

# Recherches sur la fluidité des métaux et des alliages.

par

**Daikichi Saito et Kennosuke Hayashi.**

## I. Introduction.

On sait que si un certain métal solide passe à son état liquide ou fondu, l'attraction mutuelle entre les molécules diminue subitement, leur mobilité s'augmentant considérablement, et le métal peut se mouler à la forme qu'on veut lui donner. C'est la fluidité du métal et l'art du moulage n'est autre chose que de tirer profit de cette qualité. Elle diffère cependant non seulement avec l'espèce et la composition chimique des métaux, mais encore avec la température à laquelle les métaux fondus ont été chauffés. Donc pour obtenir un moulage bien fin qui ait une forme délicate et compliquée, la fluidité est la chose importante qu'il faut considérer d'abord. Mais en général cette considération est malheureusement faite d'une façon très vague et superficielle, et jusqu'ici pour désigner cette propriété on emploie le mot "La fluidité" (en anglais, "thinfluid" ou "thickfluid"; en allemande, "Dünnflüssigkeit" ou "Dickflüssigkeit") en y ajoutant quelques mots complémentaires qui représentent le degré de la fluidité. Cette manière de qualification abstraite jugée seulement par l'œil du maître fondeur laisse beaucoup à désirer. Puisque cela vient naturellement du manque de moyen de la mesurer, il faut chercher pratiquement la méthode avec laquelle nous pouvons apprécier numériquement la fluidité de même que nous déterminons la dureté des métaux et de leurs alliages par le nombre de Brinell ou de Shore.

S'il s'agit de liquide ordinaire comme de l'eau, de l'huile etc., on peut mesurer mécaniquement la viscosité, antonyme de la fluidité, avec un

appareil tel que le viscosimètre, en mesurant la durée pendant laquelle certaine quantité de ce liquide à la température définie coule à travers un orifice dont la section est déterminée préalablement, et ainsi on peut déterminer au fond la qualité d'un liquide en ce qui concerne sa fluidité. Mais quant aux métaux et aux alliages on ne peut pas mesurer aussi simplement à cause de leur haute température.

Les procédés usuels actuellement en pratique pour le mesurage de cette fluidité dépendent de l'expérience ou de l'intelligence empirique des fondeurs qui conjecturent par la nuance des métaux fondus et la nature de leur surface. Le procédé qui nous semble être plus perfectionné et rationnel est d'observer l'état de l'éprouvette d'une forme spéciale coulée dans un moule convenable. A. Ledebur,<sup>(1)</sup> dans son ouvrage intitulé "Das Roheisen," donne la méthode suivante :

"Couler une éprouvette de 250 mm × 25 mm × 1.5 mm, à l'un de ses bouts ; il est rare que le moule soit rempli si jamais il l'est ; plus longue est la pièce coulée, plus grande est la fluidité ;"

D'après A. H. Sexton et J. S. G. Primrose :<sup>(2)</sup>

"Une pièce mince qui a la section de 1" × 1/16" sera coulée au moule en sable avec la pression définie et la distance jusqu'où s'écoule le métal donne la mesure de la fluidité."

Et aussi R. Mordenke<sup>(3)</sup> écrit dans son ouvrage :

"Mouler des pièces est la méthode généralement adoptée pour l'essai de la fluidité de la fonte fondue. Ces pièces sont longues en forme de coin ; une extrémité de ces pièces sera pointue et une autre aura la section 1" × 1/2". Elles seront coulées généralement dans le châssis à mouler et quelquefois sous la coquille de tôle pour solidifier plus vite quand il s'agit de l'essai de fonte riche en silicium. La distance jusqu'où s'écoule le métal donne la mesure de la fluidité."

A la condition qu'on exécute avec des soins minutieux, toutes ces méthodes énumérées plus haut pourraient indiquer numériquement la

1) A. Ledebur—Das Roheisen. 1904. S. 86.

2) A. H. Sexton & J. S. G. Primrose—The principle of ironfounding. 1911. P. 289.

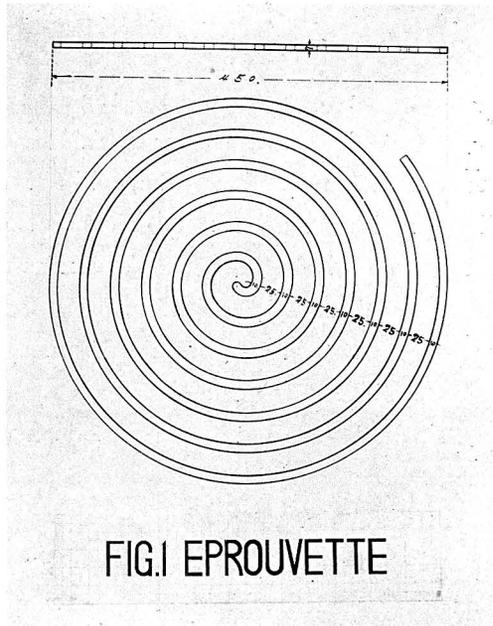
3) R. Mordenke—The principle of ironfounding. 1917. P. 105.

fluidité des métaux et des alliages. Cependant malheureusement elles ne sont pas pratiquées méthodiquement jusqu'ici, et on ne peut trouver de renseignements sur ce sujet dans aucun ouvrage publié en Europe ou en Amérique. Donc lorsqu'on est en face de questions sur la fluidité des métaux et des alliages que nous rencontrons toujours dans l'industrie métallurgique et à la fonderie telles que les suivantes : 1) il est évident que le phosphore augmente la fluidité de la fonte et que le soufre, au contraire, la diminue, mais comment ces deux éléments influencent-ils la fluidité de la fonte ? 2) la fluidité varie avec la température des métaux fondus, mais quel rapport existe-il entre elles ? 3) quelle différence y a-t-il entre la fluidité de l'acier, de la fonte, du bronze etc. ? etc., on ne peut pas résoudre ces questions bien nettement. D'autre part, dans ces dernières années le développement extraordinaire de l'industrie mécanique surtout du moteur à combustion demande le progrès brusque de l'industrie métallurgique des alliages, et pour répondre aux exigences de l'art du fondeur plus intenses que jamais, la recherche de la fluidité des métaux et des alliages devient de plus en plus importante.

A ce point de vue, nous avons fait quelques recherches en adoptant la méthode expliquée plus loin et nous croyons que nous avons eu des résultats assez intéressants. En effet, nous continuons toujours ces recherches et croyons utile, entre-temps, de publier le rapport préliminaire qui explique la méthode adoptée et une partie des résultats obtenus. L'autre suivra lorsque nos essais seront terminées.

## II. La méthode d'essai.

La méthode que nous avons adoptée pour des essais de la fluidité des métaux et des alliages est à peu près la même que celle de Ledebur, Sexton et Primrose, et Mordenke. Mais la pièce de Ledebur est trop courte pour comparer exactement tous les métaux et les alliages tandis qu'avec celle de Mordenke, le traitement des essais est assez difficile puisqu'elle devient longue quand il s'agit de la fluidité très grande. Nous avons donc adopté l'éprouvette spirale que représente la figure 1. Elle a la section de

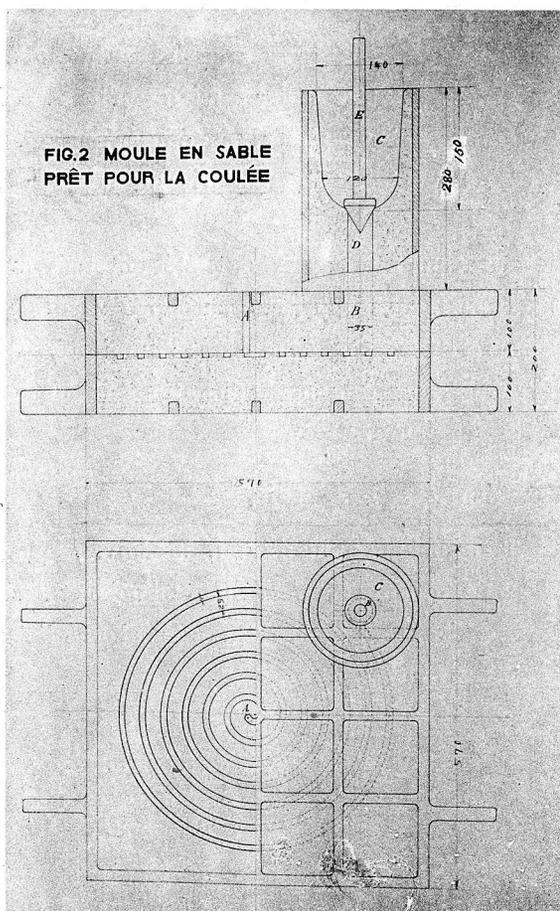


10 mm  $\times$  7 mm et la longueur totale de 5000 mm. La distance de chaque cercle est 25 mm et le diamètre le plus grand est de 450 mm. Il faut éviter que la section de l'éprouvette soit plus grande qu'il n'est nécessaire car elle augmente la quantité des bons métaux mais pas trop petite, puisque les métaux ayant la fluidité très mauvaise, se solidifient tout de suite, et il semble que la comparaison devienne inexacte.

Le moule métallique sera le meilleur au point de vue de l'exactitude des essais comme se trouvant toujours dans la même condition et en même temps atténuant autant que possible le facteur humain ; mais pour les métaux dont la fluidité est mauvaise il solidifie subitement et la comparaison ne serait pas exacte. De plus pour ceux qui ont la température très élevée le moule s'abîme bien vite et les résultats sont aussi inexacts. Au reste, puisque l'éprouvette doit être assez longue pour que la comparaison soit bien établie, elle a été coulée horizontalement au moule en sable étuvé qu'un seul fondeur perfectionne pour avoir l'uniformité.

Le sable employé, le mélange de 20% du sable neuf et de 80% du vieux, a été tamisé avec un tamis à mailles de 10 mm, tandis que le sable fin vieux du moule destiné au revêtement de la surface du moule a été tamisé avec un tamis à mailles de 1.5 mm. La surface du moule n'a pas été enduite de couche noire, de peur qu'elle irrégularise la section d'éprouvette et la résistance d'écoulement des métaux fondus contre la paroi au cas où elle ne serait pas bien unie et parce qu'il y a de certains métaux qui ne se familiarisent pas avec la couche noire.

Le moule consiste en deux demi-châssis dont l'un inférieur a été employé pour former l'éprouvette et l'autre supérieur reste en plat ; il est



muni au centre d'un châssis supérieur qui correspond à un bout intérieur de l'éprouvette un évent "A" de diamètre de 20 mm, et à l'autre bout extérieur un orifice de coulée "B" de 35 mm de diamètre et de 100 mm de hauteur, surmonté par une poche de coulée "C" (1646 cm. cb.). Au fond de cette poche on creuse un orifice "D" de 35 mm de diamètre qui s'adopte exactement à celui de coulée "C" et est fermé par un bouchon "E" de fonte chauffée à rouge (Fig. 2).

Le moule est soumis dans l'étuve, à un séchage de 24 heures, est ensuite

nettoyé, et puis mis en état d'être coulé comme sur la figure 2. On verse le métal fondu dont on veut mesurer la fluidité dans la poche ajustée exactement sur l'orifice de coulée jusqu'à ce qu'elle soit remplie complètement, et on mesure attantivement la température à l'aide du pyromètre Pt-Pt. Rd calibré préalablement, et soulève le bouchon pour que le métal fondu s'écoule dans le moule avec une pression définie.

La longueur de l'éprouvette ainsi coulée a été mesurée après son refroidissement complète.

Nous nous sommes servis de creusets en plombagine No. 80 pour fondre 40 kg du métal en chauffant dans le four à coke. La plus lourde éprouvette obtenue ne pèse pas moins de 6 kg.

Puisque la température du moule influence plus ou moins la fluidité des métaux, nous avons déterminé préalablement de couler pendant qu'il est à la température 35-40c; pour ce but le thermomètre à mercure a été inséré en A et C.

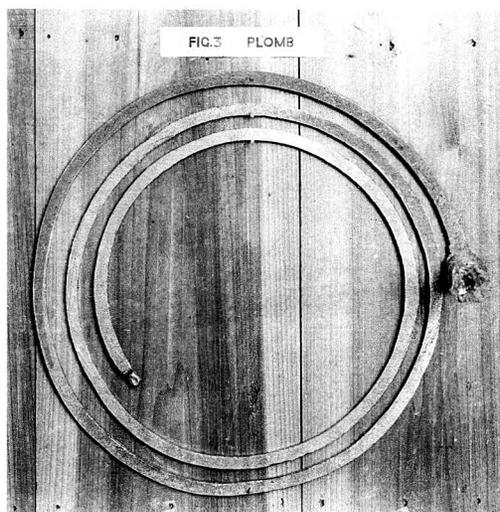
L'échantillon pour l'analyse chimique avait été pris de l'éprouvette elle-même après avoir photographié.

Il y aura bien lieu de croire que nos essais ont été effectués avec l'exactitude désirable, parce que nous avons apporté beaucoup d'attention à la température et à la pression des métaux fondus, à l'humidité, à la température et à la qualité des sables et enfin sur les opérations du mouleur ainsi que la préparation générale des éprouvettes.

### III. Les résultats des essais.

Le plomb, le zinc, l'étain, l'antimoine, l'aluminium, le cuivre, quatre sortes de bronze, deux de laiton, trois de fonte grise, la fonte blanche et l'acier au creuset ont été examinés successivement avec cette méthode ci-dessus. Figures 3-19 représentent des pièces coulées.

#### 1) Le Plomb: (Fig. 3)



Température du métal à

la coulée, c 410

Température du moule, c 38

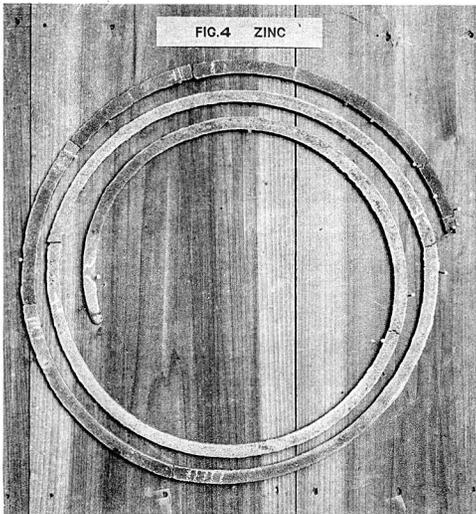
Longueur de la pièce, mm 3007

Dosage :

Fe, <sup>%</sup> 0.013, Cu, 0.038

Pb, 99.949

2) Le Zinc : (Fig. 4)



Température du métal à

la coulée, c 480

Température du moule, c 38

Longueur de la pièce, mm 2970

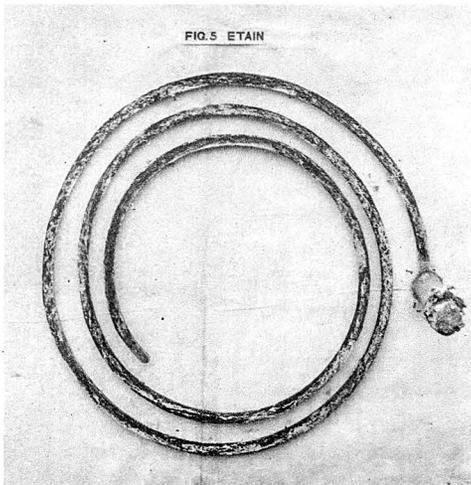
Dosage :

Pb <sup>%</sup> 1.252, Fe 0.136,

Cu 0.013, Cd tr,

Zn 98.589.

3) L'étain : (Fig. 5)



Température du métal à

coulée, c 250

Température du moule, c 38

Longueur de la pièce, mm 3074

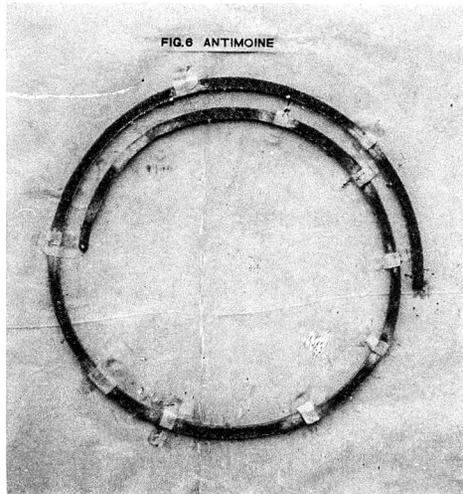
Dosage :

Pb <sup>%</sup> 0.027, Fe 0.008,

Cu 0.006, Ni tr,

Sn 99.959.

## 4) L'antimoine : (Fig. 6)



Température du métal à  
la coulée, c 650

Température du moule, c 37

Longueur de la pièce, mm 1877

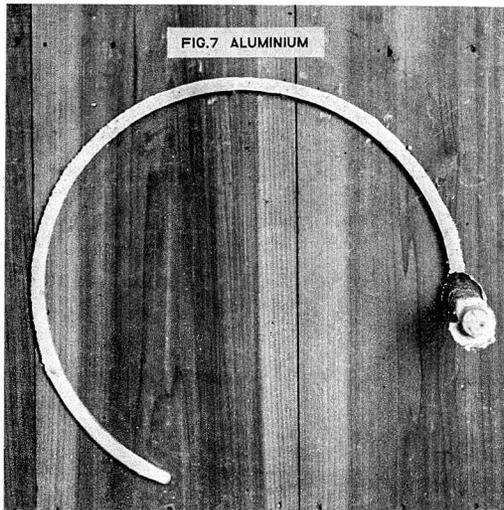
Dosage :

Pb <sup>%</sup> 0·095, Fe 0·024,

Cu 0·011, S 0·332,

Sb 99·538.

## 5) L'aluminium : (Fig. 7)



Température du métal à  
la coulée, c 680

Température du moule, c 40

Longueur de la pièce, mm 900

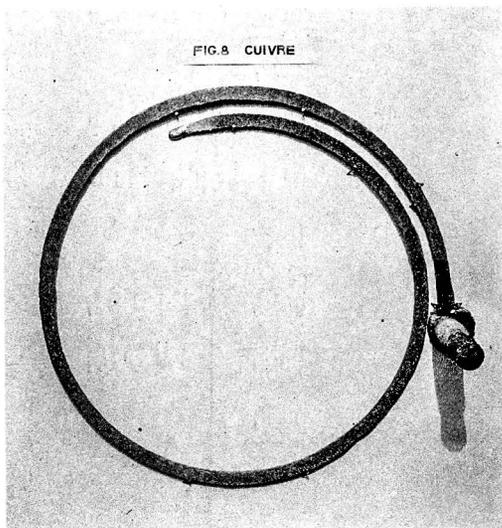
Dosage :

Pb <sup>%</sup> 0·057, Fe 0·270,

Cu tr, Si 0·846,

Al 98·770.

6) Le cuivre: (Fig. 8)

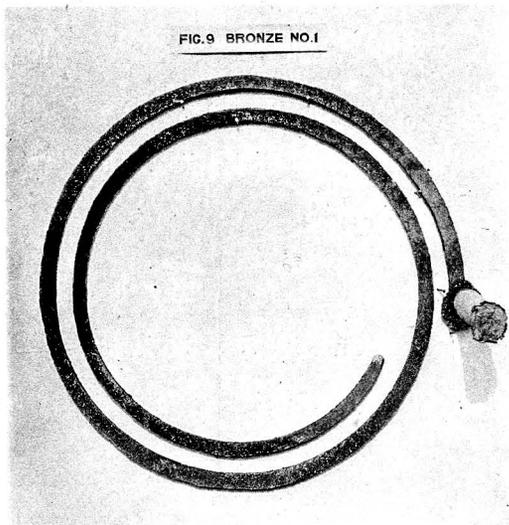


Température du métal à  
la coulée, c 1150  
Température du moule, c 38  
Longueur de la pièce, mm 1720

Dosage :

P	0.002,	Fe	0.022,
O	0.015,	As	0.001,
Cu	99.960.		

7) Le bronze No. 1: (Fig. 9)

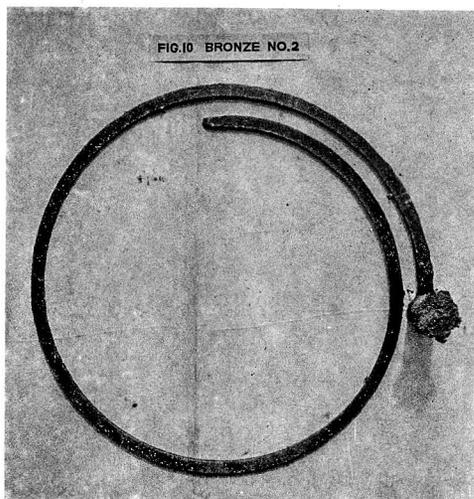


Température du métal à  
la coulée, c 1145  
Température du moule, c 38  
Longueur de la pièce, mm 2400

Dosage :

Sn	19.38,	Zn	1.15,
Cu	79.20,	Pb	0.15,
Fe	0.12.		

## 8) Le bronze No. 2: (Fig. 10)



Température du métal à

la coulée, c 1180

Température du moule, c 36

Longueur de la pièce, mm 1660

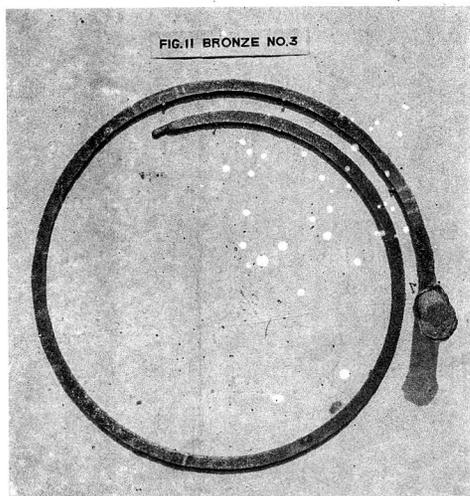
Dosage :

Sn 10·30,	Zn 1·83,
-----------	----------

Cu 87·64,	Pb 0·10,
-----------	----------

Fe 0·09,	
----------	--

## 9) Le bronze No. 3: (Fig. 11)



Température du métal à

la coulée, c 1145

Température du moule, c 39

Longueur de la pièce, mm 1745

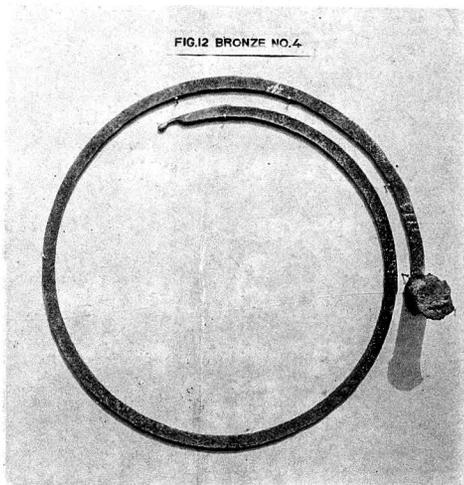
Dosage :

Sn 11·42,	Zn 1·80,
-----------	----------

Cu 86·27,	Pb 0·06,
-----------	----------

Fe 0·12.	
----------	--

10) Le bronze No. 4: (Fig. 12)

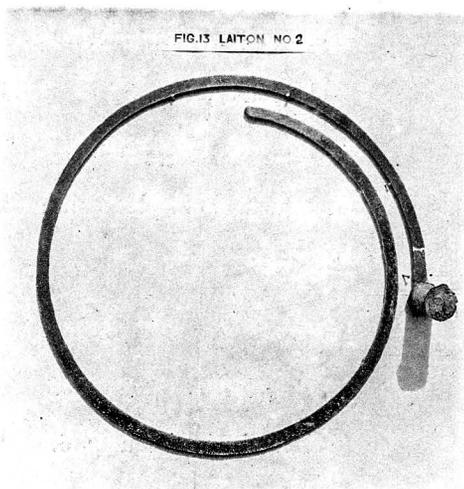


Température du métal à  
la coulée, c 1100  
Température du moule, c 39  
Longueur de la pièce, mm 1743

Dosage :

Sn	8.64,	Zn	5.04,
Cu	85.50,	P	0.58,
Pb	0.15,	Fe	0.09.

11) Le laiton No. 2: (Fig. 13)

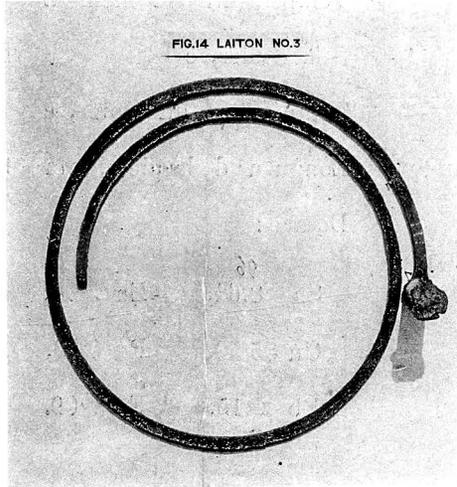


Température du métal à  
la coulée, c 1090  
Température du moule, c 39  
Longueur de la pièce, mm 1637

Dosage :

Sn	0.06,	Pb	0.66,
Fe	0.16,	Cu	64.73,
Zn	34.40.		

## 12) Le laiton No. 3 : (Fig. 14)



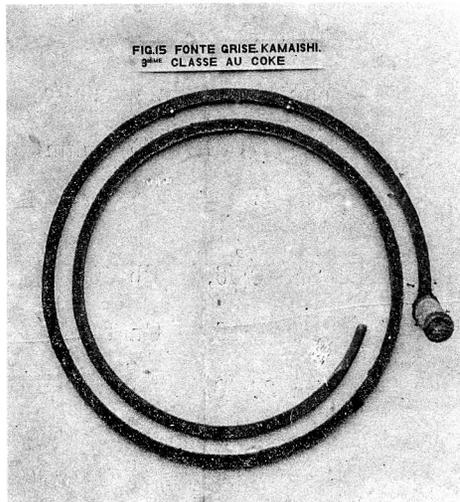
Température du métal à  
la coulée, c 1020

Température du moule, c 39

Longueur de la pièce, mm 1957

Dosage :

	%		
Sn	0·15,	Pb	1·07,
Fe	0·13,	Cu	54·21,
Zn	44·45.		

13) La fonte grise :—Kamaishi, 3<sup>ième</sup> classe au coke. (Fig. 15)

Température du métal à  
la coulée, c 1300

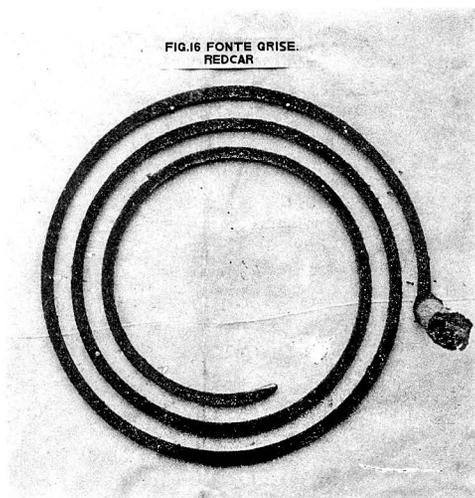
Température du moule, c 38

Longueur de la pièce, mm 2445

Dosage :

	%		
T.C	2·91,	Si	3·89,
P	0·197,	S	0·058,
Mn	1·34,	Cu	0·36.

14) La fonte grise :—Redcar (Fig. 16)

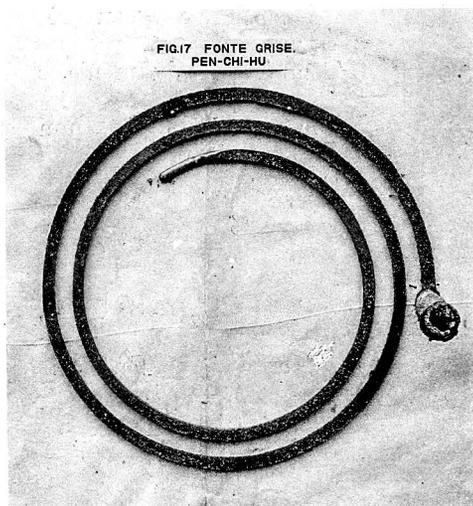


Température du métal à  
la coulée, c 1320  
Température du moule, c 37  
Longueur de la pièce, mm 3250

Dosage :

T.C	3.50,	Si	2.73,
P	0.998,	S	0.029,
Mn	0.60,	Cu	0.02.

15) La fonte grise :—Pen-chi-hu  
(Fig. 17)

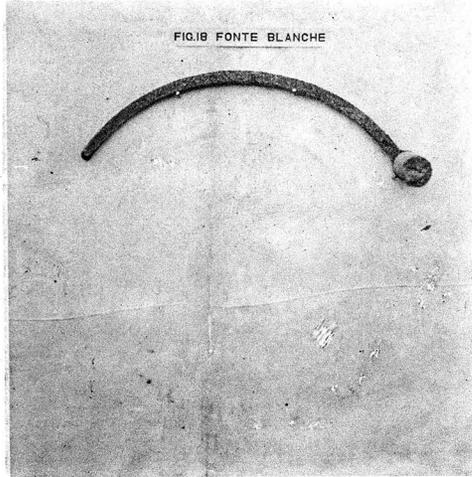


Température du métal à  
la coulée, c 1290  
Température du moule, c 39  
Longueur de la pièce, mm 2822

Dosage :

T.C	3.41,	Si	2.76,
P	0.087,	S	0.059,
Mn	0.68,	Cu	0.03,

## 16) La fonte blanche: (Fig. 18)

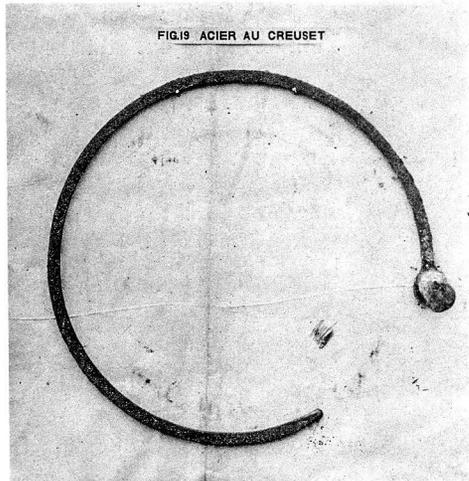


Température du métal à  
la coulée, c 1255  
Température du moule, c 39  
Longueur de la pièce, mm 433

Dosage :

T.C.  $\frac{\%}{3.35}$ , Si 0.59,  
P 0.250, S 0.024,  
Mn 0.16,

## 17) L'acier au creuset: (Fig. 19)



Température du métal à  
la coulée, c à peu près 1600  
Température du moule, c 41  
Longueur de la pièce, mm 1140

Dosage :

T.C.  $\frac{\%}{0.42}$ , Si 0.46?,  
P 0.018, S 0.023,  
Mn 0.67, Cu 0.17.

En résumant, on aura le tableau suivant.

Nom.	Point de solidification.	Température à la coulée.	degré du surchauffage.	Température du moule.	Long. de pièce.
	°C	°C	°C	°C	mm.
Plomb .....	327	410	83	38	3007
Zinc .....	419	480	61	38	2970
Étain .....	232	250	18	38	3074
Antimoine .....	630	650	20	31	1877
Aluminium .....	657	680	23	40	900
Cuivre .....	1084	1150	66	38	1720
Bronze No. 1 .....	à peu près 900	1145	245	38	2400
„ No. 2 .....	1000	1180	180	36	1660
„ No. 3 .....	980	1145	165	39	1745
„ No. 4 .....	900	1100	200	39	1743
Laiton No. 2 .....	950	1090	140	39	1637
„ No. 3 .....	900	1020	120	39	1957
Fonte grise Kamaishi .....	1200	1300	100	38	2443
„ Redcar .....	1180	1320	140	37	3250
„ Pen-chi-hu .....	1200	1290	90	39	2822
„ blanche .....	1100	1255	155	39	433
Acier au creuset .....	1400	à peu près 1600	200	41	1140

Le point de solidification des métaux est tiré de "Hütte"; mais puisqu'ils ont plus ou moins d'impuretés, comme nous voyons dans l'analyse, leur point de solidification réel sera pratiquement moins bas. Le point de solidification des alliages comme du bronze et du laiton a été calculé d'après leur diagramme d'équilibre. Enfin quant aux diverses fontes et à l'acier, leur point de solidification a été inféré de leur composition chimique, et il y aurait donc peut-être un peu d'erreur; mais il faut remarquer que tous ces matériaux sont employés toujours dans la fonderie ordinaire.

A 83°c au-dessus de la température de solidification, le plomb a la fluidité de 3007 mm tandis que le zinc en a 2970 mm à 61°c au-dessus de son point de solidification; on peut dire donc que ces deux métaux ont à peu près la même fluidité. Que l'étain a la fluidité de 3074 mm même à

18° c seulement au-dessus de son point de solidification peut confirmer le fait réel bien connu qu'elle a une fluidité supérieure. On pourra aussi dire que la fluidité de l'antimoine n'est pas mauvaise parce qu'il a 1877 mm à 20° c au-dessus de son point de solidification. Quant à l'aluminium, sa fluidité est extrêmement moins basse que celle du plomb ou du zinc et elle n'a que 900 mm à 23° c au-dessus de son point de solidification. Ce fait nous démontre justement qu'il est assez difficile à mouler. Le cuivre a la fluidité de 1720 mm à 1150° c qui correspond à peu près à la moitié de celle du plomb. Cependant, quand on y ajoute 10.30% de l'étain et 1.83% du zinc, la fluidité diminue un peu. C'est ce que représente le bronze No. 2; elle n'a que 1660 mm même à la température de 1180° c, 30° c plus élevé que celui du cuivre. A mesure que l'étain augmente, sa fluidité devient plus grande. On peut voir ce phénomène dans le bronze No. 3 et No. 1: Le bronze No. 3, 11.42% d'étain et 1.80% de zinc, a la fluidité de 1745 mm à 1145° c à peu près la même que celle du cuivre, tandis que le bronze No. 1, 19.38% d'étain et 1.15% de zinc, a la fluidité considérable de 2400 mm à la même température que le bronze No. 3.

Pourquoi la fluidité diminue-t-elle quand l'étain qui est moins de 11.42% s'allie avec le cuivre? Pourquoi augmente-t-elle avec l'étain dans le bronze? Pour la première question il paraît qu'on n'ait qu'à dire que la fluidité du cuivre lui-même sera plus grande à-priori que celle de la structure "α" du bronze. Quant à la deuxième question il semble qu'on puisse expliquer par le diagramme d'équilibre de Cu-Sn: le point de solidification de l'alliage de 10.30% de l'étain est à peu près 1020° c, tandis qu'aux alliages de 11.42% de l'étain et de 19.38% de l'étain, l'un et l'autre sont à peu près 980° C et 920° C respectivement. Si ces alliages sont coulés à la même température, celui qui est riche en étain se conserve plus longtemps à l'état liquide que celui qui en est pauvre, et il en résulte que le premier a plus la fluidité que le second. Nous croyons utile de continuer ces études pour résoudre toutes ces questions d'une façon précise.

Que le phosphore améliore la fluidité du bronze est démontré par le fait

que le bronze No. 4 (0.58% P, 8.64% Sn, et 5.04% Zn) a la fluidité de 1743 mm, malgré qu'il a été coulé à une température moins élevée que le bronze No. 3.

Si le cuivre s'allie avec le zinc au lieu de l'étain, c'est-à-dire au laiton, sa fluidité est à peu près la même que celle du bronze: le laiton No. 2 (34.40% Zn) a à peu près la même fluidité que le bronze No. 3 (11.42% Sn), le laiton No. 3 (44.45% Zn) se place entre les bronzes No. 3 et No. 1 (19.38% Sn); et ainsi on peut voir que l'augmentation du zinc dans le laiton augmente graduellement la fluidité comme dans le cas du bronze. Nous pouvons ajouter ici que si une certaine quantité de zinc s'allie avec le cuivre, la fluidité devient moindre que celle du cuivre, comme dans le cas du bronze.

On sait bien que la fluidité de la fonte blanche n'est pas bonne; ce fait est mis en évidence à nos essais: elle a la fluidité la plus inférieure parmi les métaux et les alliages que nous avons examinés et elle n'est presque qu'environ 1/7 de celle de la fonte grise.

En général, la fonte grise a une fluidité supérieure; mais parmi les fontes grises que nous avons choisies, Redcar riche en phosphore a la plus grande fluidité: 3250 mm, tandis que 3<sup>ème</sup> classe de la fonte au coke de Kamaishi et la fonte de Pen-chi-hu ont respectivement 2443, 2822 mm. C'est pour cette raison que les mouleurs préfèrent la fonte Redcar aux autres. La fluidité de la fonte "Kamaishi" est inférieure à celle de "Pen-chi-hu" quoiqu'elle ait beaucoup de silicium et assez de phosphore; il paraît que la diminution de carbone total dans la fonte "Kamaishi" en serait la cause.

Nous avons évité d'utiliser le pyromètre, système de "Le Chatelier," pour mesurer la température de l'acier fondu, puisqu'il a une température plus élevée et nous l'avons mesurée avec le pyromètre à radiation "Thwing". Mais Malheureusement nous n'avons pas réussi à cause du dérangement de l'appareil. Cependant on peut voir qu'à la température élevée suffisante pour le moulage ordinaire avec l'acier au creuset, il a la fluidité 1140 mm quelque chose semblable à celle de l'aluminium. Donc si on considère seulement la fluidité, le moulage bien réussi avec l'acier au creuset de ce genre, le sera aussi avec l'aluminium et vice versa.

#### IV. Résumé.

Nous savons maintenant exprimer numériquement la fluidité des métaux et des alliages principaux ; il n'en est pas pourtant moins important de remarquer que l'on doit tenir compte de la température de coulée, de même que l'on considère le traitement thermique des métaux pour la discussion de leur qualité physique, car la fluidité, comme nous avons expliqué plus haut, est beaucoup influencé par la température. Peut-être sera-t-il imprudent de faire la comparaison d'après seulement les résultats obtenus, et il faut rappeler que nous ne pourrions faire la juste comparaison que lorsqu'on sera bien au courant de l'influence de la température sur les métaux et leurs alliages.

Le pression définie du métal fondu est très importante sur la mesure de la fluidité et nous avons conservé, dans ce but, pendant toute la série des essais, l'hauteur définie de colonne des métaux fondus. Cette méthode serait rationnelle pour les métaux du même genre, mais elle n'est pas juste pour tous les métaux et les alliages parce qu'ils n'ont pas le même poids spécifique. A la pratique de fonderie, on ne peut pas considérer cependant le poids spécifique et la fluidité individuellement et il semble que la méthode que nous avons adoptée n'est pas trop éloignée de la pratique.

Quoiqu'on puisse admettre d'après nos résultats que la composition chimique des métaux et des alliages ait de l'influence sur la fluidité, il est nécessaire que nous l'étudions davantage.

Toutes les questions telles que la variation de la fluidité sous la température à la coulée et la composition chimique, la relation entre la fluidité, la qualité physique et la structure métallographique, sont en ce moment-ci en étude ; nous allons les publier aussitôt qu'elles seront finies.

Ces essais ont été poursuivis à l'Arsenal d'Osaka et nous tenons à remercier Messieurs Yotsuya et Kunimoto, les sous-ingénieurs militaires, du concours aimable qu'ils nous ont donné.

[Fin]