

Traitement thermique de l'invar
au
Bureau International des Poids et Mesures

par G. Girard

Introduction

Après la distribution des étalons de longueur en platine iridié sanctionnés par la 1^{ère} Conférence Générale des Poids et Mesures en 1889, il était devenu urgent de réaliser d'autres étalons moins coûteux et plus abordables à la grande majorité des Instituts s'occupant de mesures précises de longueur.

Au Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), dès 1891, Ch.-Ed. Guillaume effectua sur le nickel pur des recherches qui se poursuivirent sur des alliages de nickel et de cuivre plus faciles à travailler que le nickel pur. Dans les années 1895-1896, des observations indépendantes fixèrent son attention sur des aciers au nickel.

Recherches sur l'invar

Des études de dilatabilités d'aciers au nickel ayant des teneurs en nickel (titres massiques) inférieures à 44 % conduisirent Ch.-Ed. Guillaume à constater qu'entre 30 et 40 % environ ces alliages possédaient un coefficient de dilatation inférieur à ceux de tous les métaux connus, avec un minimum entre 35 et 37 % de nickel.

Certaines barres d'alliage ont été soumises à des recuits divers et il a été possible, dès 1897, de constater que les barres à 36 % de nickel avaient en outre des allongements très faibles au cours du temps. On attribua à cet alliage, le nom d'invar.

Il fut possible à cette époque de préconiser un traitement thermique pour cet alliage à faible coefficient de dilatation, de manière à améliorer encore sa bonne stabilité de longueur.

On pouvait dès lors prévoir l'utilisation de cet alliage pour la fabrication d'étalons de longueur de moyenne précision et en particulier en géodésie, où ils seraient de nature à augmenter la précision des mesures.

Dès l'année suivante, des expériences furent entreprises par l'expédition suédo-russe au Spitzberg pour améliorer la méthode de mesure des bases géodésiques imaginée par Ed. Jäderin. Cette méthode utilisait, au lieu de règles rigides et de microscopes, des fils munis à leurs extrémités de réglettes divisées et soumis à une force de traction constante. L'amélioration consista à utiliser, non plus conjointement des fils d'acier et des fils de laiton, mais des fils d'invar.

Les résultats furent si probants qu'ils suscitèrent des études plus approfondies sur les aciers au nickel en général et sur l'invar en particulier, études qui durèrent encore plusieurs décennies.

Ces études ont été présentées en détail par Ch.-Ed. Guillaume dans les Travaux et Mémoires du BIPM, tome 17, 1927, pp. 1-240.

Entre autres, l'étude des changements progressifs ou passagers le conduisit à un procédé de traitement qui permet d'obtenir un alliage stable en fonction du temps.

En effet, une barre d'invar refroidie à partir de la température de la forge et conservée à la température ambiante s'allonge constamment au cours du temps ; son évolution de plus en plus lente, se poursuit pendant des années. En revanche, si cette barre est maintenue pendant un certain temps à une température modérément élevée (par exemple comprise entre 50 et 150 °C) puis ramenée très lentement à température ordinaire, l'évolution ultérieure est sensiblement plus faible qu'elle n'aurait été sans ce traitement.

Le nom d'étuvage a été donné à ce traitement thermique.

On a constaté d'autre part que l'étuvage produit un relèvement du coefficient de dilatation d'autant plus grand que la température a été plus élevée.

Le fil d'invar utilisé en géodésie (diamètre 1,65 mm) est obtenu par étirage à partir de barres. Cet étirage abaisse notablement le coefficient de dilatation qui devient négatif (de l'ordre de $- 0,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).

La température d'étuvage peut donc être choisie de manière à ramener ce coefficient aussi près que possible de zéro.

Ainsi, l'étirage suivi de l'étuvage destiné à assurer la stabilité de l'alliage, permet d'obtenir des fils pratiquement indilatables dans les conditions de traction correspondant à leur emploi normal.

Toutes ces études ont été effectuées en collaboration étroite avec la Société de Commentry Fourchambault et Decazeville dont les aciéries étaient à Imphy, Nièvre (France). Aujourd'hui, c'est Creusot-Loire, division Métalimphy, dont les aciéries sont toujours à Imphy, qui continue la fabrication de l'invar.

Etuvage des fils

Par une entente conclue à l'époque entre la Société de Commentry et le BIPM, on avait décidé de constituer au BIPM un stock important de fil d'invar étuvé et de dilatabilité aussi faible que possible⁽¹⁾. Lorsqu'

(1) Les frais entraînés par les mesures de coefficients de dilatation et par l'étuvage lui-même étaient remboursés partiellement par le fabricant qui nous reversait 10 % du prix de vente de l'alliage. Depuis 1975, la totalité des frais nous est remboursée par Creusot-Loire Métalimphy.

après analyse une coulée d'invar semble devoir conduire très près du résultat recherché, le coefficient de dilatation d'un échantillon est déterminé au BIPM. S'il s'avère que cette valeur est convenable (entre $- 0,5$ et $- 0,7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), des torches de fil sont envoyées au BIPM pour y subir le traitement thermique approprié. Un délai de trois à quatre ans après étuvage est souhaitable avant que cet alliage soit utilisé.

La première méthode d'étuvage consistait à enrouler le fil (1 km environ) en couches superposées autour d'une cuve cylindrique contenant de l'eau. Les couches de fil étaient isolées de l'extérieur par de l'amiante. L'eau était portée à ébullition pendant trois à quatre jours puis la température était abaissée graduellement et de plus en plus lentement pendant environ 3 mois.

Cette méthode fut utilisée jusqu'en 1924, date à laquelle on la modifia pour plonger directement les torches de fil constituant une livraison⁽²⁾ dans l'huile contenue dans une cuve métallique chauffée au gaz. C'est toujours de la même façon que l'on procède actuellement mais l'huile est maintenant chauffée électriquement et sa température est régulée.

Ainsi, jusqu'en 1924, la température d'étuvage était fixée à $100 \text{ }^\circ\text{C}$; elle est choisie maintenant à partir du coefficient de dilatation avant étuvage.

Détermination du coefficient de dilatation

Les différents appareils utilisés pour mesurer le coefficient de dilatation des fils d'invar ont été décrits en détail par A. Bonhourse dans les Travaux et Mémoires du BIPM, tome 22, 1963, pp. B 1 à B 63.

Le premier appareil permettait de mesurer, sous traction, les variations de longueur d'un échantillon de 1 m dans le comparateur à dilatation du BIPM, entre 0 et $40 \text{ }^\circ\text{C}$ environ.

En 1934, un appareil provisoire a permis, pendant près de 20 ans, de déterminer ce coefficient sur des fils de 24 m (fils non équipés de réglettes ou bien fils ou rubans géodésiques eux-mêmes). Les expériences étaient effectuées entre la température ambiante et $35 \text{ }^\circ\text{C}$ environ grâce à un chauffage électrique.

L'appareil actuel permet de travailler à des températures comprises entre 4 et $40 \text{ }^\circ\text{C}$ environ, également sur des fils ou rubans de 24 m. Le fil est suspendu sous traction, dans l'air, dans une enceinte allongée à double paroi dont la section droite est en forme de U et dont on fait varier la température au moyen d'une circulation d'eau.

⁽²⁾ Il faut distinguer entre livraison et coulée d'invar. Une même coulée peut donner lieu à plusieurs livraisons. Tous les fils d'une même livraison sont étuvés ensemble sauf lorsque la masse de fil est trop importante. Les fils provenant de la même coulée peuvent donc être soumis à des traitements différents qui tiennent compte de la dispersion des caractéristiques avant étuvage. On obtient des fils dont les coefficients de dilatation peuvent être légèrement différents.

Coefficient de dilatation des différentes livraisons d'invar

La longueur \underline{l}_t d'un fil, à une température \underline{t} , est donnée par la formule

$$\underline{l}_t = \underline{l}_0 (1 + \underline{\alpha} \underline{t} + \underline{\beta} \underline{t}^2).$$

Le coefficient de dilatation à la température \underline{t} est

$$\underline{\alpha}_t = \underline{\alpha}_0 + 2 \underline{\beta} \underline{t}.$$

On utilise dans ce qui suit, les coefficients à 20 °C ($\underline{\alpha}_{20}$) pour comparer les résultats obtenus d'une livraison à ceux d'une autre ; $\Delta\underline{\alpha}_{20}$ est la variation du coefficient à 20 °C due à l'étuvage.

Le tableau I rassemble un certain nombre de renseignements sur les livraisons de fil d'invar traité jusqu'à ce jour. Nous manquons de données sur les 14 premières livraisons.

Ce tableau donne, en 7^e colonne, la température d'étuvage et, en dernière colonne, l'augmentation du coefficient de dilatation à 20 °C ($\Delta\underline{\alpha}_{20}$) due à l'étuvage. La figure 1 résume ces résultats pour les

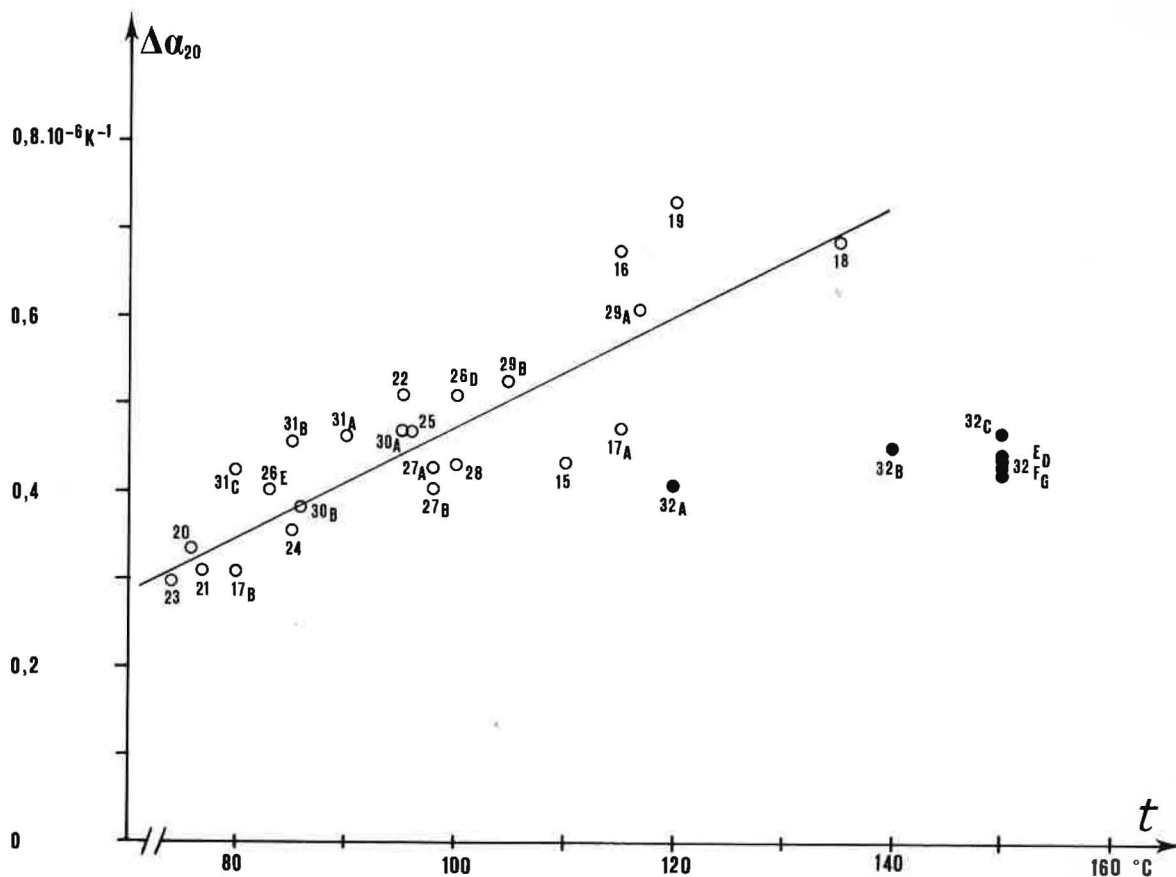


Fig. 1.- Influence de la température d'étuvage \underline{t} sur le relèvement $\Delta\underline{\alpha}_{20}$ du coefficient de dilatation à 20 °C du fil d'invar des diverses livraisons. Les nombres inscrits à côté des points sont les numéros des livraisons ; les lettres, lorsqu'elles existent, correspondent aux différents étuvages.

livraisons à partir de la 15^e. Cette figure reprend et prolonge celles publiées par A. Bonhoure (loc. cit.) et par moi-même dans un article présenté à "High Precision Geodetic Length Measurements Symposium" en juin 1978 à Helsinki.

Chaque point correspond à un traitement de fil d'invar. Pour certaines livraisons (17, 26, 27, 29 à 32), on a procédé à plusieurs étuvages et des indices A, B ... leur ont été attribués.

Les livraisons 22, 24 à 26 concernaient non seulement du fil mais aussi du ruban qui a été étuvé avec le fil ou séparément. Ce ruban est obtenu par écrasement à partir d'un fil ; sa section (5 mm × 0,43 mm) a une aire très voisine de celle d'un fil.

On voit dans le tableau I que le coefficient de dilatation à 20 °C du ruban de la livraison 25 a subi un relèvement un peu plus grand que celui du fil étuvé à la même température. Le ruban des livraisons 26 A, B, C a été étuvé à une température plus faible que le fil des livraisons 26 D et E, confirmant ainsi ce qui a été observé sur la livraison 25 : l'effet de l'étuvage est plus marqué sur le ruban que sur le fil, probablement à cause du traitement mécanique supplémentaire subi aux aciéries.

Livraison 32

On constate que les points correspondant à la livraison 32 s'écartent de la droite tracée.

Voyons en détail comment ces points ont été obtenus :

Livraison 32 A - à partir des valeurs de α_{20} déterminées sur les 3 échantillons, après la réception des torches de fil, et de l'expérience acquise (figure 1) on a déduit que la température d'étuvage devait être d'environ 100 °C. Après avoir laissé les 3 torches de fil à 100 °C pendant 4 jours, un échantillon a été sorti de la cuve d'étuvage et la mesure de son coefficient de dilatation faite le lendemain. Au vu du résultat la température d'étuvage a été portée à 120 °C. A la fin de l'étuvage on a constaté que le relèvement du coefficient de dilatation n'a été que de $0,41 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Livraison 32 B - on a décidé de porter la température d'étuvage à 140 °C pendant 3 jours puis de l'abaisser en un mois jusqu'à 100 °C pour y faire un palier d'une semaine et de continuer ensuite la descente habituelle jusqu'à la température ambiante en 3 mois.

Livraisons 32 C à 32 K - le même processus que pour la livraison 32 B a été suivi mais la température maximale a été de 150 °C.

On constate, sur la figure 1, que les points correspondant à la livraison 32 s'écartent de ceux des livraisons précédentes, l'effet de l'étuvage étant plus faible que celui auquel on pouvait s'attendre d'après les résultats antérieurs.

Le fait de porter la température d'étuvage de 100 à 150 °C n'a que très peu d'effet sur le relèvement du coefficient de dilatation.

Par contre on note, dans le tableau II qui donne le détail des résultats obtenus jusqu'à maintenant sur une partie de la livraison 32, une bonne cohérence des valeurs des coefficients de dilatation des différentes torches, bien meilleure que pour les livraisons anciennes.

Cette amélioration est due probablement à une meilleure homogénéité de l'alliage au moment de la fabrication que par le passé et peut être aussi à des modifications de traitement métallurgique.

Conclusion

Les qualités métrologiques de l'invar ayant subi un traitement thermique sont appréciées des utilisateurs ; l'emploi de l'invar, jadis limité à la géodésie s'étend maintenant au génie civil (surveillance d'ouvrage souterrains, de mines, de ponts, de barrages, de centrales hydroélectriques et nucléaires, etc.).

Ainsi Métalimphy distribue l'invar géodésique dans différents pays, par exemple au cours des deux dernières années, en Autriche, en Grande Bretagne, en Suède, en Suisse et surtout en France. Dans ce dernier pays une entreprise fabrique des appareils utilisant des fils d'invar géodésique ; ces instruments sont vendus dans de nombreux pays en Europe, en Amérique du Nord et du Sud, en Asie et en Afrique.

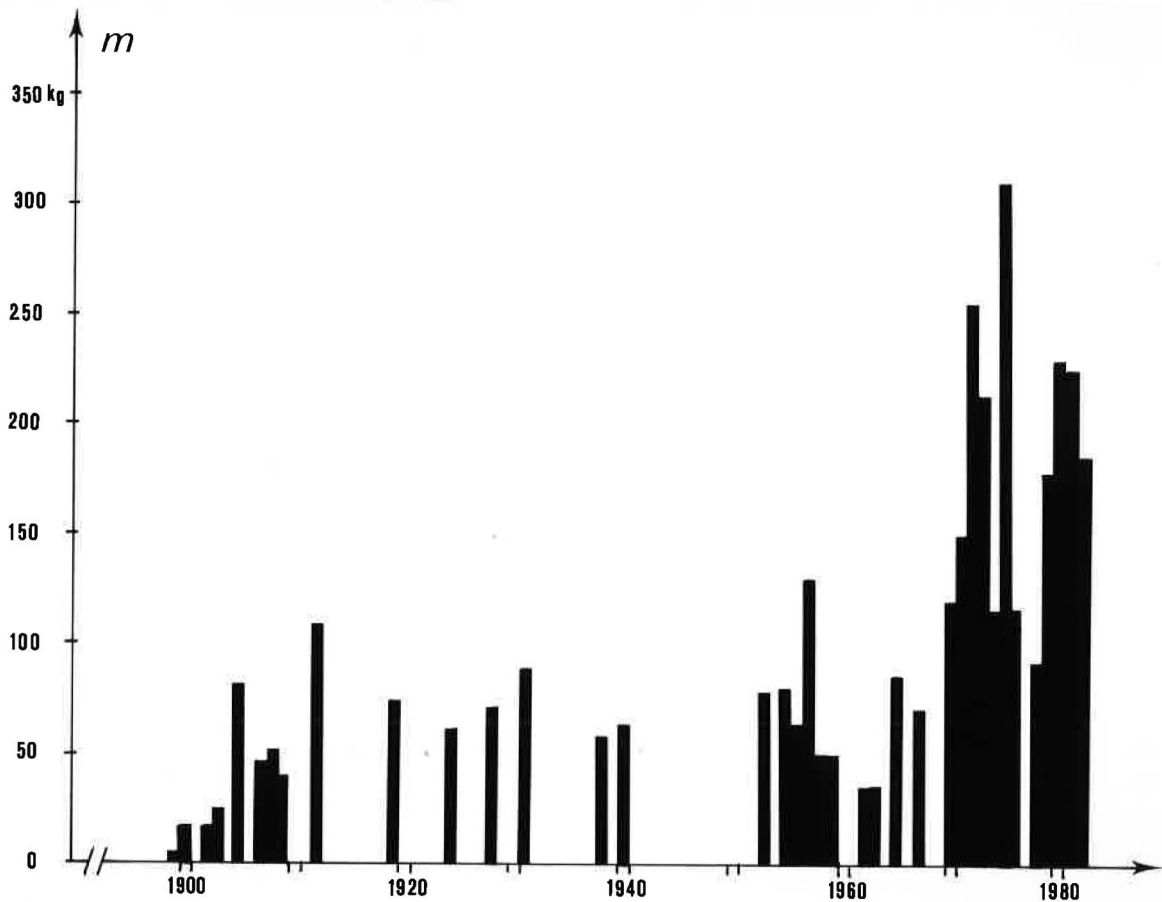


Fig. 2.- Masse m d'invar soumise annuellement à l'étuvage.

La figure 2 montre d'ailleurs l'évolution depuis plus de 80 ans des quantités d'invar étuvé annuellement. Elle est le témoin de l'utilité des recherches effectuées par Ch.-Ed. Guillaume et de l'importance grandissante qu'a pris cet alliage particulier dans la résolution de certains problèmes actuels.

Tableau I

Renseignements divers sur les livraisons de fil et de ruban d'invar
La dernière colonne donne l'augmentation $\Delta\alpha_{20}$ du coefficient de dilatation à 20 °C provoquée par l'étuvage

Coulée	Livraison et Etuvage	Masse de fil étuvé	Date d' étuvage	Coefficient de dilatation avant étuvage			Température maximale d'étuvage	Coefficient de dilatation après étuvage			$\Delta\alpha_{20}$ [2]-[1]
				α_0	β	α_{20} [1]		α_0	β	α_{20} [2]	
		kg		$\times 10^{-9}K^{-1}$	$\times 10^{-11}K^{-2}$	$\times 10^{-9}K^{-1}$	°C	$\times 10^{-9}K^{-1}$	$\times 10^{-11}K^{-2}$	$\times 10^{-9}K^{-1}$	$\times 10^{-9}K^{-1}$
663	1	4	1899				100			+ 617	
recuit	2	17	1900				(100)			+ 1190	
259	3	17	1902				100	+ 28	- 232	- 65	
617	4	24	1903				100	+ 338	+ 7	+ 341	
617bis	5	37	1905				100	+ 793	+ 16	+ 799	
715	6	44	1905				100	+ 95	- 26	+ 85	
	6bis		1905				100	+ 78	+ 139	+ 134	
423	7	47	1907				100	+ 302	+ 286	+ 416	
1438	8	50	1908				100	- 121	+ 15	- 115	
	8bis	40	1909				100	- 47	+ 29	- 35	
2516	9	39	1911				100	+ 12	+ 21	+ 20	
3082	10	109	1912				100	+ 60	- 3	+ 59	
	10bis		1912				100	- 61	+ 65	- 35	
1523	11	73	1919				100	- 180	+ 205	- 98	
0712	12	61	1924				150	- 581	+ 103	- 540	
0652	13	68	1928	- 688	+ 377	- 537	170	- 511	+ 712	- 226	(1)
								- 366	+ 791	- 50	(2)
0179	14	90	1931	- 758	+ 583	- 525	180	+ 278	+ 148	+ 337	(3)

(1) Les mesures du coefficient de dilatation ont été faites sur des échantillons de 1 m jusqu'en 1928 et sur des échantillons de 24 m après 1935.

(2) Coefficients de dilatation déterminés sur des fils de 24 m de longueur.

(3) La valeur du coefficient de dilatation a été obtenue, avant étuvage, par des mesures sur un échantillon de 1 m de longueur, tandis qu'après étuvage cette valeur est la moyenne obtenue sur 40 fils de 24 m de longueur.

Tableau I (suite)

Coulée	Livraison et Etuvage	Masse de fil étuvé	Date d' étuvage	Coefficient de dilatation avant étuvage			Température maximale d'étuvage	Coefficient de dilatation après étuvage			
				α_0	β	α_{20} [1]		α_0	β	α_{20} [2]	$\Delta\alpha_{20}$ [2]-[1]
		kg		$\times 10^{-9}K^{-1}$	$\times 10^{-11}K^{-2}$	$\times 10^{-9}K^{-1}$	$^{\circ}C$	$\times 10^{-9}K^{-1}$	$\times 10^{-11}K^{-2}$	$\times 10^{-9}K^{-1}$	$\times 10^{-9}K^{-1}$
70037	15	60	1938	- 564	+ 93	- 527	110	- 143	+ 126	- 93	+ 434 (2)
	16	65	1940	- 792	+ 275	- 682	115	- 79	+ 180	- 7	+ 675
68258	17A	80	1943	- 424	+ 518	- 217	115	+ 70	+ 455	+ 252	+ 469
	17B	79	1943	- 249	+ 510	- 45	80	+ 83	+ 456	+ 265	+ 310
68560	18	80	1955	- 850	+ 386	- 696	135	- 168	+ 394	- 10	+ 686
	19	63	1956	- 794	+ 380	- 642	120	- 67	+ 393	+ 90	+ 732
80906	20	132	1957	- 346	+ 341	- 210	76	+ 4	+ 308	+ 127	+ 337
82760	21	100	1958/59	- 359	+ 408	- 196	77	- 266	+ 388	- 111	+ 307
H5784	22	64	1962/63	- 573	+ 98	- 534	95	- 68	+ 100	- 28	+ 506
	ruban	10		- 525	+ 40	- 509		+ 15	+ 35	+ 29	+ 538
78621	23	87	1965	- 255	+ 85	- 221	74	+ 37	+ 87	+ 72	+ 293
	24	55	1967	- 389	+ 89	- 353	85	- 35	+ 86	- 1	+ 352
	ruban	17						+ 28	+ 22	+ 37	
63404	25	75	1970	- 553	+ 230	- 461	96	- 76	+ 211	+ 7	+ 468
	ruban	16		- 692	+ 195	- 614	96	- 4	+ 165	+ 62	+ 676
82056	26A			- 223	- 91	- 259	70	+ 144	- 106	+ 102	+ 361
	(ruban)		1970/71								
	26B	57		- 328	- 62	- 353	70	+ 84	- 73	+ 55	+ 408
	(ruban)										
	26C		1971	- 238	- 57	- 261	70	+ 108	- 81	+ 76	+ 337
	(ruban)										
	26D	62	1971	- 486	- 7	- 489	100	+ 22	- 7	+ 19	+ 508
	26E	61	1971	- 368	- 31	- 381	83	+ 27	- 21	+ 19	+ 400
	27A	101	1972	- 428	+ 6	- 426	98	- 1	0	- 1	+ 425
	27B	100	1972	- 427	+ 4	- 425	98	- 25	0	- 25	+ 400

(2) Coefficients de dilatation déterminés sur des fils de 24 m de longueur.

Tableau I (suite)

Coulée	Livraison et Etuvage	Masse de fil étuvé	Date d' étuvage	Coefficient de dilatation avant étuvage			Température maximale d'étuvage	Coefficient de dilatation après étuvage					
				α_0	β	$\frac{\alpha_{20}}{[1]}$		α_0	β	$\frac{\alpha_{20}}{[2]}$	$\frac{\Delta\alpha_{20}}{[2]-[1]}$		
		kg		$\times 10^{-9}K^{-1}$	$\times 10^{-11}K^{-2}$	$\times 10^{-9}K^{-1}$	$^{\circ}C$	$\times 10^{-9}K^{-1}$	$\times 10^{-11}K^{-2}$	$\times 10^{-9}K^{-1}$	$\times 10^{-9}K^{-1}$		
82056	28	56	1972	- 420	- 16	- 426	100	+ 7	- 2	+ 6	+ 432		
	29A	109	1973	- 576	+ 6	- 574	117	+ 23	+ 22	+ 32	+ 606		
	29B	104	1973	- 497	- 10	- 501	105	+ 20	+ 6	+ 22	+ 523		
	30A	117	1974	- 444	- 26	- 454	95	+ 23	- 20	+ 15	+ 469		
	30B	110	1975	- 333	- 51	- 353	86	+ 44	- 42	+ 27	+ 380		
	31A	103	1975	- 419	- 30	- 431	90	+ 41	- 26	+ 30	+ 461		
	31B	100	1975	- 419	- 39	- 435	85	+ 31	- 30	+ 19	+ 454		
	31C	118	1976	- 338	- 52	- 359	80	+ 76	- 34	+ 63	+ 422		
	FP950	32A	91	1978	- 503	- 82	- 535	120	- 109	- 48	- 128	+ 407	(4)
32B		83	1979	- 508	- 80	- 540	140	- 77	- 33	- 91	+ 449	(4)	
32C		94	1979					150	- 58	- 23	- 67	+ 466	(5)
									- 78	- 24	- 87		(4)
32D		87	1980					150	- 95	- 31	- 108	+ 438	(5)
									- 101	- 22	- 110		(4)
32E		96	1980	- 491	- 83	- 524	150	- 70	- 21	- 79	+ 445	(4)	
32F		95	1980/81	- 481	- 85	- 515	150	- 72	- 27	- 83	+ 432	(4)	
32G		95	1981	- 497	- 78	- 528	150	- 93	- 28	- 104	+ 424	(4)	
32H		82	1981	- 568	- 61	- 592	150						
32I		100	1982	- 547	- 56	- 570	150						
32J	85	1982	- 505	- 77	- 536	150							
32K	103	1983	- 490	- 67	- 517	150							

(4) Valeur moyenne du coefficient de dilatation déterminée sur 3 échantillons de 24 m de longueur (voir Tableau II).

(5) Valeur du coefficient de dilatation déterminée sur 1 échantillon de 24 m de longueur.

Tableau II

Coulée FP950 - Livraison 32
Evolution du coefficient de dilatation du fil d'invar au cours de l'étuvage

Livraison et Etuvage	Numéro de la torche	avant étuvage			Température maximale d'étuvage °C	Après le palier à 150 °C		Après le palier à 100 °C		après étuvage			
		$\underline{\alpha}_0$	$\underline{\beta}$	$\underline{\alpha}_{20}$		$\underline{\alpha}_0$	$\underline{\beta}$	$\underline{\alpha}_0$	$\underline{\beta}$	$\underline{\alpha}_0$	$\underline{\beta}$	$\underline{\alpha}_{20}$	
		$\times 10^{-9}K^{-1}$	$\times 10^{-11}K^{-2}$	$\times 10^{-9}K^{-1}$			$\times 10^{-9}K^{-1}$	$\times 10^{-11}K^{-2}$	$\times 10^{-9}K^{-1}$	$\times 10^{-11}K^{-2}$	$\times 10^{-9}K^{-1}$	$\times 10^{-11}K^{-2}$	$\times 10^{-9}K^{-1}$
32A	1	- 509	- 71	- 537	120					- 111	- 42	- 128	
	2	- 510	- 83	- 542						- 114	- 47	- 133	
	3	- 490	- 91	- 526						- 102	- 55	- 124	
32B	4	- 517	- 76	- 547	140					- 90	- 32	- 103	
	5	- 498	- 83	- 532		- 125	- 36	- 71	- 35	- 54	- 42	- 71	
	6	- 510	- 80	- 542						- 88	- 25	- 98	
32C	7	- 500	- 81	- 533	150	- 101	- 22	- 74	- 7	- 58	- 23	- 67	
	8									- 100	- 23	- 109	
	9									- 75	- 26	- 85	
32D	10				150					- 106	- 8	- 109	
	11									- 102	- 28	- 113	
	12	- 517	- 73	- 546		- 143	- 25	- 108	- 20	- 95	- 31	- 108	
32E	13	- 463	- 78	- 494	154					- 39	- 28	- 50	
	14	- 498	- 105	- 540		- 120	- 43	- 95	- 24	- 86	- 19	- 93	
	15	- 512	- 67	- 539						- 86	- 25	- 95	
32F	16	- 473	- 10	- 513	150	- 124	- 13	- 76	- 22	- 64	- 24	- 74	
	17	- 483	- 82	- 516						- 81	- 21	- 89	
	18	- 486	- 73	- 515						- 70	- 37	- 85	
32G	19	- 535	- 75	- 565	150	- 178	- 23	- 135	- 22	- 125	- 18	- 133	
	20	- 470	- 93	- 508						- 77	- 33	- 90	
	21	- 486	- 65	- 512						- 77	- 32	- 89	

Tableau II (suite)

Livraison et Etuvage	Numéro de la torche	avant étuvage			Température maximale d'étuvage °C	Après le palier à 150 °C		Après le palier à 100 °C		après étuvage			
		$\underline{\alpha}_0$	$\underline{\beta}$	$\underline{\alpha}_{20}$		$\underline{\alpha}_0$	$\underline{\beta}$	$\underline{\alpha}_0$	$\underline{\beta}$	$\underline{\alpha}_0$	$\underline{\beta}$	$\underline{\alpha}_{20}$	
		$\times 10^{-9}K^{-1}$	$\times 10^{-11}K^{-2}$	$\times 10^{-9}K^{-1}$		$\times 10^{-9}K^{-1}$	$\times 10^{-11}K^{-2}$	$\times 10^{-9}K^{-1}$	$\times 10^{-11}K^{-2}$	$\times 10^{-9}K^{-1}$	$\times 10^{-11}K^{-2}$	$\times 10^{-9}K^{-1}$	
32H	22	- 528	- 97	- 566	150								
	23	- 605	- 39	- 621									
	24	- 570	- 48	- 589		- 212	+ 1	- 162	+ 7				
32I	25	- 561	- 45	- 579	150								
	26	- 532	- 69	- 560									
	27	- 549	- 55	- 571		- 167	- 15	- 129	- 10				
32J	28	- 557	- 55	- 579	150								
	29	- 518	- 77	- 549									
	30	- 439	- 99	- 479		- 175	- 1	- 149	+ 17				
32K	31	- 392	- 87	- 427	150								
	32	- 480	- 77	- 510									
	33	- 599	- 36	- 614		- 20	- 43	+ 9	- 28				