque de règle, non pas aux alliages binaires, mais à des alliages ternaires ou quaternaires²⁾ dont on ne pourrait tirer qu'indirectement quelques indications sur les alliages binaires.

Préparation des échantillons. L'aluminium technique employé contenait environ 0,4% d'impuretés constitués, presque en parties égales, par du fer et du silicium.

Le magnésium contenait environ 0,5% d'impuretés, constitués surtout par du fer et des carbures.

La fusion se faisait au four à résistance électrique sous une couche spongieuse, formée par un mélange, en parties égales, de $CaCl_2$, $MgCl_2$, KCl et CaF_2 . Ce mélange servait aussi à brasquer les creusets en terre réfractaire afin d'éviter leur attaque par le métal en fusion.

¹⁾ Portevin et Bastien. C. R. 196 (1933) p. 693.

²⁾ Portevin. Les alliages légers et ultra-légers. Publication spéciale de Chimie et Industrie, 1926, p. 276. Les alliages ultra-légers à base de magnésium. Congrès International de sécurité aérienne, 1930, t. I p. 35.

Portevin et Bastien. Study of the Forgeability of various light and ultralight Alloys. J. Inst. Met. 49 (1936) p. 88.

Warrington. Light Alloy Practice. The Metal Industrie January and February, 1936.

Siebel. Technologie der Magnesium-Legierungen. Association for Testing Materials. Intern. Congress London, 1937, rapport 61.

Houghton. Recent développements in magnesium alloys. Ibidem, rapport 62.

La précipitation du composé Al_3Mg_2 par le recuit provoque une baisse sensible de l'allongement, sans augmenter le charge de rupture.

Pour les alliages binaires magnésium-aluminium, riches en magnésium, aucune étude systématique ne paraît avoir été faite. MM. Portevin et Bastien¹⁾ indiquent pour ces alliages à l'état filé, les caractéristiques mécaniques de l'ordre: résistance à la traction de 28 à 50 kg/mm², allongement à la rupture de 17 à 20%; résilience de 0,9 à 1,2 kgm/cm².

Les alliages industriels, riches en magnésium, contiennent ordinairement en plus de l'aluminium de 0,5 à 5% de zinc, ayant pour but d'augmenter la fluidité et la plasticité, de 0,5 à 0,5% de manganèse, réduisant la corrosion et parfois jusqu'à 0,5% de silicium ayant pour but d'augmenter la dureté.

La coulée en coquilles se faisait à une température, autant que possible, rapprochée du liquidus et donnait des lingots de 18 mm de diamètre qui subissaient le laminage et l'étirage.

Les alliages du côté de l'aluminium, contenant jusqu'à 8 p. 100 de magnésium, étaient laminés à froid, en subissant à chaque écrouissage de 20% environ, un recuit de 20 min. à 450°. Pour le finissage des échantillons, le laminage était remplacé par l'étirage.

A partir de 8% de magnésium le laminage se faisait à chaud, après un chauffage préalable à 400°, alors que le finissage avait toujours lieu par étirage à froid.

Les alliages du côté du magnésium étaient laminés et étirés de la même façon que les alliages du côté de l'aluminium, contenant plus de 8% de magnésium.

Traitement thermique. Pour les alliages du côté de l'aluminium, les études préliminaires nous ont fait adopter les conditions suivantes du traitement thermique.

Recuit: Les éprouvettes, maintenues pendant 5 heures à 450°, étaient refroidies au four électrique en 12 jours à partir de cette température jusqu'à 100°, puis sorties du four et refroidies à l'air.

Trempe: les éprouvettes étaient maintenues pendant 5 heures à 450° et trempées à l'eau de 20°.

Revenu: les éprouvettes, trempées au préalable, étaient maintenues 5 heures à 200°, puis trempées à l'eau de 20°.

Les alliages du côté du magnésium ont été trouvés réfractaires au traitement thermique dans des conditions pouvant avoir quelque importance industrielle.

Ainsi, l'alliage à 8,5% d'aluminium conservait sensiblement les mêmes propriétés mécaniques aux traitements suivants:

a) trempe à l'eau après chauffage de 1 heure à 400°, b) — refroidissement lent, en 5 heures, de 400° à 100°; c) — recuit de 15 min à 400° et refroidissement à l'air.

On se contentait donc d'enlever aux alliages, du côté du magnésium, leur écrouissage par un chauffage de 15 min à 400° suivi d'un refroidissement à l'air.

Paramètres mesurés. Des barres de 5 mm de diamètre servaient pour l'étude de traction et de la dureté; pour la résilience on employait des barres de 8×10 mm de section.

Les paramètres suivants ont été établis:

R — résistance à la traction en kgs par mm² sur fils de 5 mm de diamètre.

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

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

$a\%$ — 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

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

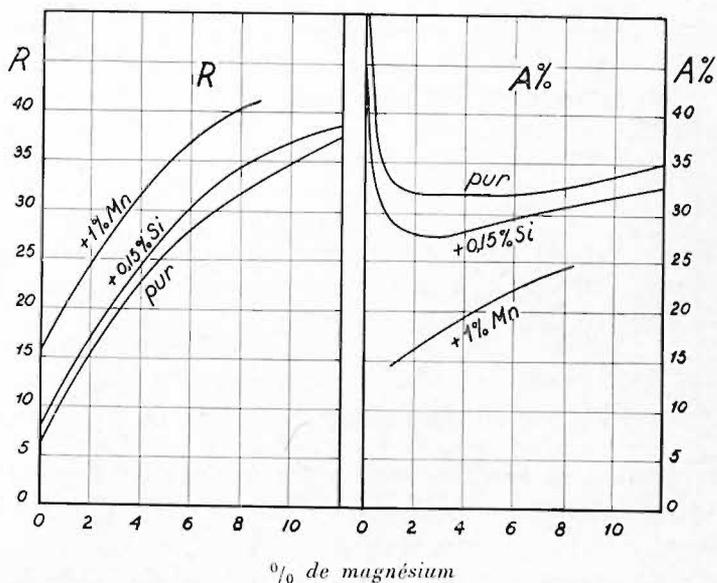


Fig. 2. Résistance à la traction (à gauche) et l'allongement à la rupture des alliages aluminium-magnésium trempés suivant MM. Chaudron et Dandres.

b^0_0 — allongement de striction, établi par la différence $b^0_0 = A^0_0 - a^0_0$.

C^0_0 — calculé en mesurant le diamètre de l'éprouvette avant l'essai (d_0) et à l'endroit de la rupture (d_2). On avait alors

$$C^0_0 = \left(1 - \frac{d_2^2}{d_0^2}\right) 100$$

T — surface du diagramme de traction, proportionnelle au travail de rupture de l'éprouvette. Ce facteur peut être calculé ¹⁾ très approximativement par la formule

$$T = 0,25 (3R + Q).$$

Le travail de rupture, exprimé en kilogrammètres, est alors égal à $\frac{Sl}{10^3} T$ où S est la section et l la distance entre repères de l'éprouvette, exprimés en mm. Pour les éprouvettes employées dans cette étude la valeur $Sl \cdot 10^{-3} = 0,98$, et peut être approximativement admise comme égale à 1.

H — dureté Brinell, obtenue par le rapport de la pression de 12 kgs à la surface d'empreinte d'une bille de 5 mm et corrigée afin d'équivaloir à la dureté Brinell normale ($D = 10$ mm, $P = 500$ kgs).

U — résilience, mesurée en kgm par cm² sur des éprouvettes de petit modèle allemand de $8 \times 10 \times 100$ mm avec entaille de 5 mm à l'angle 45°.

Les essais de traction étaient faits sur une machine Amsler de 10 t.; un mouton-pendule Charpy de 15 kgm servait aux essais de résilience.

L'allongement, ainsi que les diamètres d_0 , d_1 et d_2 des éprouvettes étaient mesurés à l'aide d'un microscope sur vis micrométrique (1 division = 0,01 mm). Les empreintes microscopiques de dureté étaient mesurées au microscope avec échelle sur l'oculaire (1 division = 0,005 mm).

II. Résultats des mesures.

Pour les échantillons préparés et traités de la façon qui vient d'être décrite, les mesures ont donné des nombres indiqués aux tableaux I, II et III et reproduits sur les figures de 3 à 7.

Essais de traction. Les résultats obtenus par l'essai de traction sont reproduits aux figures 3, 4 et 5.

Nous voyons que pour *les alliages du côté de l'aluminium* l'effet du traitement thermique commence à se faire sentir à partir de 5% de magnésium environ. Les alliages recuits manifestent, à la traction, les chiffres les plus bas. La trempe donne les nombres les plus élevés pour les allongements à la traction (fig. 3 et 5) et la striction (fig. 4), alors que le revenu donne les nombres les plus élevés pour la résistance à la traction et la limite élastique (fig. 3 et 4).

Vers 8 p. 100 de Mg l'allongement et la striction passent par un minimum pour s'améliorer à des teneurs plus élevées.

Pour *les alliages du côté du magnésium*, nous voyons la résistance à la traction et la limite élastique monter progressivement, lorsque la teneur en aluminium augmente,

¹⁾ Cet aspect prend la formule

$$T = QA + 0,25 \pi (R - Q) A$$

(Broniewski et Lewandowski) Revue de Fonderie Moderne, t. 27, 1933 p. 175) lorsqu'on y remplace π par le nombre 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.

T A B L E A U I.

Propriétés mécaniques des alliages aluminium-magnésium recuits.

Mg ⁰ /o	R	Q	A ⁰ /o	a ⁰ /o	b ⁰ /o	H	C ⁰ /o	U	K	T
0	8,5	4,7	56,6	24,0	12,6	25	88	11,4 *)	0,58	2,8
1,2	14,4	7,8	26,8	18,6	8,2	51	79	9,9 *)	0,46	5,4
2,0	17,4	8,5	25,8	18,4	7,4	57	72	6,4	0,47	3,9
3,1	22,0	9,8	24,1	18,2	5,9	45	66	5,6	0,51	4,6
4,0	25,5	12,7	22,4	17,4	5,0	—	60	—	0,55	5,0
4,5	—	—	—	—	—	50	—	4,9	—	—
4,7	27,6	14,2	23,0	17,8	5,2	—	55	—	0,55	5,6
5,1	—	—	—	—	—	51	—	4,6	—	—
6,0	28,9	15,9	14,8	15,8	1,0	—	50	—	0,57	3,8
6,2	—	—	—	—	—	52	—	2,6	—	—
6,5	29,7	16,9	7,5	6,5	0,8	—	21	—	—	1,9
7,0	51,2	18,5	5,1	4,7	0,4	55	15	1,5	0,56	1,4
8,0	51,4	19,4	5,5	2,9	0,59	56	7	1,5	0,56	1,0
8,6	52,5	21,5	7,8	7,1	0,7	58	8	0,7	0,56	2,3
9,9	—	—	—	—	—	65	—	0,6	—	—
10,5	53,1	22,0	12,4	10,1	2,5	—	12	—	0,52	5,8
11,5	53,7	23,1	15,6	11,1	2,5	—	14	—	—	—
11,7	—	—	—	—	—	67	—	0,1	0,50	4,2
90,5	50,8	20,4	10,4	6,9	5,5	48	15 (B)	0,2	0,64	2,9
91,2	50,9	19,7	14,6	11,0	5,6	47	19 (B)	0,6	0,66	4,2
92,5	29,2	18,0	17,7	12,5	5,2	45	28 (B)	0,9	0,65	4,5
93,6	27,2	16,2	18,5	15,0	5,5	43	55 (B)	—	0,65	4,6
94,5	26,4	15,4	18,9	15,5	5,4	42	45	1,0	0,65	4,5
95,4	24,7	14,9	19,2	14,0	5,2	41	—	1,0	0,61	4,5
96,0	24,6	14,8	19,8	14,0	5,8	40	40 (B)	—	0,62	4,5
97,0	24,2	14,5	20,2	15,0	5,2	38	45 36 (B)	0,9	0,64	4,5
98,0	25,5	14,2	20,5	15,2	5,5	37	47 26 (B)	—	0,64	4,4
99,0	22,5	14,2	20,5	15,5	4,8	35	49 25 (B)	0,9	0,65	4,2
100	21,6	15,7	15,4	15,0	0,4	52	24 (B)	0,7	0,68	5,1

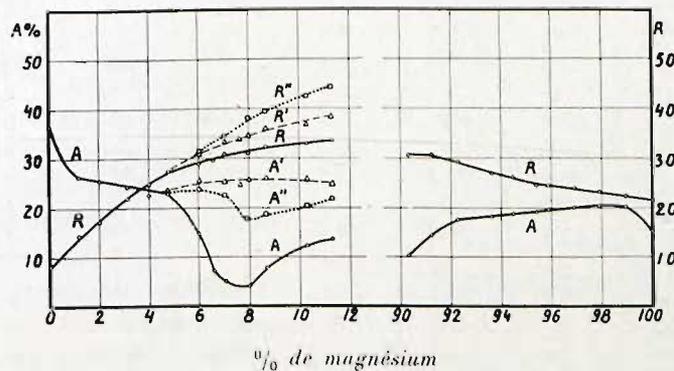


Fig. 3. R — résistance et A — allongement total à la traction. La ligne continue (R et A) correspond aux alliages recuits, la ligne interrompue (R' et A') aux alliages trempés et la ligne pointillée (R'' et A'') aux alliages revenus.

*) Les astérisques indiquent une éprouvette pliée avec fissure.

B) Indique une rupture en biseau de l'éprouvette.

Fig. 4. Q —limite élastique et C —striction. 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

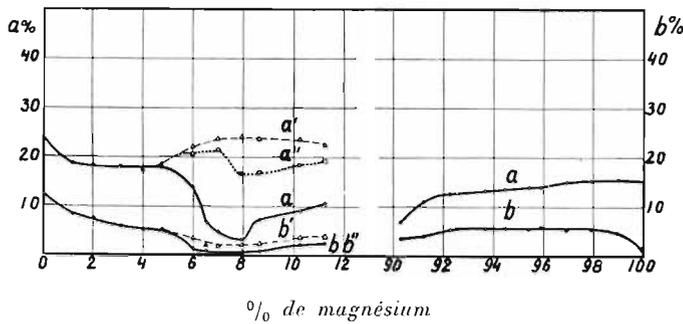
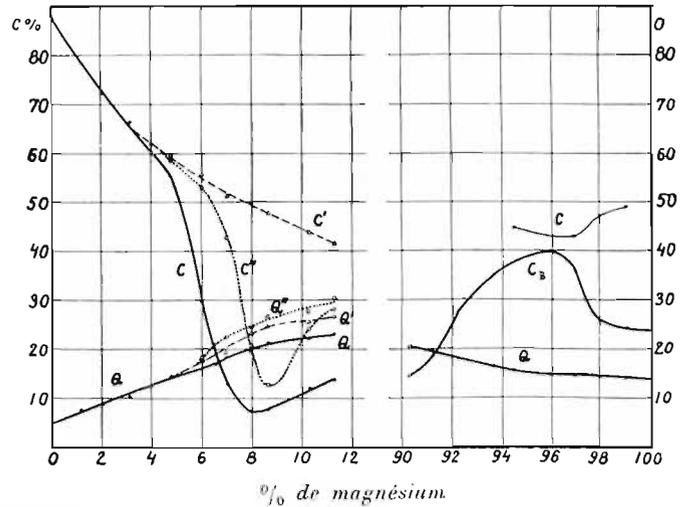


Fig. 5. a — allongement proportionnel, b —allongement de striction. La ligne continue (a et b) correspond aux alliages recuits, la ligne interrompue (a' et b') aux alliages trempés et la ligne pointillée (a'' et b'') aux alliages revenus.

alors que les paramètres de l'allongement (fig. 5 et 5) varient peu jusqu'à 8 pour 100 d'aluminium. La striction se fait soit normalement en forme de cône, (C , fig. 5), soit, bien plus souvent, en forme de biseau¹⁾ (C_B , fig. 4). Ce dernier mode de rupture donne des strictions plus faibles qui passent par un maximum aux environs de 4% d'Al.

T A B L E A U II.
Propriétés mécaniques des alliages aluminium-magnésium trempés à l'eau à 450°.

$Mg^{0}/_{0}$	R'	Q'	$A^{0}/_{0}$	$a^{0}/_{0}$	$b^{0}/_{0}$	H'	$C^{0}/_{0}$	U'	K'	T'
0	8,5	4,7	36,6	24,0	12,6	25	88	11,5 *)	0,58	2,8
1,2	14,5	7,8	26,6	19,1	7,5	52	76	9,7 *)	0,45	3,4
2,0	17,9	9,0	25,9	18,7	7,2	56	71	6,5	0,50	4,1
3,1	21,7	10,1	24,3	18,3	6,0	43	65	5,8	0,51	5,3
4,0	25,4	12,5	25,8	18,4	5,4	—	62	—	—	—
4,5	—	—	—	—	—	51	—	5,0	—	—
4,7	26,9	14,5	24,5	18,6	5,9	—	60	—	0,55	5,8
5,1	—	—	—	—	—	52	—	4,9	—	—
6,0	31,8	17,7	25,7	22,2	5,5	—	56	—	0,57	7,3
6,2	—	—	—	—	—	56	—	4,7	—	—
7,0	55,5	18,8	25,4	25,9	1,5	58	51	4,6	0,58	7,6
7,6	54,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8,0	54,7	25,1	25,8	24,1	1,7	60	50	4,5	0,57	8,2
8,6	56,2	25,0	26,2	25,8	2,4	64	48	4,4	0,57	8,8
9,9	—	—	—	—	—	66	—	3,5	—	—
10,5	56,7	25,5	26,1	25,7	3,4	—	44	—	0,56	8,9
11,5	58,6	27,5	25,8	22,2	5,6	—	41	—	0,54	9,2
11,7	—	—	—	—	—	71	—	1,5	—	—

*) Les astérisques indiquent une éprouvette pliée avec fissure.

1) Voir Broniewski et Pelczyński, Revue de Métallurgie, 31 (1934) p. 53.

TABLEAU III.
Propriétés mécaniques des alliages aluminium-magnésium revenus à 200°.

Mg ⁰ /o	R''	Q''	A'' ⁰ /o	a'' ⁰ /o	b'' ⁰ /o	H''	C'' ⁰ /o	U''	K''	T''
0	8,5	4,7	36,6	24,0	12,6	23	88	11,4 [*])	0,38	2,8
1,2	14,1	7,9	26,8	18,5	8,5	32	77	9,8 [*])	0,44	3,4
2,0	17,5	9,1	26,1	18,6	7,5	37	72	6,5	0,47	4,0
3,1	21,8	10,5	23,8	18,0	5,8	44	66	5,8	0,50	4,5
4,0	25,7	12,5	23,2	17,6	5,6	—	61	—	0,51	5,1
4,5	—	—	—	—	—	51	—	4,9	—	—
4,7	26,5	14,8	24,1	18,1	6,0	—	58	—	0,51	5,6
5,1	—	—	—	—	—	53	—	4,8	—	—
6,0	52,1	18,2	23,8	20,5	3,3	—	53	—	0,55	6,8
6,2	—	—	—	—	—	58	—	4,2	—	—
7,0	34,4	21,2	22,7	21,6	1,1	60	45	3,4	0,57	7,1
8,0	38,1	24,5	17,8	16,5	1,5	66	20	3,2	0,58	6,2
8,6	39,4	26,8	18,9	16,9	2,0	68	12	3,2	0,58	6,9
9,9	—	—	—	—	—	73	—	2,0	—	—
10,3	42,4	28,7	20,4	18,2	2,2	—	24	—	0,58	8,0
11,5	45,0	30,5	22,0	19,2	2,8	—	28	—	0,58	9,1
11,7	—	—	—	—	—	78	—	0,1	—	—

En comparant nos résultats à ceux de M. Vachet (fig. 1) nous voyons que, pour l'alliage trempé, ses nombres apparaissent quelque peu supérieurs aux nôtres ce qui, pour l'allongement, est dû probablement à la différence de la forme des éprouvettes de traction employées (française et internationale). Pour les alliages recuits et les alliages revenus, les différences sont plus accentuées ce qui, pourrait provenir d'un mode assez différent de nos traitements thermiques.

Avec la même restriction, concernant la forme des éprouvettes de traction, nos résultats s'approchent des nombres obtenus par MM. Chaudron et Dendres pour les alliages à 0,15⁰/o de Si (fig. 2).

Dureté et résilience. Pour les alliages du côté de l'aluminium, on voit que la courbe de dureté (fig. 6) a une allure analogue à celle de la résistance à la traction (fig. 5). La résilience (fig. 6) montre une chute très rapide pour les alliages recuits, alors que pour les alliages trempés cette chute est bien moins rapide, de sorte que jusqu'à 9⁰/o de Mg la résilience se maintient au-dessus de 4 kgm/cm².

Pour les alliages du côté du magnésium, la dureté augmente avec la teneur en aluminium, sans pourtant atteindre la valeur de 50 unités. La résilience est très faible et ne dépasse pas 1 kgm/cm² au maximum très plat aux environs de 5⁰/o d'Al.

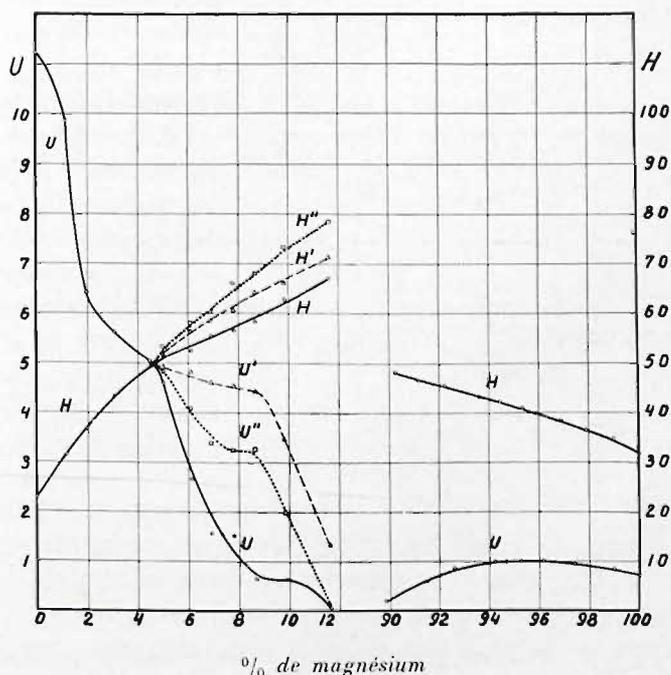


Fig. 6. H — dureté Brinell et U — résilience. La ligne continue (H et U) correspond aux alliages recuits, la ligne interrompue aux alliages trempés et la ligne pointillée (H'' et U'') aux alliages revenus.

*) Les astérisques indiquent une éprouvette pliée avec fissure.

Travail de rupture à la traction et coefficient de Brinell. Lorsque la résistance à la traction augmente au détriment de l'allongement, le travail de rupture à la traction donne un élément utile pour juger si l'alliage peut être considéré comme amélioré.

Pour les alliages du côté de l'aluminium, nous voyons que le travail de rupture est le plus élevé après trempe (fig. 7) et le plus bas après recuit. Le coefficient de Brinell paraît se stabiliser suffisamment entre 6 et 10% de Mg pour permettre le remplacement de l'essai de traction des alliages trempés par celui de la dureté.

Pour les alliages du côté du magnésium, le travail de rupture à la traction est sensiblement inférieur à celui des alliages riches en aluminium et se maintient de 1 à 9% d'Al entre les limites de 4 à 5 kgm/cm². Dans les mêmes limites, le coefficient de Brinell est assez stabilisé pour permettre de remplacer l'essai de traction par celui de la dureté.

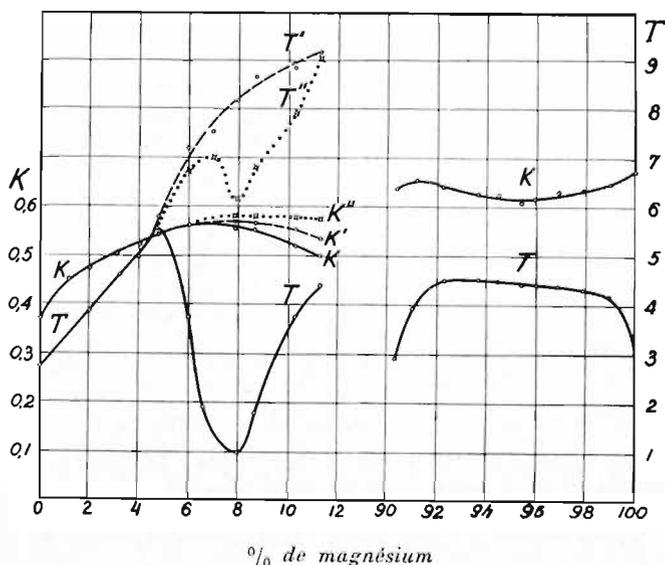


Fig. 7. *K* — coefficient de Brinell et *T* — travail de rupture à la traction. La ligne continue (*K* et *T*) correspond aux alliages recuits, la ligne interrompue (*K'* et *T'*) aux alliages trempés et la ligne pointillée (*K''* et *T''*) aux alliages revenus.

<i>R</i>	<i>Q</i>	<i>A</i> %	<i>H</i>	<i>C</i> %	<i>U</i>	<i>T</i>
27	16	18	42	40	1	4,5

En poussant la proportion de l'aluminium à 8%, on augmente de quelques unités la résistance à la traction et la dureté mais la résilience se trouve par le même fait réduite de moitié.

III. Trempe à l'air et écouissage.

Trempe à l'air. Nous avons vu, pour les alliages du côté de l'aluminium, que la trempe à l'eau donne les meilleurs résultats après chauffage de 5 heures. Comme c'est un temps trop long pour les applications industrielles, il nous a paru intéressant de vérifier les résultats à un temps de chauffe sensiblement plus court, suivi d'une trempe plus douce donnant la garantie d'éviter des criques pour les alliages à haute teneur en magnésium.

Pour cela les alliages, après laminage et étirage, étaient chauffés pendant 30 min. à 450° au four électrique et refroidis à l'air.

Les résultats de cette étude sont indiqués au tableau IV et reproduits sur la fig. 8.

En comparant les résultats ainsi obtenus (fig. 8) à ceux qui ont été établis précédemment (fig. de 5 à 7), on constate que, d'une façon générale, les propriétés mécaniques apparaissent inférieures à ceux obtenus par la trempe à l'eau.

Conclusions. Parmi les alliages étudiés précédemment, les plus intéressants paraissent être ceux à 91% d'aluminium et 9% de magnésium trempés à l'eau, dont les principales propriétés mécaniques sont les suivantes:

<i>R</i>	<i>Q</i>	<i>A</i> %	<i>H</i>	<i>C</i> %	<i>U</i>	<i>T</i>
36	25	26	65	47	4,3	8,8

En augmentant la proportion du magnésium, ou en faisant revenir cet alliage, on augmente la résistance à la traction, la limite élastique et la dureté, mais on diminue en même temps l'allongement, la striction et particulièrement la résilience d'une façon qui pourrait présenter des inconvénients assez sérieux.

Du côté du magnésium, c'est l'alliage à 6% d'aluminium et 94% de magnésium, qui paraît manifester les propriétés les plus avantageuses:

T A B L E A U I V.

Propriétés mécaniques des alliages aluminium-magnésium, trempés à l'air à 400°.

Mg ⁰ / ₀	R	Q	A ⁰ / ₀	a ⁰ / ₀	b ⁰ / ₀	H	C ⁰ / ₀	U	K	T
0	8,7	4,47	36,6	24,0	12,6	23	88	10,9*)	0,58	2,8
1,2	15,0	5,6	26,7	18,4	8,3	31	71	9,2	0,42	3,1
2,0	16,9	6,8	25,0	18,0	7,0	35	68	6,2	0,48	3,6
3,4	21,9	8,5	22,6	16,5	6,1	42	61	4,5	0,52	4,3
4,0	24,9	9,5	22,5	17,0	5,5	44	59	3,7	0,57	4,9
5,2	30,1	13,0	25,7	21,0	4,7	48	56	3,3	0,62	6,8
5,7	30,9	—	25,5	21,7	3,8	51	—	3,6	—	—
7,1	31,1	13,2	24,3	22,0	2,3	55	52	3,1	0,57	6,8
8,5	34,0	14,0	24,7	22,0	2,7	58	46	2,3	0,58	7,4
9,6	36,5	15,7	24,5	21,5	3,0	61	44	2,0	0,60	7,8

Ces résultats ne peuvent pas être expliqués uniquement par un revenu partiel qui devait avoir lieu au refroidissement à l'air, puisque certains paramètres, comme la résistance à la traction et la dureté, qui auraient dû augmenter alors, ont même quelque peu diminués.

Il apparaît plutôt que l'échauffement précédant la trempe à l'air (30 min. à 450°), bien inférieur à celui qui précédait la trempe à l'eau (5 h. à 450°) a été insuffisant à former complètement la solution solide maintenue par la trempe.

Ainsi la trempe à l'eau, appliquée à l'alliage de 8% de Mg après un échauffement de 30 min. à 450° donne R = 32,6, Q = 22,3 et A⁰/₀ = 14,9, donc des valeurs sensiblement équivalentes à celles obtenues par la trempe à l'air. C'est l'allongement qui apparaît particulièrement sensible au temps d'échauffement avant la trempe, de sorte que sa valeur double (de 12,3% à 25,8%), lorsque cet échauffement varie de 15 min. à 5 heures. On peut admettre que le temps d'échauffement à 450° avant la trempe (à l'eau ou à l'air) ne doit pas être inférieur à 1 heure, alors que l'échauffement de 5 heures donne les conditions optima pour les propriétés mécaniques.

Écrouissage. Dans notre étude principale, l'écrouissage provoqué à l'étirage final était détruit par le traitement thermique. Comme l'industrie a plutôt l'habitude de livrer ses produits bruts de laminage, il nous a paru intéressant de constater la qualité moyenne de ces produits.

Pour cela, les échantillons du côté de l'aluminium étaient homogénéisés par chauffage à 450° pendant 20 minutes et refroidis à l'air. Ils subissaient ensuite, par étirage, un écrouissage de 20%. Pour les alliages riches en magnésium, la chauffe, qui précédait l'écrouissage, avait lieu à 400° pendant 20 min.

Cette chauffe, avait pour but de détruire, s'il y avait lieu, un écrouissage résiduel produit par le laminage; elle avait aussi pour résultat une trempe douce normale pour les alliages bruts de laminage.

*) L'astérisque indique une éprouvette pliée avec fisaure.

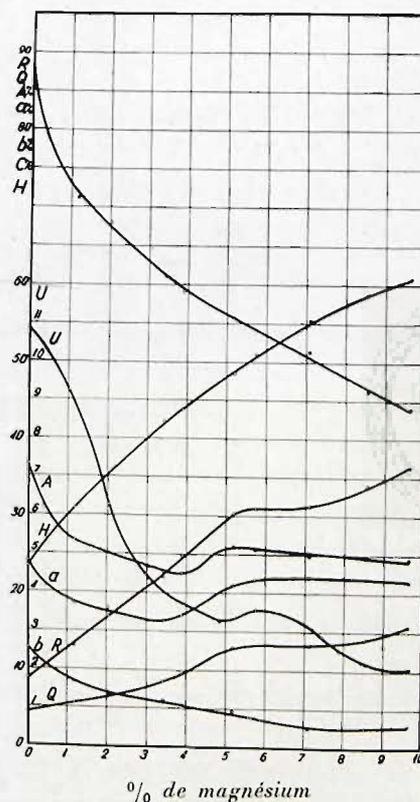


Fig. 8. Propriétés mécaniques des alliages trempés à l'air. R — résistance à la traction; Q — limite élastique; A, a et b — allongements à la traction: total, proportionnel et de striction; H — dureté; C — striction; U — résilience.

T A B L E A U V.

Propriétés mécaniques des alliages aluminium-magnésium, écrouis à 20%.

Mg ⁰ /o	R	Q	A ⁰ /o	a ⁰ /o	b ⁰ /o	H	C ⁰ /o	U	K	T
0	10,5	7,1	15,8	4,0	11,8	51	85	5,6	0,34	1,5
1,0	15,7	15,7	9,5	1,0	8,5	45	72	4,7	0,35	1,5
2,2	21,0	19,6	7,8	2,0	5,8	56	61	5,3	0,37	1,6
3,4	28,0	25,0	7,9	4,0	5,9	64	52	2,2	0,45	2,2
5,9	50,7	27,5	8,6	5,2	5,4	66	49	1,7	0,47	2,6
5,2	57,4	52,0	11,5	7,5	5,8	73	44	1,4	0,51	4,1
6,8	40,0	54,0	11,5	7,8	5,5	79	58	1,2	0,51	4,3
8,5	42,0	57,5	9,4	6,5	2,9	86	51	1,1	0,49	4,1
9,6	48,5	40,2	9,4	6,6	2,8	90	28	1,0	0,55	4,4
90,7	40,1	59,2	1,5	0,5	0,8	76	7	0,2	0,55	0,5
91,2	59,7	58,5	1,1	0,4	0,7	75	8	—	0,55	0,4
91,6	59,0	57,5	1,8	0,5	1,5	74	9	0,2	0,55	0,7
92,3	57,5	55,7	2,4	0,7	1,7	72	11	0,2	0,52	1,0
93,6	55,5	55,0	4,8	2,0	2,8	69	18	0,5	0,52	1,7
94,5	55,5	51,8	6,0	2,5	5,5	67	25	0,4	0,50	1,9
95,4	55,9	51,6	5,5	2,5	5,0	65	29	0,5	0,55	1,8
97,1	52,8	50,0	5,2	3,5	2,7	61	26	0,6	0,54	2,0
98,1	51,4	29,0	6,2	4,0	2,2	57	21	0,6	0,55	1,9
99,0	28,6	26,8	5,7	5,5	2,2	55	16	0,5	0,54	1,6
100	25,5	22,6	5,7	2,0	1,7	59	14	0,6	0,60	0,9

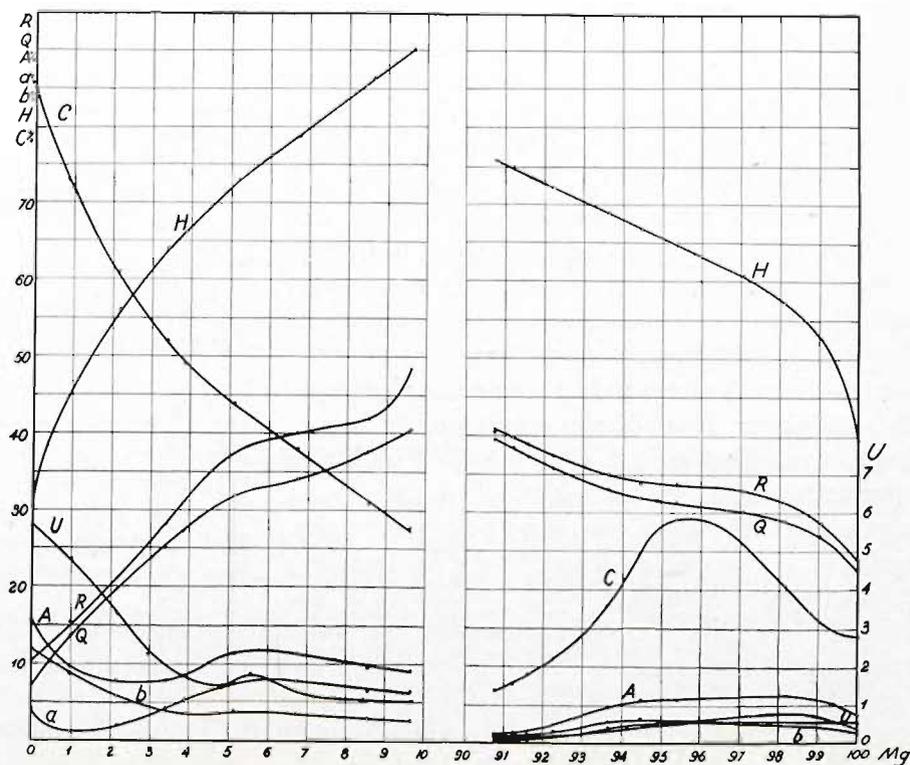


Fig. 9. Propriétés mécaniques des alliages écrouis à 20%. R — résistance à la traction; Q — limite élastique; A, a et b — allongements à la traction: total, proportionnel et de striction; H — dureté; C — striction; U — résilience.

Les résultats obtenus pour les paramètres mécaniques de ces alliages sont indiqués au tableau V et sur la figure 9.

Comme on pouvait s'y attendre, l'écroûissage produit une augmentation de la résistance à la traction et de la dureté aux dépens de l'allongement et de la résilience. Le bilan définitif est plutôt défavorable pour l'alliage, comme l'indique la diminution du travail de rupture à la traction.

Ainsi, l'alliage à 91% d'Al et 9% de Mg qui est un des meilleurs parmi les alliages écroûis, comme il l'était parmi les alliages trempés, montre les propriétés mécaniques suivantes:

<i>R</i>	<i>Q</i>	<i>A</i> %	<i>H</i>	<i>C</i> %	<i>U</i>	<i>T</i>
45	58	9	88	50	1	4,2

Parmi les alliages riches en magnésium, celui à 6% d'aluminium manifeste les paramètres suivants:

<i>R</i>	<i>Q</i>	<i>A</i> %	<i>H</i>	<i>C</i> %	<i>U</i>	<i>T</i>
54	52	6	68	21	0,4	1,8

Les deux alliages peuvent donc encore avoir une importance industrielle, mais ils gagnent en subissant un traitement thermique régulier.

R é s u m é .

1. L'étude des propriétés mécaniques a été faite pour les alliages laminés aluminium-magnésium contenant de 0 à 12 et de 90 à 100% de magnésium.

2. Les alliages du côté de l'aluminium subissaient comme traitement thermique: a) un recuit par refroidissement en 12 jours depuis 450° à 100°; b) une trempe à l'eau à 450° après échauffement de 5 heures à cette température, c) un revenu par échauffement pendant 5 heures à 200° de l'alliage trempé. Pour les alliages du côté du magnésium, qui ont été trouvés réfractaires au traitement thermique, celui-ci consistait en un chauffage de 15 min à 400° et avait pour but la suppression de l'écroûissage.

3. Une étude des propriétés mécaniques a été faite aussi pour tous ces alliages après un écroûissage à 20%.

Pour les alliages du côté de l'aluminium, ont été étudiées les propriétés mécaniques après trempe à l'air précédée d'un échauffement de 30 min. à 450°.

4. Pour les alliages du côté de l'aluminium, l'effet du traitement thermique se fait sentir à partir de 5% de magnésium. Le meilleur résultat est obtenu par la trempe à l'eau.

La trempe à l'air avait donné des propriétés mécaniques moins satisfaisantes que la trempe à l'eau, le temps de chauffage de 30 min à 450° étant insuffisant.

5. L'écroûissage à 20% permet aux alliages du côté de l'aluminium de dépasser $R = 40 \text{ kg/mm}^2$ au prix d'un abaissement de l'allongement à 10%.

Dans les mêmes conditions, les alliages riches en magnésium dépassent $R = 54$ et $H = 65$ au prix d'un abaissement de l'allongement à 5%.

6. Les alliages riches en aluminium manifestent des propriétés mécaniques du même ordre que les alliages aluminium-cuivre ¹⁾ et les meilleurs duralumins, ou même les dépassent parfois. Ainsi, le travail de rupture à la traction de l'alliage à 11,5% de

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

magnésium atteint 9 kgm avec $R = 38 \text{ kg/mm}^2$ et $A = 26\%$ (trempé) ou $R = 45 \text{ kg/mm}^2$ et $A = 22\%$ (revenu).

7. Les alliages du côté du magnésium paraissent montrer des propriétés mécaniques inférieures aux duralumins, si l'on ne prend pas en considération la différence de densité. En les comparant non pas à section égale, mais à poids égal, on verrait que certains alliages du côté du magnésium (de 6 à 8% d'aluminium) peuvent, à poids égal, soutenir un effort semblable aux duralumins en ne rompant qu'avec un allongement sensiblement équivalent.
