



B.6404

Sur la structure des alliages cuivre-zinc

par MM. W. BRONIEWSKI et J. STRASBURGER

○○○

PREMIÈRE PARTIE

I. HISTORIQUE.

Malgré l'importance industrielle considérable des laitons, leur structure ne peut pas être considérée comme établie. Ainsi, à la température ordinaire, l'existence d'aucune combinaison n'est définitivement admise. Il nous a donc paru utile de reprendre cette question par les différentes méthodes, applicables à la température ordinaire, comme cela avait déjà été fait pour les alliages antimoine-étain (1), antimoine-plomb (2) et cuivre-étain (3).

La bibliographie concernant les propriétés physiques des alliages cuivre-zinc est très ample. En 1915, un de nous (4) a fait la revue complète des études concernant la conductivité électrique, le coefficient de température de la résistance électrique, le pouvoir thermo-électrique et sa variation avec la température, la force électromotrice de dissolution, la conductivité thermique, le volume spécifique, le coefficient de dilatation, la dureté et l'analyse thermique.

Les travaux parus depuis lors, jusqu'à 1927, ont été très soigneusement résumés dans un mémoire de MM. Bauer et Hansen (5) sur les alliages cuivre-zinc.

Il paraît donc superflu de résumer encore une fois tous ces travaux et nous nous bornerons à rappeler ici les faits principaux en renvoyant pour le détail de la partie historique aux mémoires cités ci-dessus.

(1) Broniewski et Sliowski, C. R. 186, 1615 (1928), Revue de Métallurgie, XXV, 312 (1928).

(2) Broniewski et Sliowski, Revue de Métallurgie, XXV, 397 (1928).

(3) Broniewski et Hackiewicz, C. R. 187, 651 (1928), Revue de Métall., XXV, 671 (1928); XXVI, 20 (1929).

(4) Broniewski, Revue de Métall., XII, 961 (1915).

(5) Bauer et Hansen, Mitteilungen aus dem Materialprüfungsamt und dem Kaiser-Wilhelm Institut für Metallforschungen Berlin-Dahlem. Sonderheft, n° 4 (1927).

L'étude, faite en 1915, avait conclu à l'existence probable de trois composés définis : CuZn , CuZn^2 et CuZn^6 .

Les phases homogènes, mises en évidence dans les alliages cuivre-zinc, prenaient ainsi la signification suivante :

α , solution solide du composé CuZn dans le cuivre.

β , solutions solides entourant le composé CuZn .

γ , solutions solides entourant le composé CuZn^2 .

δ , solution solide de CuZn^2 dans la modification, stable à haute température du composé CuZn^6 .

ϵ , solutions solides entourant la modification stable à basse température du composé CuZn^6 .

η , solution solide de CuZn^6 dans le zinc.

Ces résultats étaient établis par les méthodes indirectes, applicables à la température ordinaire. Par contre, l'analyse thermique, dont les indications, simples en apparence, étaient assez difficiles à interpréter, paraissait donner des résultats différents.

Ainsi, M. Tafel (1) indique, en se basant sur l'analyse thermique, un seul composé : Cu^2Zn^3 . Autrement interprétées (2) ces mêmes données expérimentales permettent, sans contrainte, d'envisager l'existence des trois composés CuZn , CuZn^2 et CuZn^6 .

Les nouvelles études générales sur la fusibilité des alliages cuivre-zinc, faites successivement par MM. Parravano (3), Imai (4), Jitsuka (5), Crepaz (6), Bauer et Hansen (7), Ruer et Cremers (8) concor-

(1) Tafel, Metallurgie, V, 349, 413, 475 (1908).

(2) Broniewski, loco cit., p. 972.

(3) Parravano. Gazz. Chim. Ital., XCIV, 478 (1914).

(4) Imai, Sci. Rep. Tôhoku Imp. Univ., XI, 313 (1922).

(5) Jitsuka. Mem., Coll. Sci. Kyoto Imp. Univ., VIII, 179 (1925).

(6) Crepaz. Ann. R. Scuola Ing. Padova, II, 49 (1926).

(7) Bauer et Hansen, loco cit., p. 137.

(8) Ruer et Cremers. Zs. anorg. Chem., CLXXXIV, 193

20506-1957

B706PK/019-27

dent, dans leur allure générale, avec les résultats de M. Tafel et n'apportent aucun point nouveau décisif pour la mise en évidence des combinaisons.

Ces résultats indiquent la difficulté qu'éprouve, dans ce cas, l'analyse thermique à interpréter ses propres données sans l'aide d'autres méthodes. Même l'existence du composé Cu^2Zn^3 , seule combinaison que paraissait mettre en évidence l'étude de la fusibilité, se trouve nettement contredite par les roentgenogrammes comme l'ont établi MM. Westgren et Phragmén (1).

Les méthodes indirectes, qui auraient pu servir de guide à l'analyse thermique pour l'interpréta-

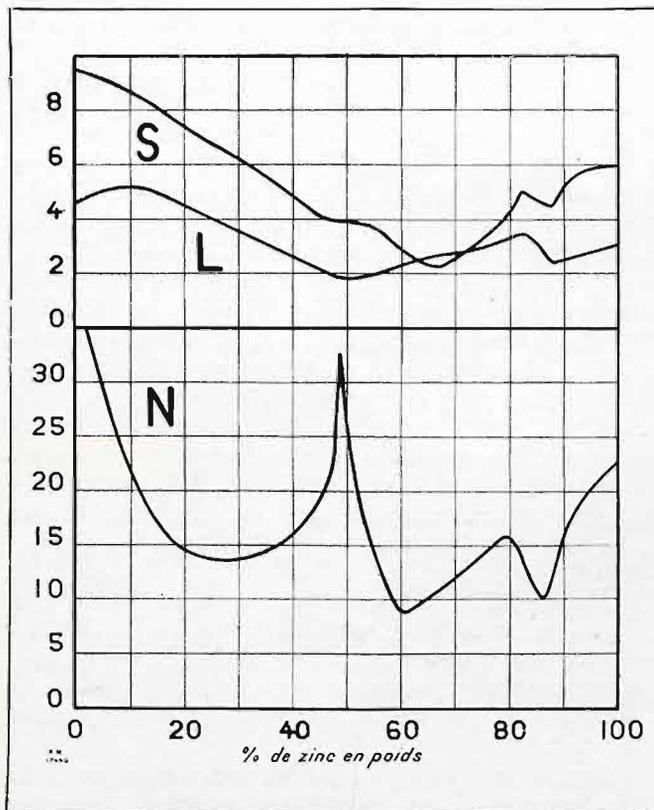


Fig. 1. — Conductivité électrique des alliages cuivre-zinc suivant M. Imai (1922). — L) à la température de fusion à l'état liquide; S) à la température de fusion à l'état solide; N) à la température ordinaire.

tion des résultats, ont été peu avancés depuis 1915. Comme principaux essais on peut citer l'étude de M. Imai (2) concernant la conductivité électrique (fig. 1) à la température de fusion pour l'état liquide et solide et à la température ordinaire.

(1) Westgren et Phragmén, *Phil. Mag.*, L, 311 (1925).

(2) Imai, *loco cit.*

A la température ordinaire, les résultats de M. Imai concordent sensiblement avec ceux de MM. Puschin et Rjaschsky (1). A la température de fusion ils paraissent indiquer l'absence de la combinaison CuZn à l'état liquide et la présence probable à cet état du composé CuZn^6 .

MM. Haughton et Griffiths (2) mesurent la résistance électrique des alliages contenant de 38 à 50 % de zinc afin d'établir les limites de la solution solide β à la température ordinaire. Cette limite apparaît vers 46,5 % de zinc; le maximum de la courbe correspond exactement à 50 % de zinc.

L'étude de la force électromotrice de dissolution à la température ordinaire et à 380° a été effectuée par M. Sauervald (3). La courbe établie à la température ordinaire dans une solution normale de sulfate de zinc diffère peu de celle de M. Puschin (4). La courbe obtenue vers 380° dans du chlorure de zinc marque des chutes de potentiel vers 50 et 60 % de zinc.

Enfin, MM. Bauer et Vollenbruck (5) reprennent l'étude de la f. e. m. de dissolution dans une solution à 1 % de chlorure de sodium par rapport à une électrode normale au mercure. Les résultats sont indiqués sur la figure 2.

La dureté par la méthode Brinell avait été mesurée déjà en 1909 par MM. Turner et Murray (6). Les alliages voisins de 60 % de zinc, trop fragiles, n'ont pas pu supporter l'essai (fig. 3).

Cette étude a été reprise par MM. Bauer et Vollenbruck (5) sous une pression réduite de 250 kgs sur une bille de 5 mm. Une série d'alliages avait subi le recuit variable de 2 à 27 heures à des températures intermédiaires entre 700° et 400°. Une autre série subissait une trempe à eau à des températures variables entre 700° et 380° (fig. 2).

L'étude de la susceptibilité magnétique des alliages cuivre-zinc, faite successivement par MM. Weber et Greulich (7) et par M. Endo (8) montre un maximum, fortement accentué, pour une composition correspondante à la combinaison CuZn^2 .

(1) Puschin et Rjaschsky, *Zs. anorg. Chem.*, LXXXII, 50 (1913).

(2) Haughton et Griffiths, *J. Inst. Metals*, XXXIV, 245 (1925).

(3) Sauervald, *Zs. anorg. Chem.*, CXI, 243 (1920).

(4) Puschin, *Zs. anorg. Chem.*, LVI, 1 (1908).

(5) Bauer et Vollenbruck, *Zs. Metallkunde*, XIX, 86 (1927).

(6) Turner et Murray, *J. Inst. Met.*, II, 98 (1909).

(7) Weber et Greulich, *Ann. d. Phys.*, LXII, 666 (1920).

(8) Endo, *Sci. Rep. Tôhoku Imp. Univ.*, XIV, 479 (1925).

Les méthodes indirectes, qui devraient guider l'analyse thermique, ne concordent souvent entre elles qu'approximativement, étant appliquées par les différents expérimentateurs à des séries d'échantillons n'ayant pas subi le même traitement thermique.

Afin d'arriver à un accord, satisfaisant au possible, entre ces différentes méthodes, nous avons déterminé huit coefficients physiques sur les mêmes échantillons bruts de coulée et après un recuit prolongé.

Ainsi, a été étudiée la conductivité électrique, le coefficient de température de la résistance élec-

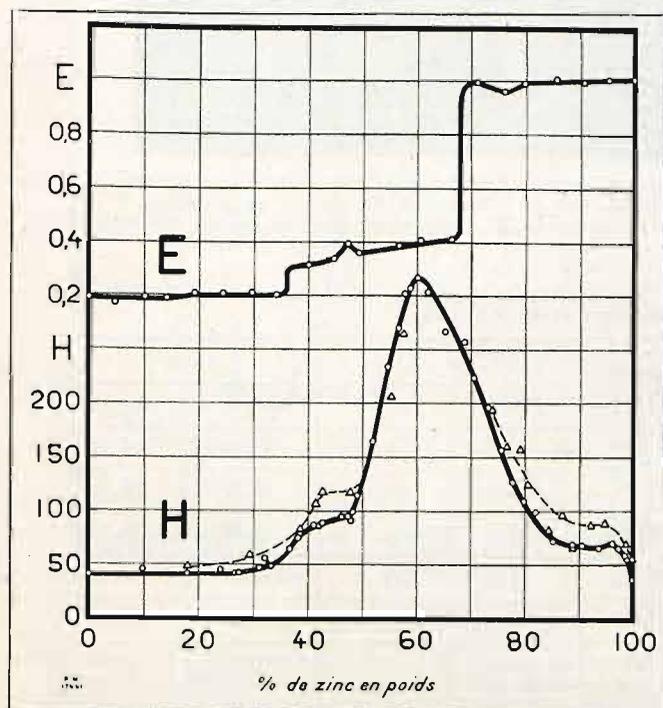


Fig. 2. — Force électromotrice de dissolution au bout de 120 heures E et la dureté Brinell H des alliages cuivre-zinc suivant MM. Bauer et Vollenbruck. La ligne continue correspond aux alliages recuits, l'interrompue aux alliages trempés.

trique, le pouvoir thermo-électrique et sa variation avec la température, la force électromotrice de dissolution, le coefficient de dilatation et sa variation avec la température et la dureté. L'ensemble des résultats a été vérifié par la micrographie.

Echantillons. — Ces recherches furent faites au Laboratoire de Métallurgie à l'École Polytechnique de Varsovie.

Les alliages étaient fondus dans un four à gaz sous une couche de charbon de bois et coulés dans une lingotière en acier.

Les échantillons bruts de coulée furent analysés pour leur composition en cuivre par la méthode électrolytique. La synthèse de certains alliages, voisins des combinaisons présumées, a dû être répétée plusieurs fois afin d'obtenir la composition cherchée.

Les alliages bruts de coulée étaient soumis à des mesures comme dans les études précédentes (1).

Une deuxième série de mesures a été appliquée aux alliages après leur recuit à 400°. Ce recuit était exécuté dans des fours électriques mastiqués, autant que possible, hermétiquement avec de la terre réfractaire. Jusqu'à la teneur de 49 % de zinc, les alliages, dont la structure est assez bien connue, étaient recuits 1.000 heures; pour les alliages plus

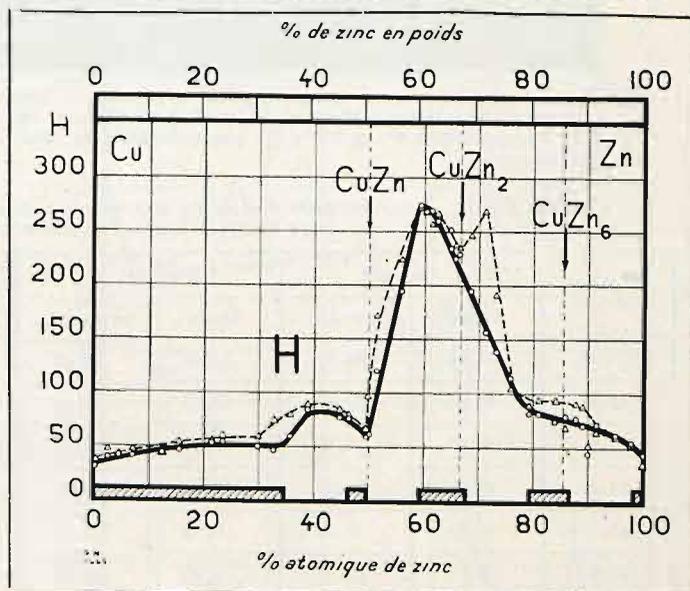


Fig. 3. — La dureté des alliages cuivre-zinc. suivant MM. Turner et Murray.

riches en zinc le recuit avait duré 3.000 heures (dix-huit semaines). On vérifiait alors, pour certains échantillons, leur teneur en zinc qui diminuait seulement dans une mince couche extérieure sans changer sensiblement la composition primitive.

Conductivité électrique. — La résistance était mesurée à 0° et à 100° par la méthode de compensation (2). La disposition des appareils est indiquée sur la figure 4.

Ces deux mesures permettent de calculer la conductivité spécifique à 0° et le coefficient de tem-

(1) Broniewski et Sliwowski, Broniewski et Hackiewicz, loco cit.

(2) Broniewski, Contribution à l'étude des alliages, Paris, 1918, p. 116.

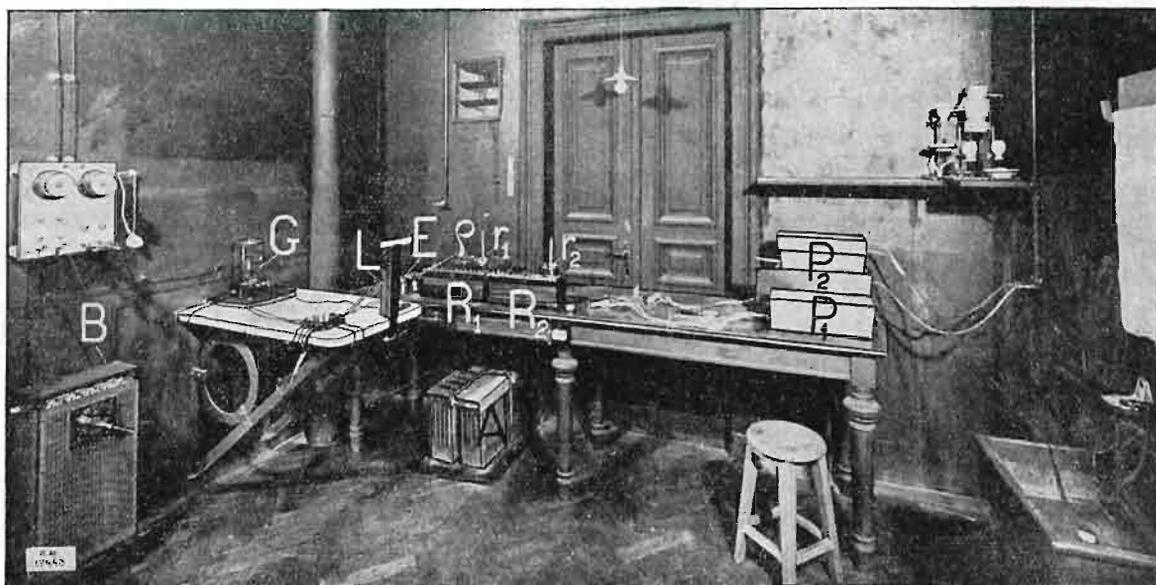


Fig. 4. — Installation pour la mesure de la résistance électrique : A) accumulateur; r et r_1 résistances du circuit primaire; E) élément Weston; R et R_1 résiliences de compensation; G) résistance du circuit secondaire; P et P_1 thermostats à 0° et 100°; G) galvanomètre de Moll avec sa lampe L; B) installation pour la charge des accumulateurs.

Tableau I. — C — conductivité électrique à 0° comme inverse de la résistance spécifique en ohms; α — coefficient de température de la résistance électrique entre 0° et 100°.

% atom. de Zn	C. 10^{-4}		$\alpha \cdot 10^4$		% atom. de Zn	C. 10^{-4}		$\alpha \cdot 10^4$	
	bruts	recuits	bruts	recuits		bruts	recuit	bruts	recuits
0 (Cu)	60,24	60,35	39,60	38,95	62,6	8,83	8,98	22,80	25,16
2,6	32,94	33,92	22,53	22,60	65,0	9,45	9,23	26,85	26,84
7,0	26,93	26,85	17,92	18,10	66,6	9,42	9,31	34,38	30,50
12,4	22,39	22,73	17,14	17,59	68,7	7,17	9,12	26,41	30,37
15,6	19,65	18,04	16,14	16,61	71,3	7,20	10,62	21,66	25,53
21,6	16,77	17,20	15,26	15,56	73,3	10,42	10,82	22,50	25,07
23,4	15,62	16,20	13,22	15,61	76,2	12,32	12,18	22,75	24,22
29,8	15,20	15,38	15,26	15,17	79,2	13,54	12,53	23,65	24,00
32,7	14,05	15,07	14,70	15,47	80,3	13,22	12,71	22,60	23,90
35,7	14,85	13,59	15,56	16,45	80,9	13,79	12,24	24,48	23,58
39,0	15,93	16,60	19,25	19,58	84,3	13,25	12,19	26,51	26,41
44,7	19,47	19,90	29,44	28,27	85,9	13,34	13,47	27,59	29,61
46,4	20,25	19,93	28,27	26,91	87,8	14,88	14,69	29,32	28,98
49,6	24,15	24,39	33,59	35,24	88,9	15,01	14,82	29,42	30,52
50,0	23,87	22,30	34,14	33,27	90,1	15,14	14,86	30,24	31,31
51,6	14,60	17,46	27,27	30,90	91,3	15,46	15,65	30,96	32,17
56,1	9,06	11,68	20,20	25,40	94,9	15,79	15,70	31,56	34,00
59,4	7,24	7,92	17,50	19,72	98,1	17,02	14,13	35,84	35,02
60,2	7,70	—	16,33	—	100,0 (Zn)	17,55	15,48	39,44	37,10
61,5	7,84	8,76	16,28	22,39					

pérature de la résistance électrique entre 0° et 100°.

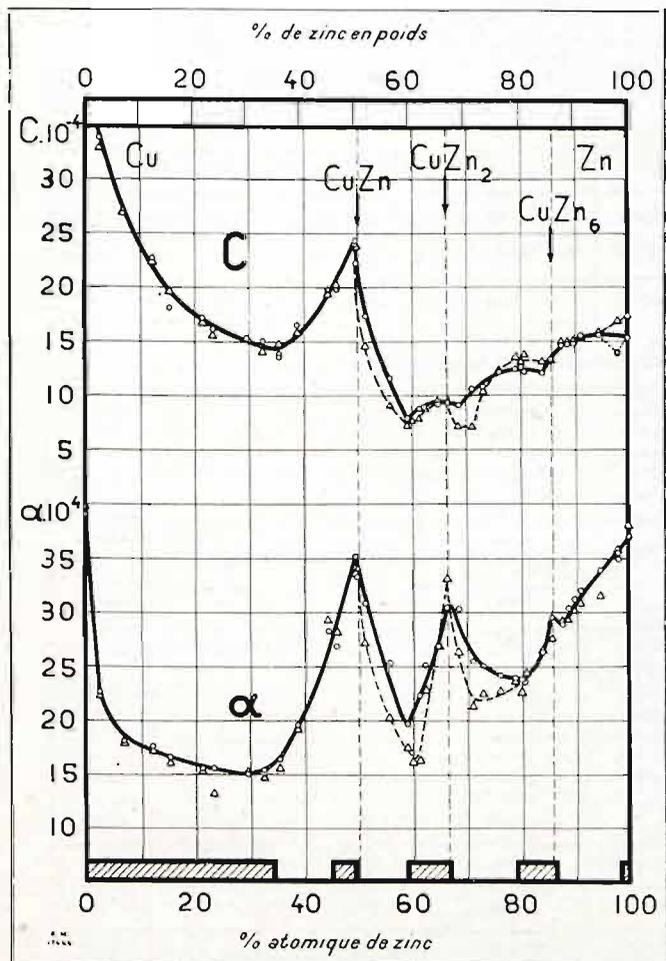


Fig. 5. — Conductivité électrique : α coefficient de température de la résistance électrique. La ligne continue correspond aux alliages recuits, l'interrompue aux alliages bruts. Les solutions solides sont indiquées par des hachures.

Les résultats, ainsi obtenus, sont consignés au tableau I et sur la figure 5.

En comparant ces résultats à ceux de MM. Puschin et Rjaschsky, nous confirmons le fait important signalé par eux que le maximum de la conductivité électrique, voisin de 50 % atomiques, devance quelque peu cette composition et se présente, dans notre étude, à 49,6 % atom. de zinc. Par contre, nous ne retrouvons pas le minimum très accentué signalé par MM. Puschin et Rjaschsky et par M. Imai vers 86 % atom. de zinc, comme ne l'a pas retrouvé M. Norsa. Aussi, un maximum pour le coefficient de température de la

(1) Norsa, C. R., 155, 348 (1912).

résistance vers 90 % atomiques ne se trouve pas sur notre diagramme. Les résultats de M. Norsa se rapprochent des nôtres pour les échantillons bruts de coulée.

Ainsi, notre courbe de conductivité électrique (C, fig. 3) montre un seul maximum net devant de peu la composition CuZn. Une particularité de la conductivité se manifeste dans le domaine de

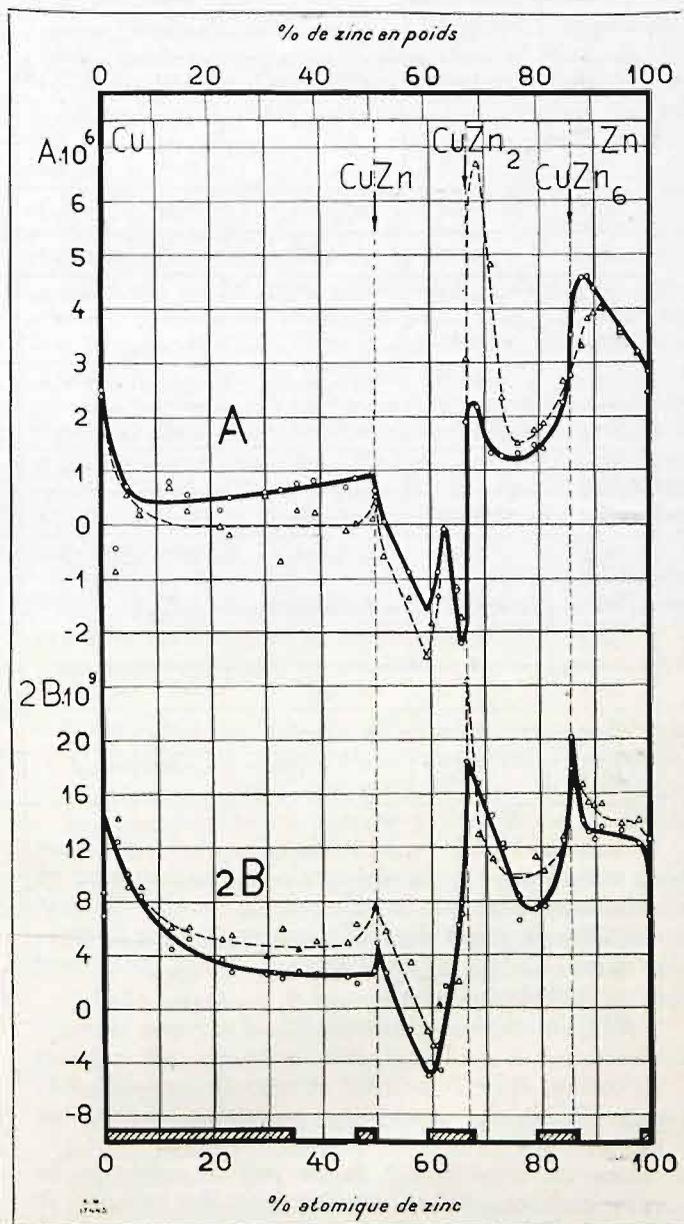


Fig. 6. — Pouvoir thermo-électrique A et sa variation avec la température 2B. La ligne continue correspond aux alliages recuits, l'interrompue aux alliages bruts. Les solutions solides sont indiquées par des hachures.

REVUE DE METALLURGIE

Tableau 11. — A. Pouvoir thermo-électrique par rapport au plomb à 0° en volts; 2 B. Variation du pouvoir thermo-électrique avec la température entre - 78° et + 100°.

% atom. de Zn	A. 10 ⁶		2 B. 10 ⁹		% atom. de Zn	A. 10 ⁶		2 B. 10 ⁹	
	bruts	recuits	bruts	recuits		bruts	recuits	bruts	recuits
0 (Cu)	+ 2,405	+ 2,513	+ 8,80	+ 7,00	61,5	- 1,314	- 0,862	+ 0,32	- 4,71
2,6	- 0,855	- 0,435	+ 14,19	+ 12,52	62,6	—	- 0,075	—	+ 1,67
4,6	+ 0,563	+ 0,717	+ 10,10	+ 9,16	65,0	- 1,160	- 1,213	+ 2,02	+ 6,37
7,0	+ 0,207	+ 0,280	+ 9,11	+ 8,48	65,7	- 1,714	- 2,197	+ 7,12	+ 8,01
12,4	+ 0,702	+ 0,806	+ 6,12	+ 4,57	66,6	+ 3,092	+ 1,914	+ 24,43	+ 18,40
15,6	+ 0,253	+ 0,563	+ 6,10	+ 5,23	68,7	+ 6,702	+ 2,203	+ 12,97	+ 16,79
21,6	- 0,025	+ 0,286	+ 5,28	+ 3,76	71,3	+ 4,840	+ 1,341	+ 11,21	+ 14,40
23,4	- 0,173	+ 0,505	+ 5,56	+ 2,79	73,3	+ 2,354	+ 1,278	+ 12,06	+ 12,37
29,8	+ 0,540	+ 0,618	+ 3,99	+ 2,64	76,2	+ 1,511	+ 1,326	+ 8,52	+ 6,64
32,7	- 0,671	+ 0,651	+ 6,02	+ 2,29	79,2	+ 1,766	+ 1,489	+ 11,41	+ 7,51
35,7	+ 0,255	+ 0,764	+ 4,49	+ 2,82	80,9	+ 1,889	+ 1,419	+ 10,33	+ 7,85
39,0	+ 0,240	+ 0,833	+ 5,08	+ 2,63	84,3	+ 2,664	+ 2,295	+ 12,81	+ 12,58
44,7	- 0,110	+ 0,695	+ 4,97	+ 2,39	85,9	+ 2,787	+ 3,540	+ 17,93	+ 20,21
46,4	+ 0,028	+ 0,869	+ 6,30	+ 1,91	87,8	+ 3,328	+ 4,606	+ 16,71	+ 14,06
49,6	+ 0,120	+ 0,983	+ 7,61	+ 2,85	88,9	+ 3,824	+ 4,610	+ 15,38	+ 13,20
50,0	+ 0,518	+ 0,639	+ 7,63	+ 4,96	90,1	+ 3,933	+ 4,397	+ 15,18	+ 12,65
51,6	- 0,590	+ 0,007	+ 5,82	+ 2,67	91,3	+ 4,040	+ 4,090	+ 15,63	+ 13,59
56,1	- 1,349	- 0,858	+ 3,42	- 1,66	94,9	+ 3,592	+ 3,655	+ 13,80	+ 13,32
59,4	- 2,447	- 1,490	- 1,78	- 5,12	98,1	+ 3,200	+ 3,238	+ 14,09	+ 12,37
60,2	- 1,825	—	- 2,78	—	100 (2n)	+ 2,498	+ 2,856	+ 12,63	+ 5,95

la solution solide voisine du zinc. Le coefficient de température de la résistance (α , fig. 3) montre un maximum analogue à celui de la courbe de conductivité et voisin de CuZn, un autre pour la composition CuZn² et un troisième, moins net, pour la composition CuZn⁶.

Pouvoir thermo-électrique. — La force thermo-électrique des alliages était mesurée, par rapport au cuivre, entre 0° et 100° et entre 0° et -78° (CO dans l'acétone) pour être rapportée ensuite au plomb.

Les mesures étaient faites par la méthode de compensation (1) et permettaient de calculer le pouvoir thermo-électrique à 0° et sa variation avec la température : A + 2 Bt.

(1) Broniewski, loc. cit., p. 119.

La valeur de ces deux coefficients est reproduite dans le tableau II et sur la figure 6.

En comparant ces données avec celles de M. Norsa (1), on remarque quelques différences en des points de détail, ce qui peut être expliqué par un nombre d'échantillons moindre dans ces dernières mesures. De sorte, sur la courbe A de M. Norsa on ne remarque pas de maximum vers 63 % atomiques de zinc et sur la courbe de 2 B les maxima correspondants à CuZn et CuZn⁶ sont moins accentués. Par contre, l'allure générale des courbes et leurs indications restent les mêmes dans les deux études.

Dans notre étude on remarque sur la courbe du pouvoir thermo-électrique (A, fig. 4) des alliages

(1) Norsa, loc. cit.

recuits un point anguleux vers 49,6 % atom. de zinc, alors que pour les alliages bruts il correspond bien à 50 %. Les compositions CuZn^2 et CuZn^6 se placent sur des inflexions des courbes en forme de S. Le rapport du maximum à 72,6 % atom. de zinc avec la structure de l'alliage n'apparaît pas avec évidence.

Sur la courbe de la variation du pouvoir thermo-électrique avec la température (2 B, fig. 4) on voit trois maxima très nets qui correspondent aux compositions CuZn , CuZn^2 et CuZn^6 . Dans les alliages

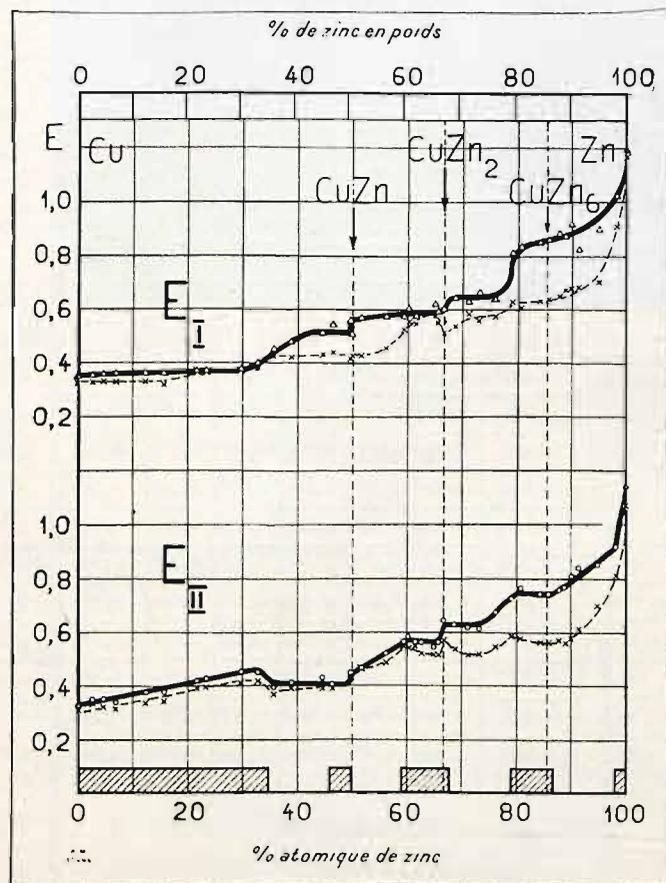


Fig. 7. — Force électromotrice de dissolution. La courbe E_I se rapporte aux alliages bruts; E_{II} aux alliages recuits. La ligne continue correspond aux valeurs maxima, l'interrompue aux minima. Les solutions solides sont indiquées par des hachures.

bruts de coulée, le maximum correspondant à CuZn^2 se trouve accentué et celui de CuZn^6 atténué.

F.e.m. de dissolution. — La pile était constituée par l'échantillon comme cathode et du graphite dépolarisé par du bioxyde de manganèse comme anode. Une solution normale d'azotate d'ammo-

niun à laquelle fut ajouté 1 % d'azotate de zinc, servait d'électrolyte.

La mesure de la force électromotrice se faisait à l'aide d'un électromètre à quadrants. Un élément étalon de Weston servait d'unité de comparaison.

Les résultats obtenus sont consignés sur le tableau III et sur la figure 7.

La comparaison des études de la f.e.m. de dissolution est assez difficile, étant donné les conditions ordinairement très différentes concernant l'électrode permanente, l'électrolyte et le mode de mesure de la force électromotrice. Malgré ces différences, l'allure générale des courbes de la f.e.m. des alliages cuivre-zinc s'accorde sensiblement.

MM. Laurie (1), Puschin, Sauerwald, Bauer et Vollenbruck (E, fig. 21) trouvent des variations brusques vers la limite de la solution α et dans le voisinage de la composition CuZn^2 . Les trois premiers savants trouvent en plus une variation au voisinage de CuZn , qui apparaît aussi, mais moins nettement, dans la dernière étude.

On retrouve, de même, sur nos courbes ces trois points, mais lorsque la limite de la solution solide α se manifeste pour les alliages bruts de coulée par une élévation de la f.e.m. (E_I , fig. 7), ce point est indiqué par un abaissement de la courbe dans les alliages recuits (E_{II} , fig. 7).

En plus de ces trois points, on voit une élévation de la f.e.m. correspondre à la limite de la solution solide ϵ . Par contre, seul un point d'inflexion α pu être remarqué au voisinage de la composition CuZn^6 .

Dilatation. — La dilatation n'était mesurée que sur les alliages recuits. Pour cette mesure les échantillons durent être coupés à 10 cm. de longueur, le tronçon détaché servant à l'étude de la dureté et pour la micrographie.

La dilatation des échantillons, placés au fond d'un tube de silice fondue de 50 cm., faisait dévier un miroir, par l'intermédiaire d'une tige de silice.

Le rayon lumineux, réfléchi du miroir sur une échelle placée à 2 m., formait un levier optique d'un pouvoir multiplicateur supérieur à 600.

La disposition des appareils pour la dilatation est reproduite sur la figure 8.

Deux mesures étaient faites. La première entre la température ambiante et celle d'ébullition de la naphthaline = $217^\circ, 96 + 0,058 (p-760)$, où p est la pression barométrique; la deuxième entre la température ambiante et celle de l'air liquide contrôlée par un thermomètre à résistance électrique.

(1) Laurie, J. Chem. Soc., LIII, 104 (1888).

Tableau III. — Force électromotrice de dissolution en volts.

Alliage bruts									Alliages recuits								
% atom. de Zn	F. e. m. de dissolution après					F. e. m.			% atom. du Zn	F. e. m. de dissolution après					F. e. m.		
	immersion	1/2 h.	1 h.	3 h.	6 h.	24 h.	maxima	minima		immersion	1/2 h.	1 h.	3 h.	6 h.	24 h.	maxima	minima
0 (Cu)	0,321	0,322	0,323	0,328	0,328	0,345	0,345	0,321	0 (Cu)	0,306	0,317	0,320	0,320	0,318	0,317	0,320	0,306
2,6	0,327	0,327	0,325	0,331	0,331	0,350	0,350	0,325	2,6	0,342	0,345	0,342	0,336	0,338	0,331	0,345	0,331
4,6	0,327	0,325	0,323	0,331	0,328	0,353	0,353	0,323	4,6	0,345	0,345	0,348	0,336	0,329	0,320	0,348	0,320
7,0	0,327	0,327	0,325	0,334	0,328	0,356	0,356	0,325	7,0	0,317	0,328	0,331	0,334	0,332	0,325	0,334	0,317
12,4	0,329	0,327	0,325	0,334	0,328	0,358	0,358	0,325	12,4	0,372	0,359	0,350	0,345	0,346	0,334	0,372	0,334
15,6	0,324	0,325	0,317	0,331	0,320	0,356	0,356	0,317	15,6	0,372	0,364	0,353	0,345	0,360	0,342	0,372	0,342
21,6	0,367	0,366	0,366	0,366	0,364	0,365	0,307	0,364	21,6	0,419	0,414	0,408	0,403	0,398	0,390	0,419	0,390
23,4	0,367	0,366	0,360	0,369	0,367	0,368	0,369	0,366	23,4	0,425	0,422	0,419	0,417	0,404	0,395	0,425	0,395
29,8	0,370	0,371	0,369	0,372	0,367	0,371	0,372	0,307	29,8	0,450	0,438	0,433	0,430	0,420	0,410	0,450	0,410
32,7	0,376	0,377	0,379	0,388	0,392	0,399	0,399	0,376	32,7	0,447	0,444	0,439	0,430	0,423	0,415	0,447	0,415
35,7	0,428	0,426	0,426	0,430	0,423	0,450	0,450	0,423	35,7	0,367	0,375	0,375	0,381	0,390	0,387	0,390	0,367
39,0	0,425	0,420	0,423	0,441	0,441	0,476	0,476	0,420	39,0	0,406	0,409	0,403	0,369	0,394	0,390	0,409	0,390
44,7	0,437	0,431	0,445	0,497	0,486	0,511	0,511	0,431	44,7	0,412	0,423	0,417	0,410	0,402	0,387	0,423	0,387
46,4	0,439	0,445	0,456	0,489	0,515	0,542	0,542	0,439	46,4	0,389	0,397	0,395	0,396	0,400	0,399	0,400	0,389
49,6	0,417	0,442	0,451	0,472	0,520	0,557	0,557	0,417	49,6	0,437	0,443	0,440	0,441	0,439	0,436	0,443	0,430
50,0	0,428	0,434	0,437	0,452	0,475	0,504	0,504	0,428	50,0	0,423	0,440	0,437	0,433	0,431	0,427	0,440	0,423
51,6	0,427	0,478	0,491	0,517	0,531	0,569	0,569	0,427	51,6	0,462	0,462	0,462	0,464	0,465	0,462	0,465	0,462
56,1	0,572	0,458	0,486	0,525	0,542	0,569	0,572	0,458	56,1	0,485	0,496	0,499	0,509	0,518	0,519	0,519	0,485
59,4	0,574	0,552	0,549	0,544	0,532	0,526	0,574	0,526	59,4	0,546	0,552	0,558	0,560	0,558	0,548	0,560	0,546
60,2	0,604	0,602	0,606	0,595	0,586	0,556	0,606	0,556	60,2	0,538	0,575	0,578	0,574	0,572	0,556	0,578	0,538
61,5	0,574	0,546	0,567	0,577	0,577	0,556	0,577	0,546	61,5	0,546	0,552	0,558	0,560	0,558	0,548	0,560	0,546
65,0	0,622	0,598	0,575	0,582	0,587	0,581	0,622	0,575	62,6	0,519	0,554	0,556	0,558	0,556	0,542	0,558	0,519
65,7	0,591	0,564	0,550	0,553	0,551	0,561	0,591	0,550	65,0	0,548	0,554	0,550	0,549	0,545	0,516	0,554	0,516
66,6	0,603	0,595	0,592	0,573	0,572	0,515	0,603	0,515	65,7	0,544	0,554	0,559	0,558	0,550	0,512	0,559	0,512
68,7	0,647	0,638	0,632	0,593	0,592	0,536	0,647	0,536	66,6	0,590	0,642	0,640	0,621	0,608	0,568	0,642	0,568
71,3	0,583	0,615	0,632	0,614	0,615	0,583	0,632	0,583	68,7	0,625	0,594	0,585	0,569	0,542	0,531	0,625	0,531
73,3	0,664	0,653	0,646	0,625	0,618	0,560	0,664	0,560	71,3	0,618	0,585	0,581	0,559	0,545	0,509	0,618	0,509
76,2	0,594	0,618	0,632	0,646	0,644	0,574	0,645	0,574	73,3	0,612	0,596	0,590	0,590	0,575	0,516	0,612	0,516
79,2	0,810	0,812	0,794	0,730	0,699	0,630	0,812	0,630	76,2	0,671	0,662	0,590	0,569	0,560	0,545	0,671	0,545
80,9	0,838	0,806	0,794	0,724	0,690	0,610	0,838	0,610	79,2	0,722	0,702	0,700	0,652	0,622	0,583	0,722	0,583
84,3	0,854	0,834	0,820	0,715	0,685	0,635	0,854	0,635	80,9	0,702	0,691	0,682	0,667	0,614	0,572	0,702	0,572
85,9	0,865	0,837	0,812	0,724	0,696	0,640	0,865	0,640	84,3	0,742	0,662	0,626	0,606	0,594	0,560	0,742	0,560
87,8	0,887	0,835	0,804	0,730	0,708	0,657	0,887	0,657	85,9	0,740	0,641	0,612	0,603	0,594	0,560	0,740	0,560
88,9	0,878	0,858	0,805	0,738	0,721	0,678	0,878	0,678	87,8	0,757	0,694	0,667	0,638	0,614	0,568	0,757	0,568
90,1	0,922	0,870	0,829	0,750	0,721	0,681	0,922	0,681	88,9	0,766	0,728	0,714	0,630	0,602	0,557	0,766	0,557
91,3	0,828	0,762	0,745	0,733	0,718	0,684	0,828	0,684	90,5	0,809	0,743	0,697	0,641	0,620	0,574	0,809	0,574
94,9	0,907	0,845	0,819	0,780	0,743	0,705	0,902	0,705	91,3	0,836	0,763	0,740	0,670	0,654	0,610	0,836	0,610
98,1	1,026	1,012	1,010	1,020	1,015	0,916	1,026	0,916	94,9	0,850	0,806	0,800	0,780	0,759	0,698	0,850	0,698
100 (Zn)	1,196	1,196	1,193	1,192	1,195	1,175	1,196	1,175	98,1	0,916	0,890	0,888	0,879	0,861	0,809	0,916	0,809
									100 (Zn)	1,135	1,117	1,108	1,090	1,073	1,065	1,135	1,065

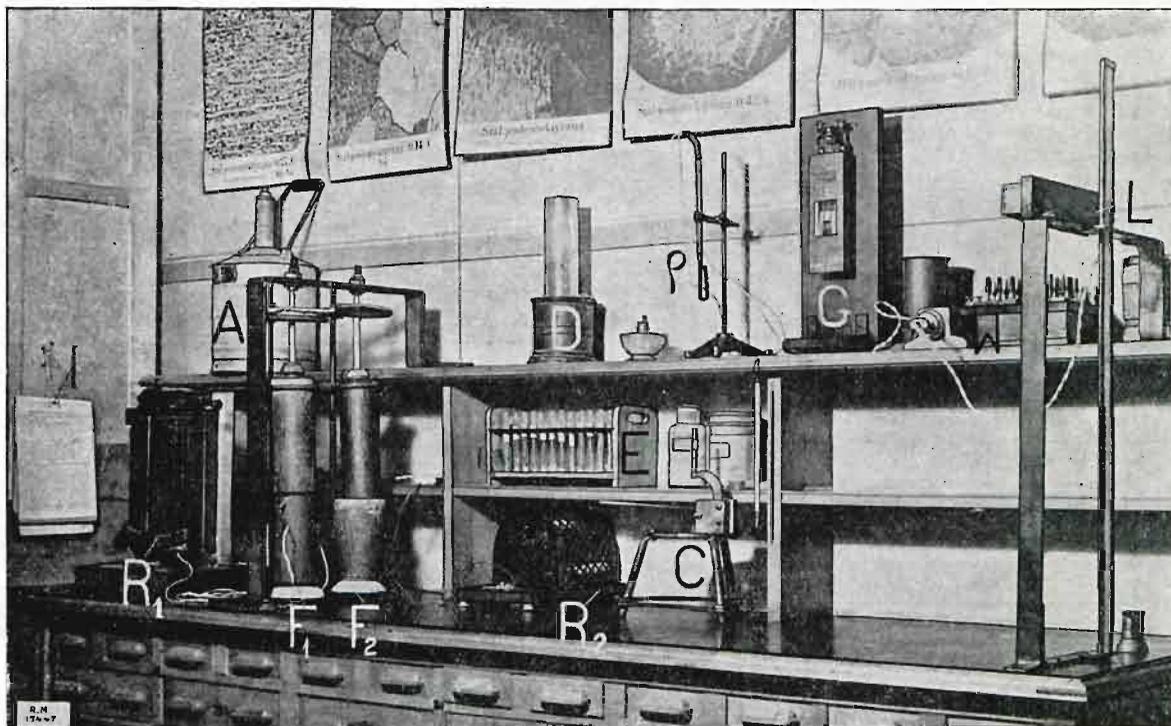


Fig. 8. — Installation pour la mesure de la dilatation : F1 et F2) fours électriques avec leurs résistances R1 et R2; à la partie supérieure de ces fours on voit les éprouvettes isolées contenant la naphthaline ou le soufre et les dispositifs de dilatation; L) lampe et échelle de mesure; C) micromètre de calibrage; E) échantillons d'alliages. Sur la planche se trouvent les appareils pour la mesure dans l'air liquide : A) récipient pour l'air liquide; D) vase de Devar; G) thermomètre à résistance électrique avec le pont de Weston W et le galvanomètre G.

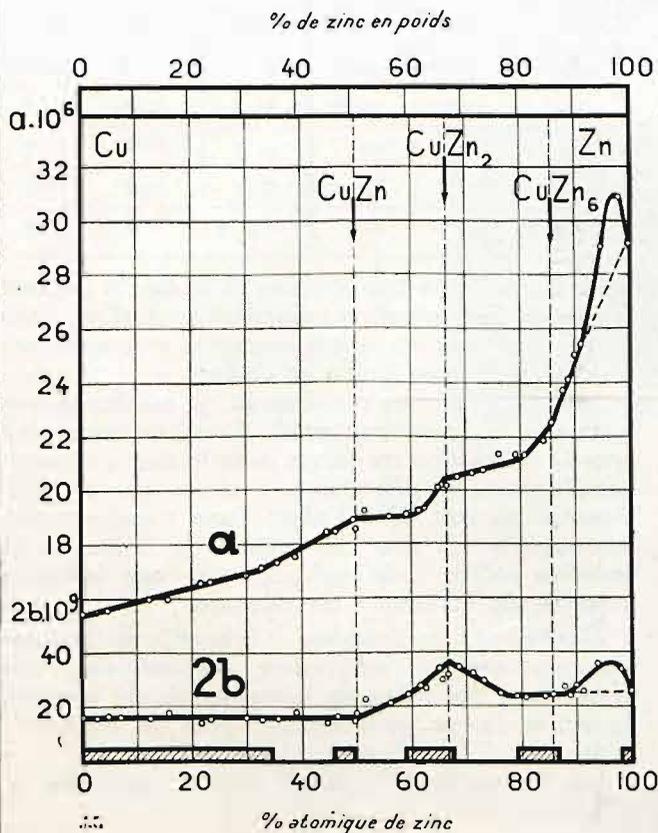


Fig. 9.

Fig. 9. — Coefficient de dilatation α et sa variation avec la température $2b$ pour les alliages recuits. Les solutions solides sont indiquées par des hachures.

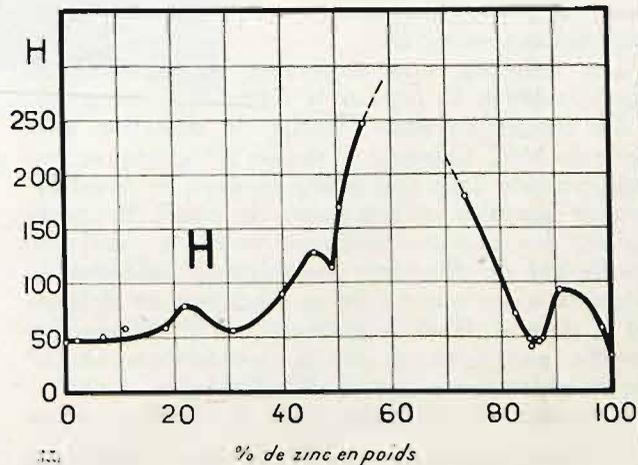


Fig. 10. — Dureté. La ligne continue correspond aux alliages recuits, l'interrompue aux alliages bruts. Les solutions solides sont indiquées par des hachures.

REVUE DE METALLURGIE

Tableau IV. — *a* — Coefficient de dilatation à 0°; *2 b* — variation du coefficient de dilatation avec la température entre — 186° et 218°. Alliages recuits.

% atom. de Zn	<i>a</i> . 10 ⁶	<i>2b</i> . 10 ⁹	% atom. de Zn	<i>a</i> . 10 ⁶	<i>2b</i> . 10 ⁹
0 (Cu)	15,43	16,03	61,5	19,2	27,50
2,6	15,50	15,68	62,6	19,32	26,75
4,6	15,54	16,17	65,0	20,11	34,00
7,0	15,73	16,01	65,7	20,20	29,80
12,4	15,96	15,54	66,6	20,19	31,60
15,6	15,91	17,58	68,7	20,50	34,18
21,6	16,59	13,67	71,3	20,64	31,08
23,4	16,61	15,02	73,3	20,75	29,40
29,8	16,85	15,48	76,2	21,38	24,42
32,7	17,13	14,97	79,2	21,37	23,30
35,7	17,31	15,52	80,9	21,32	23,60
39,0	17,52	17,98	84,3	21,7	23,25
44,7	18,45	13,92	85,9	22,55	24,10
46,4	18,45	16,65	87,8	23,75	27,10
49,6	18,89	14,44	88,9	24,12	23,80
50,0	18,53	17,34	90,1	25,07	27,60
51,6	19,21	22,68	91,3	25,42	25,20
56,1	19,01	21,21	94,9	29,05	35,63
59,4	19,10	24,30	98,1	30,90	33,88
60,2	—	—	100 (Zn)	29,19	25,55

Ces deux mesures, faites à température rigoureusement constante, permettaient de calculer le coefficient de dilatation et sa variation avec la température = *a* + 2 *bt*.

Les données, ainsi obtenues, sont reproduites sur le tableau IV et sur la figure 9.

En comparant notre courbe de dilatation avec celle de MM. Calvert et Johnson (1) on trouve une concordance dans leur allure générale et des différences sensibles en des points de détail. En particulier, ces auteurs indiquent pour le zinc un coefficient de dilatation sensiblement inférieur au nôtre et n'ont pas étudié la dilatation au delà de 83 % de zinc, d'où un maximum accentué sur leur courbe aux environs de la composition CuZn⁶ qu'on ne retrouve pas sur la nôtre.

La courbe de dilatation à 0° (*a*, fig. 9) et de sa

(1) Calvert et Johnson, Moniteur Scientifique, série I, IV, 18, 33, 87, 123 (1862).

Tableau V. — Dureté Brinell. Les nombres marqués par le signe * ont été obtenus à l'aide d'une bille de 3,18 mm, sous 12 kg; les autres, par une bille de 1,19 mm, sous la même pression.

% atom. de Zn	Dureté		% atom. de Zn	Dureté	
	bruts	recuits		bruts	recuits
0 (Cu)	37*	31*	61,5	258	270
2,6	47*	39*	62,6	268	260
4,6	42*	42*	65,0	253	235
7,0	47*	42*	65,7	237	226
12,4	46*	46*	66,6	235	230
15,6	56*	47*	68,7	248	194
21,6	54*	53*	71,3	270	158
23,4	60*	55*	73,3	192	139
29,8	61*	50*	76,2	105	114
32,7	63*	47*	79,2	91*	83*
35,7	81*	60*	80,9	95*	82*
39,0	91*	84*	84,3	95*	74*
44,7	83*	78*	85,9	69*	80*
46,4	80*	77*	87,8	93*	78*
49,6	68*	60*	88,9	91*	69*
50,0	98*	64*	90,1	53*	44*
51,6	172*	121*	91,3	66*	73*
56,1	226	196	94,9	60*	62*
59,4	273	276	98,1	52*	55*
60,2	270	270	100 (Zn)	35*	45*

variation avec la température (2 *b*, fig. 9) mettent en évidence surtout la combinaison CuZn². Bien moins nets sont les points singuliers correspondant aux combinaisons CuZn et CuZn⁶.

Les deux courbes manifestent un maximum aux environs de la solution solide η , ce qui montrerait que la dissolution du cuivre dans le zinc augmente sensiblement sa dilatabilité, à moins que ce phénomène ne soit dû à l'effet d'une transformation allotropique du zinc. De même, la limite de la solution solide γ est indiquée par une inflexion sensible de la courbe de dilatation.

Dureté. — Les coupures d'échantillons, longues de 1 cm. environ, subissaient une inclusion, par trois, dans des tubes en laiton garnis de gomme-laque et furent polis comme pour la micrographie.

Les empreintes de dureté étaient faites par la

méthode Le Grix (1) avec un poids de 12 kg. Pour les alliages mous, la bille avait 3,18 mm. de diamètre, pour les alliages durs, 1,19 mm. Dans les deux cas, un coefficient de correction était préalablement établi, afin que les nombres de dureté soient équivalents à ceux obtenus par la pression de 500 kg. sur une bille de 10 mm.

L'empreinte de dureté était mesurée au microscope à l'aide d'un oculaire micrométrique.

Les moyennes de trois mesures ainsi obtenues sont indiquées au tableau V et sur la figure 10.

En comparant ces résultats avec ceux de M. Turner et Murray (fig. 3), nous ne retrouvons pas de maximum aux environs de 22 % de zinc, ni de minimum assez accentué, au voisinage de la composition CuZn^6 . Par contre, les deux diagrammes montrent un minimum aux environs de CuZn , mais avec des résultats numériques sensiblement différents.

Les essais de MM. Bauer et Vollenbruck (H.

(1) Le Grix, Revue de Métall., VIII, 613 (1911).

fig. 2) diffèrent des nôtres en ce qu'ils ne manifestent pas de minimum aux environs de CuZn et placent le maximum de la courbe, voisin de 60 % de zinc à 316 unités Brinell, alors que nous n'observons qu'une valeur de 276 unités. Un recuit moindre et un écrouissage plus fort produit par une pression supérieure de la bille suffisent pour expliquer ces différences.

Aussi bien le diagramme des alliages bruts de coulée que celui des alliages recuits de notre étude (fig. 9) mettent successivement en évidence la limite de la solution solide α , par une inflexion, la combinaison CuZn par un minimum, la limite de la solution solide γ par un maximum et celle de la solution solide ϵ par une inflexion. Par contre, la combinaison CuZn^2 n'est indiquée par un minimum que sur la courbe des alliages bruts de coulée ainsi que la limite de la solution solide δ , stable à haute température, qui est mise en évidence par un maximum.

(à suivre)

