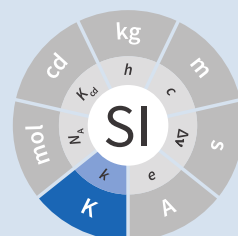


Échelle Internationale de Température De 1990 (EIT-90)

1^{re} édition 1989



Le Système international d'unités (SI)

**Bureau international
des poids et mesures**

Le Système international d'unités (SI)

1^{re} édition 1989

Note concernant les droits d'auteur

Ce document est distribué selon les termes et conditions de la licence Creative Commons Attribution 4.0 International (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), qui permet l'utilisation sans restriction, la distribution et la reproduction sur quelque support que soit, sous réserve de mentionner dûment l'auteur ou les auteurs originaux ainsi que la source de l'œuvre, d'intégrer un lien vers la licence Creative Commons et d'indiquer si des modifications ont été effectuées.

Abstract

Il est à rappeler que la version officielle de l'Échelle, internationale de température de 1990 (EIT-90) est la version française. La version anglaise, publiée pour faciliter la diffusion de l'Échelle, a reçu l'agrément du Comité consultatif de thermométrie et du Comité international des poids et mesures.

L'Échelle internationale de température de 1990 a été adoptée par le Comité international des poids et mesures à sa session de 1989, conformément à l'invitation formulée en 1987 par la 18^e Conférence générale des poids et mesures (Résolution 7). Cette échelle remplace l'Échelle internationale pratique de température de 1968 (édition amendée de 1975) et l'Échelle provisoire de température de 1976 entre 0,5 K et 30 K.

Échelle Internationale de Température De 1990 (EIT-90)

Table des matières

1. Unités de température	7
2. Principe de l'Échelle internationale de température de 1990	8
3. Définition de l'Échelle internationale de température de 1990	9
3.1. De 0,65 K à 5,0 K: les relations entre la pression de vapeur saturante et la température de l'hélium	9
3.2. De 3,0 K au point triple du néon (24,5561 K): le thermomètre à gaz	12
3.3. Du point triple de l'hydrogène en équilibre (13,8033 K) au point de congélation de l'argent (961,78 °C): le thermomètre à résistance de platine	13
3.4. Au-dessus du point de congélation de l'argent (961,78 °C): la loi du rayonnement de Planck	19
4. Renseignements complémentaires et différences par rapport aux échelles précédentes	20
 Annexe 1. ANNEXE	 25

1. Unités de température

L'unité de la grandeur physique de base appelée température thermodynamique, symbole T , est le kelvin, symbole K, défini comme la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Comptes Rendus des Séances de la Treizième Conférence Générale des Poids et Mesures (1967-1968), Résolutions 3 et 4, p. 104.

Compte tenu de la façon dont les échelles de température ont été définies précédemment, il demeure courant d'exprimer une température par sa différence à $273,15\text{ K}$ (point de glace). Une température thermodynamique T , exprimée de cette façon, est appelée température Celsius, symbole t , définie par:

$$t / ^\circ\text{C} = T / \text{K} - 273.15. \quad (1)$$

L'unité de température Celsius est le degré Celsius, symbole $^\circ\text{C}$, qui est par définition égal en grandeur au kelvin. On peut exprimer une différence de température en kelvins ou en degrés Celsius.

L'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90) utilise à la fois la température Kelvin internationale, symbole T_{90} , et la température Celsius internationale, symbole t_{90} . La relation entre T_{90} et t_{90} est la même que celle qui existe entre T et t , c'est-à-dire:

$$t_{90} / ^\circ\text{C} = T_{90} / \text{K} - 273.15. \quad (2)$$

L'unité de la grandeur physique T_{90} est le kelvin, symbole K, et celle de la grandeur physique t_{90} le degré Celsius, symbole $^\circ\text{C}$; ce sont les mêmes unités que pour la température thermodynamique T et la température Celsius t .

2. Principe de l'Échelle internationale de température de 1990

L'EIT-90 concerne les températures comprises entre 0,65 K et la température la plus élevée qu'il soit possible de mesurer à partir de la loi de Planck pour un rayonnement monochromatique.

L'EIT-90 comporte des domaines et des sous-domaines de température et, dans chacun d'eux, il existe une définition de T_{90} . Plusieurs de ces domaines ou sous-domaines se recouvrent et, dans les intervalles de recouvrement, des définitions distinctes coexistent: ces définitions sont équivalentes et aucune n'est prépondérante. Au cours de mesures de la plus haute précision, il peut apparaître des différences numériques perceptibles entre des mesures faites à la même température mais suivant des définitions distinctes. De façon similaire, avec la même définition, à une température autre que celle d'un point fixe de définition, deux très bons instruments d'interpolation (des thermomètres à résistance, par exemple) peuvent donner des valeurs numériques de T_{90} , qui diffèrent de façon perceptible. À peu près dans tous les cas, ces différences sont négligeables et représentent le seuil compatible avec une échelle de complexité raisonnable; pour plus ample information sur ce point, voir « Supplementary Information for the ITS-90 »⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Voir Monographie BIPM/1990.

L'EIT-90 a été conçue de telle façon que, sur toute son étendue et pour toute température, T_{90} soit numériquement aussi proche que possible de T suivant les meilleures estimations effectuées au moment de l'adoption de l'échelle. Par comparaison aux mesures directes de la température thermodynamique, les mesures de T_{90} sont faciles, précises et très reproductibles.

Il existe des différences numériques significatives entre les valeurs de T_{90} et les valeurs correspondantes de T_{68} mesurées dans l'Échelle internationale pratique de température de 1968 (EIP-68): voir figure 1 et tableau 6. De même, il y avait des différences entre l'EIP-68 et l'Échelle internationale pratique de température de 1948 (EIP-48), ainsi qu'entre l'Échelle internationale de température de 1948 (EIT-48) et l'Échelle internationale de température de 1927 (EIT-27): voir l'annexe et, pour plus de détails, « Supplementary Information for the ITS-90 ».

3. Définition de l'Échelle internationale de température de 1990

Entre 0,65 K et 5,0 K, la température T_{90} est définie au moyen des relations entre la pression de vapeur saturante et la température de ^3He et de ^4He .

Entre 3,0 K et le point triple du néon (24,5561 K), la température T_{90} est définie à l'aide du thermomètre à gaz à hélium étalonné à trois températures réalisables expérimentalement et ayant des valeurs numériques assignées (points fixes de définition), en utilisant des formules d'interpolation spécifiées.

Entre le point triple de l'hydrogène en équilibre (13,8033 K) et le point de congélation de l'argent (961,78 °C), la température T_{90} est définie à l'aide du thermomètre à résistance de platine étalonné à des séries spécifiées de points fixes de définition, en utilisant des formules d'interpolation spécifiées.

Au-dessus du point de congélation de l'argent (961,78 °C), la température T_{90} est définie, à partir d'un point fixe de définition, au moyen de la loi du rayonnement de Planck.

Les points fixes de définition de l'EIT-90 sont donnés au tableau 1. Lors de la mise en œuvre des points fixes, il existe un effet de la pression sur la température, pression due à une profondeur d'immersion notable du thermomètre ou à d'autres causes; cet effet est indiqué au tableau 2.

3.1. De 0,65 K à 5,0 K: les relations entre la pression de vapeur saturante et la température de l'hélium

Dans ce domaine, la température T_{90} est définie en fonction de la pression de vapeur saturante p de ^3He ou de ^4He par des relations de la forme:

$$T_{90}/\text{K} = A_0 + \sum_{i=1}^9 A_i [(\ln(p/\text{Pa}) - B)/C]^i. \quad (3)$$

Les valeurs des constantes A_0 , A_i , B et C sont données au tableau 3, dans le domaine de 0,65 K à 3,2 K pour ^3He , dans les domaines de 125 K à 2,1768 K (point λ) et de 2,1768 K à 5,0 K pour ^4He .

Tableau 1. Points fixes de définition de l’EIT-90

Numéro	Température		Corps ^(a)	Type de point ^(b)	$W_t (T_{90})$
	T_{90}/K	$t_{90}/\text{°C}$			
1	de 3 à 5	de -270,15 à -268,15	He	V	
2	13,8033	-259,3467	e-H ₂	T	0,001 190 07
3	≈ 17	$\approx -256,15$	e-H ₂ (ou He)	V (ou G)	
4	$\approx 20,3$	$\approx -252,85$	e-H ₂ (ou He)	V (ou G)	
5	24,5561	-248,5939	Ne	T	0,008 449 74
6	54,3584	-218,7916	O ₂	T	0,091 718 04
7	83,8058	-189,3442	Ar	T	0,215 859 75
8	234,3156	-38,8344	Hg	T	0,844 142 11
9	273,16	0,01	H ₂ O	T	1,000 000 00
10	302,9146	29,7646	Ga	M	1,118 138 89
11	429,7485	156,5985	In	F	1,609 801 85
12	505,078	231,928	Sn	F	1,892 797 68
13	692,677	419,527	Zn	F	2,568 917 30
14	933,473	660,323	Al	F	3,376 008 60
15	1234,93	961,78	Ag	F	4,286 420 53
16	1337,33	1064,18	Au	F	
17	1357,77	1084,62	Cu	F	

(a) composition isotopique naturelle, à l’exception de ³He; e-H₂: hydrogène à la composition d’équilibre des variétés moléculaires ortho et para.

(b) Pour les conseils de réalisation, voir « Supplementary Information for the ITS-90 »; V: pression de vapeur saturante; T: point triple (température d’équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur); G: thermomètre à gaz; C, F: point de congélation, point de fusion (température d’équilibre, à la pression de 101 325 Pa, entre les phases solide et liquide).

Tableau 2. Effet de la pression sur la température de certains points fixes de définition¹

1

La pression de référence pour les points de fusion ou de congélation est la pression atmosphérique normale ($p_0 = 101\,325\text{ Pa}$). Dans le cas des points triples (T) l'effet de la pression résulte uniquement de la pression hydrostatique supplémentaire qui est fonction de la profondeur dans le liquide. (1)

Corps	Valeur attribuée à la température d'équilibre T_{90}/K	Variation de la température	
		avec la pression p	avec la profondeur d'immersion h
		$(dT/dp)/(10^{-8}\text{ K} \cdot \text{Pa}^{-1})^{(a)}$	$(dT/dh)/(10^{-3}\text{ K} \cdot \text{m}^{-1})^{(b)}$
e-H ₂ (T)	13,8033	34	0,25
Ne (T)	24,5561	16	1,9
O ₂ (T)	54,3584	12	1,5
Ar (T)	83,8058	25	3,3
Hg (T)	234,3156	5,4	7,1
H ₂ O (T)	273,16	-7,5	-0,73
Ga	302,9146	-2,0	1,2
In	429,7485	4,9	3,3
Sn	505,078	3,3	2,2
Zn	692,677	4,3	2,7
Al	933,473	7,0	1,6
Ag	1234,93	6,0	5,4
Au	1337,33	6,1	10
Cu	1357,77	3,3	2,6

(a) Équivalent à des millikelvins par atmosphère.

(b) Équivalent à des millikelvins par mètre de liquide.

Tableau 3. Pression de vapeur saturante de l'hélium. Valeurs des constantes des relations équation (3) suivant le domaine de température considéré

	³ He de 0,65 K à 3,2 K	⁴ He de 1,25 K à 2,1768 K	⁴ He de 2,1768 K à 50 K
A_0	1,053 447	1,392 408	3,146 631
A_1	0,980 106	0,527 153	1,357 655
A_2	0,676 380	0,166 756	0,413 923
A_3	0,372 692	0,050 988	0,091 159
A_4	0,151 656	0,026 514	0,016 349

¹ La pression de référence pour les points de fusion ou de congélation est la pression atmosphérique normale ($p_0 = 101\,325\text{ Pa}$). Dans le cas des points triples (T) l'effet de la pression résulte uniquement de la pression hydrostatique supplémentaire qui est fonction de la profondeur dans le liquide.

	³ He de 0,65 K à 3,2 K	⁴ He de 1,25 K à 2,1768 K	⁴ He de 2,1768 K à 50 K
A ₅	-0,002 263	0,001 975	0,001 826
A ₆	0,006 596	-0,017 976	-0,004 325
A ₇	0,088 966	0,005 409	-0,004 973
A ₈	-0,004 770	0,013 259	0
A ₉	-0,054 943	0	0
B	7,3	5,6	10,3
C	4,3	2,9	1,9

3.2. De 3,0 K au point triple du néon (24,5561 K): le thermomètre à gaz

Dans ce domaine, la température T_{90} est définie par l'intermédiaire du thermomètre à gaz à ³He ou à ⁴He, du type à volume constant, étalonné à trois températures: celle du point triple du néon (24,5561 K), celle du point triple de l'hydrogène en équilibre (13,8033 K) et une température comprise entre 3,0 K et 5,0 K; cette dernière est déterminée avec un thermomètre à pression de vapeur saturante de ³He ou de ⁴He comme cela est spécifié au section 3.1.

3.2.1. De 4,2 K au point triple du néon (24,5561 K) avec ⁴He comme gaz thermométrique

Dans ce domaine, la température T_{90} est définie par la relation:

$$T_{90} = a + bp + cp^2 \quad (4)$$

où p est la pression dans le thermomètre; où a , b et c sont des coefficients dont la valeur numérique est obtenue par des mesures réalisées aux trois points fixes de définition indiqués au section 3.2. avec toutefois une restriction: que la température du point le plus bas soit comprise entre 4,2 K et 5,0 K.

3.2.2. De 3,0 K au point triple du néon (24,5561 K) avec ³He ou ⁴He comme gaz thermométrique

Pour le thermomètre à gaz à ³He et pour le thermomètre à gaz à ⁴He utilisé au-dessous de 4,2 K, il faut tenir compte explicitement du fait qu'il ne s'agit pas d'un gaz parfait et utiliser le second coefficient du viriel approprié $B_3(T_{90})$ ou $B_4(T_{90})$. Dans ce domaine, la température T_{90} est définie par la relation:

$$T_{90} = \frac{a + bp + cp^2}{1 + B_x(T_{90})N/V}, \quad (5)$$

où p est la pression dans le thermomètre; où a , b et c sont des coefficients dont la valeur numérique est obtenue par des mesures réalisées aux trois points fixes de définition indiqués au section 3.2; où N est la quantité de matière du gaz contenu dans le réservoir du thermomètre de volume V ; et où $B_x(T_{90})$, avec x égal à 3 ou à 4 suivant l'isotope considéré, est le second coefficient du viriel dont les valeurs sont données par les relations:

pour ³He,

$$B_3(T_{90})/\text{m}^3\text{mol}^{-1} = \{16.69 - 336.98(T_{90}/\text{K})^{-1} + 91.04(T_{90}/\text{K})^{-2} - 13.82(T_{90}/\text{K})^{-3}\}10^{-6}. \quad (6a)$$

pour ^4He ,

$$B_4(T_{90})/\text{m}^3\text{mol}^{-1} = \{16.708 - 374.05(T_{90}/\text{K})^{-1} - 383.53(T_{90}/\text{K})^{-2} - 1799.2(T_{90}/\text{K})^{-3} - 4033.2(T_{90}/\text{K})^{-4} - 3252.8(T_{90}/\text{K})^{-5}\}10^{-6}. \quad (6b)$$

L'exactitude avec laquelle l'EIT-90 peut être réalisée en se servant des relations équation (4) ou équation (5) dépend de la conception du thermomètre et de la quantité de matière volumique du gaz considérée. Les critères de conception et les précautions d'usage nécessaires pour obtenir une exactitude déterminée sont donnés dans « Supplementary Information for the ITS-90 ».

3.3. Du point triple de l'hydrogène en équilibre (13,8033 K) au point de congélation de l'argent (961,78 °C): le thermomètre à résistance de platine

Dans ce domaine, la température T_{90} est définie au moyen du thermomètre à résistance de platine; ce dernier est étalonné à différentes séries spécifiées de points fixes de définition, en utilisant des fonctions de référence et des fonctions écarts spécifiées pour interpoler aux températures intermédiaires.

Aucun thermomètre à résistance de platine ne peut ni assurer une exactitude élevée ni même être utilisé sur l'ensemble du domaine allant de 13,8033 K à 961,78 °C. Le choix d'un ou de plusieurs domaines de température parmi ceux énumérés ci-après est normalement limité par le type de construction du thermomètre.

Pour les détails et les précautions d'usage concernant les thermomètres: types disponibles, domaines d'utilisation possibles, exactitudes probables, résistance de fuite admissible, valeurs de la résistance, traitement thermique, etc., voir « Supplementary Information for the ITS-90 ». En particulier, il est important de respecter les traitements thermiques appropriés, à appliquer chaque fois qu'un thermomètre à résistance de platine est soumis à des températures supérieures à 420 °C environ.

Les températures sont déterminées en fonction du rapport $W(T_{90})$ entre la résistance $R(T_{90})$ du thermomètre à la température T_{90} et sa résistance $R(273,16\text{ K})$ au point triple de l'eau⁽¹⁾, soit:

$$W(T_{90}) = R(T_{90})/R(273,16\text{ K}). \quad (7)$$

Un bon thermomètre à résistance de platine doit être fait de platine pur exempt de toute contrainte et il doit satisfaire à l'une au moins des deux relations suivantes:

$$W(29.7646\text{ °C}) \geq 1.11807, \quad (8a)$$

$$W(-38.8344\text{ °C}) \leq 0.844235, \quad (8b)$$

Pour pouvoir être utilisé jusqu'au point de congélation de l'argent, il doit aussi satisfaire à la relation:

$$W(961.78\text{ °C}) \geq 4.2844. \quad (8c)$$

⁽¹⁾ Cette définition de $W(T_{90})$ diffère de la définition similaire utilisée dans l'EIT-27, l'EIT-48, l'EIPT-48 et l'EIPT-68: $W(T)$ était alors défini en fonction de la température de référence 0 °C qui, depuis 1954, était elle-même définie comme étant 273,15 K.

Dans chacun des domaines énumérés ci-après, la température T_{90} est obtenue à partir de $W_r(T_{90})$, en utilisant la fonction de référence donnée par la équation (9b) ou équation (10b) suivant le cas, et de l'écart $W(T_{90}) - W_r(T_{90})$. Aux points fixes de définition, cet écart est connu directement à partir de l'étalonnage du thermomètre; aux températures intermédiaires, il est obtenu au moyen de la fonction écart appropriée [équation (12), équation (13) ou équation (14)].

1. Dans le domaine allant de 13,8033 K à 273,16 K, la fonction de référence est donnée par la relation:

$$\ln[W_r(T_{90})] = A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \left[\frac{\ln(T_{90}/273.16 \text{ K}) + 1.5}{1.5} \right]^i. \quad (9a)$$

La relation équation (9a) est équivalente, à mieux que 0,1 mK près, à la relation inverse:

$$T_{90}/273.16 \text{ K} = B_0 + \sum_{i=1}^{15} B_i \left[\frac{W_r(T_{90})^{1/6} - 0.65}{0.35} \right]^i. \quad (9b)$$

Les valeurs des constantes A_0 , A_i , B_0 et B_i sont données au tableau 4.

Un thermomètre peut être étalonné pour travailler dans tout ce domaine ou, en utilisant progressivement un nombre moindre de points fixes, dans les sous-domaines allant de 24,5561 K à 273,16 K, de 54,3584 K à 273,16 K ou de 83,8058 K à 273,16 K.

2. Dans le domaine allant de 0 °C à 961,78 °C, la fonction de référence est donnée par la relation:

$$W_r(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \left(\frac{T_{90}/\text{K} - 754.15}{481} \right)^i \quad (10a)$$

La équation (10a) est équivalente, à mieux que 0,13 mK près, à la relation inverse:

$$T_{90}/\text{K} - 273.15 = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left(\frac{W_r(T_{90}) - 2.64}{1.64} \right)^i. \quad (10b)$$

Tableau 4. Thermomètre à résistance de platine. Valeurs des constantes A_0 , A_i , B_0 , B_i , C_0 , C_i , D_0 et D_i des relations de référence équation (9a), équation (9b), équation (10a) et équation (10b)

A_0	-2,135 347 29	B_0	0,183 324 722
A_1	3,183 247 20	B_1	0,240 975 303
A_2	-1,801 435 97	B_2	0,209 108 771
A_3	0,717 272 04	B_3	0,190 439 972
A_4	0,503 440 27	B_4	0,142 648 498
A_5	-0,618 993 95	B_5	0,077 993 465
A_6	-0,053 323 22	B_6	0,012 475 611
A_7	0,280 213 62	B_7	-0,032 267 127
A_8	0,107 182 24	B_8	-0,075 291 522
A_9	-0,293 028 65	B_9	-0,056 470 670
A_{10}	0,044 598 72	B_{10}	0,076 201 285

A_{11}	0,118 686 32	B_{11}	0,123 893 204
A_{12}	-0,052 481 34	B_{12}	-0,029 201 193
		B_{13}	-0,091 173 542
		B_{14}	0,001 317 696
		B_{15}	0,026 025 526
C_0	2,781 572 54	D_0	439,932 854
C_1	1,646 509 16	D_1	472,418 020
C_2	-0,137 143 90	D_2	37,684 494
C_3	-0,006 497 67	D_3	7,472 018
C_4	-0,002 344 44	D_4	2,920 828
C_5	0,005 118 68	D_5	0,005 184
C_6	0,001 879 82	D_6	-0,963 864
C_7	-0,002 044 72	D_7	-0,188 732
C_8	-0,000 461 22	D_8	0,191 203
C_9	0,000 457 24	D_9	0,049 025

Les valeurs des constantes C_0 , C_i , D_0 , et D_i , sont données au tableau 4.

Un thermomètre peut être étalonné pour travailler dans tout ce domaine ou, en utilisant progressivement un nombre moindre de points fixes, dans les sous-domaines allant de 0 °C à 660,323 °C, de 0 °C à 419,527 °C, de 0 °C à 231,928 °C, de 0 °C à 156,5985 °C ou de 0 °C à 29,7646 °C.

- Un thermomètre peut être étalonné pour travailler dans le domaine allant de 234,3156 K (−38,8344 °C) à 29,7646 °C, en s'appuyant sur les points fixes à ces températures et sur le point triple de l'eau. Les deux fonctions de référence, données par les équation (9a)-équation (9b) et équation (10a)-équation (10b), sont nécessaires pour couvrir ce domaine.

Les points fixes de définition et les fonctions écarts pour les différents domaines sont donnés ci-après et, sous forme résumée, au tableau 5.

Tableau 5. Thermomètre à résistance de platine. Fonctions écarts et points d'étalonnage suivant le domaine de température considéré

(a) Domaines ayant leur limite supérieure à 273,16 K

Paragraphe	Limite inférieure	Fonction écart	Points d'étalonnage ^(a)
Section 3.3.1	13,8033 K	$a[W(T_{90})-1] + b[W(T_{90})-1]^2 + \sum_{i=1}^5 c_i [\ln W(T_{90})]^i$, $n=2$	2 à 9
Section 3.3.1.1	24,5561 K	comme pour section 3.3.1 avec $c_4 = c_5 = 0$ and $n=0$	2, 5 à 9
Section 3.3.1.2	54,3584 K	comme pour section 3.3.1 avec $c_2 = c_3 = c_4 = c_5 = 0$ and $n=1$	6 à 9
Section 3.3.1.3	83,8058 K	$a[W(T_{90})-1] + b[W(T_{90})-1] \ln W(T_{90})$	7 à 9

(b) Domaines ayant leur limite inférieure à 0 °C

Paragraphe	Limite supérieure	Fonction écart	Points d'étalonnage ^(a)
Section 3.3.2 ^(b)	961,78 °C	$a[W(T_{90})-1] + b[W(T_{90})-1]^2 + c[W(T_{90})-1]^3 + d[W(T_{90}) - W(660,323\text{ °C})]^2$	9, 12 à 15
Section 3.3.2.1	660,323 °C	comme pour section 3.3.2 avec $d=0$	9, 12 à 14
Section 3.3.2.2	419,527 °C	comme pour section 3.3.2 avec $c=d=0$	9, 12, 13
Section 3.3.2.3	231,928 °C	comme pour section 3.3.2 avec $c=d=0$	9, 11, 12
Section 3.3.2.4	156,5985 °C	comme pour section 3.3.2 avec $b=c=d=0$	9, 11
Section 3.3.2.5	29,7646 °C	comme pour section 3.3.2 avec $b=c=d=0$	9, 10

(c) Domaine de 234,3156 K (−38,8344 °C) à 29,7646 °C

Section 3.3.3	comme pour section 3.3.2 avec $c=d=0$	8 à 10
---------------	---------------------------------------	--------

(a) Les points sont repérés ici par leur numéro d'ordre dans le tableau 1.

(b) Points d'étalonnage 9, 12 à 14, avec $d=0$, pour $t_{90} \leq 660,323\text{ °C}$; les valeurs de a , b et c ainsi obtenues sont conservées pour $t_{90} \geq 660,323\text{ °C}$, avec d déterminé par étalonnage au point 15.

3.3.1. Du point triple de l'hydrogène en équilibre (13,8033 K) au point triple de l'eau (273,16 K)

Le thermomètre est étalonné aux points triples de l'hydrogène en équilibre (13,8033 K), du néon (24,5561 K), de l'oxygène (54,3584 K), de l'argon (83,8058 K), du mercure (234,3156 K) et de l'eau (273,16 K), ainsi qu'à deux températures complémentaires proches¹⁾ de 17,0 K et de 20,3 K. Ces dernières peuvent être déterminées de deux façons différentes: soit en utilisant un thermomètre à gaz (*voir* section 3.2, voir p. 12) et, dans ce cas, les deux températures doivent être comprises entre 16,9 K et 17,1 K et entre 20,2 K et 204 K respectivement; soit en utilisant la relation entre la pression de vapeur saturante et la température de l'hydrogène en équilibre et, dans ce cas, les deux températures doivent être comprises entre 17,025 K et 17,045 K et entre 20,26 K et 20,28 K respectivement, les valeurs précises étant déterminées à partir des équation (11a) et équation (11b):

$$T_{90}/\text{K} - 17.035 = (p/\text{kPa} - 33.3213)/13.32, \quad (11a)$$

$$T_{90}/\text{K} - 20.27 = (p/\text{kPa} - 101.292)/30. \quad (11b)$$

La fonction écart⁽¹⁾ est donnée par la relation:

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + \sum_{i=1}^5 c_i [\ln W(T_{90})]^{i+n}, \quad (12)$$

les valeurs des facteurs a , b et c_i , étant obtenues par des mesures aux points fixes de définition, avec $n = 2$.

Pour ce domaine et pour les sous-domaines section 3.3.1.1 à section 3.3.1.3, les valeurs de $W_r(T_{90})$ sont données par la équation (9a) ou au tableau 1.

⁽¹⁾ Cette fonction écart [de même que celles données par les équation (13) et équation (14) peut être exprimée en fonction de W , au lieu de W ; pour cela, voir « Supplementary Information for the ITS-90 ».

3.3.1.1. Du point triple du néon (24,5561 K) au point triple de l'eau (273,16 K)

Le thermomètre est étalonné aux points triples de l'hydrogène en équilibre (13,8033 K), du néon (24,5561 K), de l'oxygène (54,3584 K), de l'argon (83,8058 K), du mercure (234,3156 K) et de l'eau (273,16 K).

La fonction écart est donnée par la équation (12), les valeurs des facteurs a , b , c_1 , c_2 et c_3 , étant obtenues par des mesures aux points fixes de définition, avec $c_4 = c_5 = 0$ et $n = 0$.

3.3.1.2. Du point triple de l'oxygène (54,3584 K) au point triple de l'eau (273,16 K)

Le thermomètre est étalonné aux points triples de l'oxygène (54,3584 K), de l'argon (83,8058 K), du mercure (234,3156 K) et de l'eau (273,16 K).

La fonction écart est donnée par la équation (12), les valeurs des facteurs a , b et c_1 étant obtenues par des mesures aux points fixes de définition, avec $c_2 = c_3 = c_4 = c_5 = 0$ et $n = 1$.

3.3.1.3. Du point triple de l'argon (83,8058 K) au point triple de l'eau (273,16 K)

Le thermomètre est étalonné aux points triples de l'argon (83,8058 K), du mercure (234,3156 K) et de l'eau (273,16 K).

La fonction écart est donnée par la relation:

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1] \ln W(T_{90}) \quad (13)$$

les valeurs des facteurs a et b étant obtenues par des mesures aux points fixes de définition.

3.3.2. De 0 °C au point de congélation de l'argent (961,78 °C)

Le thermomètre est étalonné au point triple de l'eau (0,01 °C) et aux points de congélation de l'étain (231,928 °C), du zinc (419,527 °C), de l'aluminium (660,323 °C) et de l'argent (961,78 °C).

La fonction écart est donnée par la relation:

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + c[W(T_{90}) - 1]^3 + d[W(T_{90}) - W(660,323 \text{ °C})]^2 \quad (14)$$

Pour les températures au-dessous du point de congélation de l'aluminium, $d = 0$ et les valeurs des facteurs a , b et c sont obtenues par la mesure des écarts à $W_r(T_{90})$ aux points de congélation de l'étain, du zinc et de l'aluminium. Pour celles au-dessus du point de congélation de l'aluminium, la valeur de d est déterminée par la mesure de l'écart à $W_r(T_{90})$ au point de congélation de l'argent en conservant les valeurs ci-dessus de a , b et c ,

Pour ce domaine et pour les sous-domaines de section 3.3.2.1 à section 3.3.2.5, les valeurs de $W_r(T_{90})$ sont données par la équation (10a) ou au tableau 1.

3.3.2.1. De 0 °C au point de congélation de l'aluminium (660,323 °C)

Le thermomètre est étalonné au point triple de l'eau (0,01 °C) et aux points de congélation de l'étain (231,928 °C), du zinc (419,527 °C) et de l'aluminium (660,323 °C).

La fonction écart est donnée par la équation (14), les valeurs des facteurs a , b et c étant obtenues par des mesures aux points fixes de définition, avec $d = 0$.

3.3.2.2. De 0 °C au point de congélation du zinc (419,527 °C)

Le thermomètre est étalonné au point triple de l'eau (0,01 °C) et aux points de congélation de l'étain (231,928 °C) et du zinc (419,527 °C).

La fonction écart est donnée par la équation (14), les valeurs des facteurs a et b étant obtenues par des mesures aux points fixes de définition, avec $c = d = 0$.

3.3.2.3. De 0 °C au point de congélation de l'étain (231,928 °C)

Le thermomètre est étalonné au point triple de l'eau (0,01 °C) et aux points de congélation de l'indium (156,5985 °C) et de l'étain (231,928 °C).

La fonction écart est donnée par la équation (14), les valeurs des facteurs a et b étant obtenues par des mesures aux points fixes de définition, avec $c = d = 0$.

3.3.2.4. De 0 °C au point de congélation de l'indium (156,5985 °C)

Le thermomètre est étalonné au point triple de l'eau (0,01 °C) et au point de congélation de l'indium (156,5985 °C).

La fonction écart est donnée par la équation (14), la valeur du facteur a étant obtenue par des mesures aux points fixes de définition, avec $b = c = d = 0$.

3.3.2.5. De 0 °C au point de fusion du gallium (29,7646 °C)

Le thermomètre est étalonné au point triple de l'eau (0,01 °C) et au point de fusion du gallium (29,7646 °C).

La fonction écart est donnée par la équation (14), la valeur du facteur a étant obtenue par des mesures aux points fixes de définition, avec $b = c = d = 0$.

3.3.3. Du point triple du mercure (−38,8344 °C) au point de fusion du gallium (29,7646 °C)

Le thermomètre est étalonné aux points triples du mercure (−38,8344 °C) et de l'eau (0,01 °C) et au point de fusion du gallium (29,7646 °C).

La fonction écart est donnée par la équation (14), les valeurs des facteurs a et b étant obtenues par des mesures aux points fixes de définition, avec $c = d = 0$.

Les valeurs de $W_r(T_{90})$ sont données par la équation (9a) pour la température au-dessous de 273,16 K et par la équation (10a) pour celle au-dessus de 273,16 K, où au tableau 1.

3.4. Au-dessus du point de congélation de l'argent (961,78 °C): la loi du rayonnement de Planck

Au-dessus du point de congélation de l'argent (961,78 °C), la température T_{90} est définie par la relation:

$$\frac{L_\lambda(T_{90})}{L_\lambda[T_{90}(X)]} = \frac{\exp(c_2[\lambda T_{90}(X)]^{-1}) - 1}{\exp(c_2[\lambda T_{90}]^{-1}) - 1} \quad (15)$$

$T_{90}(X)$ est la température du point de congélation de l'argent [$T_{90}(\text{Ag}) = 1234,93 \text{ K}$], ou de l'or [$T_{90}(\text{Au}) = 1337,33 \text{ K}$], ou encore du cuivre [$T_{90}(\text{Cu}) = 1357,77 \text{ K}$]; $L_\lambda(T_{90})$ et $L_\lambda[T_{90}(X)]$ sont les densités spectrales de la luminance énergétique du corps noir à la longueur d'onde (dans le vide) λ , à T_{90} et à $T_{90}(X)$ respectivement⁽¹⁾; $c_2 = 0,014\,388 \text{ m} \cdot \text{K}$.

Pour plus de détails et pour les précautions d'usage dans ce domaine, voir « Supplementary Information for the ITS-90 ».

⁽¹⁾ Les valeurs T_{90} des points de congélation de l'argent, de l'or et du cuivre sont suffisamment concordantes pour que le remplacement de l'un des points par l'un des deux autres comme température de référence $T_{90}(X)$ n'entraîne pas de différence significative entre les valeurs mesurées de la température T_{90} .

4. Renseignements complémentaires et différences par rapport aux échelles précédentes

Les appareils, les méthodes et les modes opératoires utiles pour réaliser l'échelle sont décrits dans « Supplementary Information for the ITS-90 ». Ce document fait aussi état des précédentes échelles internationales de température et donne les différences numériques entre échelles successives. Par ailleurs, des réalisations pratiques approchées de l'EIT-90 sont décrites dans « Techniques for Approximating the ITS-90 ».⁽¹⁾

⁽¹⁾ Voir Monographie BIPM/1990.

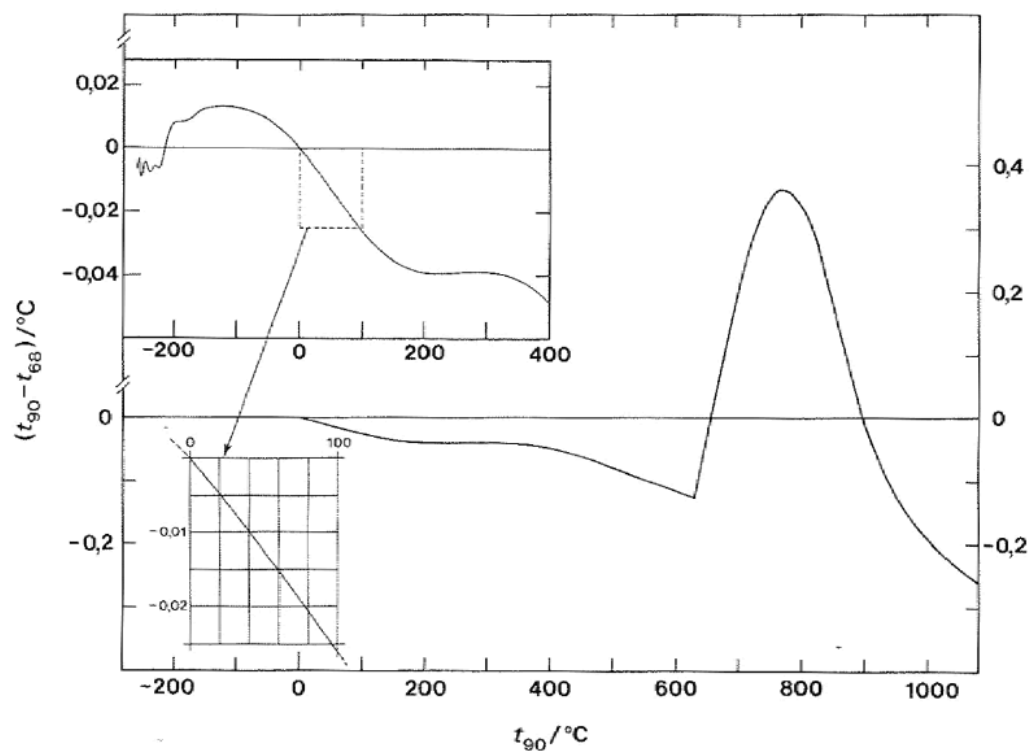


Figure 1 — Différence entre l'EIT-90 et l'EIPT-68.

Tableau 6. Différences entre l'EIT-90 et l'EIPT-68 et entre l'EIT-90 et l'EPT-76 en fonction de T_{90} ou de t_{90}

$(T_{90} - T_{76}) / \text{mK}$										
T_{90} / K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0						-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5
10	-0,6	-0,7	-0,8	-1,0	-1,1	-1,3	-1,4	-1,6	-1,8	-2,0
20	-2,2	-2,5	-2,7	-3,0	-3,2	-3,5	-3,8	-4,1		

$(T_{90} - T_{76})/\text{mK}$
 $(T_{90} - T_{68})/\text{K}$

T_{90}/K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10					-0,006	-0,003	-0,004	-0,006	-0,008	-0,009
20	-0,009	-0,008	-0,007	-0,007	-0,006	-0,005	-0,004	-0,004	-0,005	-0,006
30	-0,006	-0,007	-0,008	-0,008	-0,008	-0,007	-0,007	-0,007	-0,006	-0,006
40	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	-0,006	-0,007	-0,007	-0,007	-6	-0,006
50	-0,006	-0,005	-0,005	-0,004	-0,003	-0,002	-0,001	0,000	0,001	0,002
60	0,003	0,003	0,004	0,004	0,005	0,005	0,006	0,006	0,007	0,007
70	0,007	-0,007	0,007	0,007	0,007	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
80	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
90	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,009	0,009	0,009
T_{90}/K	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
100	0,009	0,011	0,013	0,014	0,014	0,014	0,014	0,013	0,012	0,012
200	0,011	0,010	0,009	0,008	0,007	0,005	0,003	0,001		

 $(t_{90} - t_{68})/\text{°C}$

$t_{90}/\text{°C}$	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90
-100	0,013	0,013	0,014	0,014	0,014	0,013	0,012	0,010	0,008	0,008
0	0,000	0,002	0,004	0,006	0,008	0,009	0,010	0,011	0,012	0,012
$t_{90}/\text{°C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0,000	-0,002	-0,005	-0,007	-0,010	-0,015	-0,016	-0,018	-0,0021	-0,024
100	-0,026	-0,028	-0,030	-0,032	-0,034	-0,036	-0,037	-0,038	-0,039	-0,039
200	-0,040	-0,040	-0,040	-0,040	-0,040	-0,040	-0,040	-0,039	-0,039	-0,039
300	-0,039	-0,039	-0,039	-0,040	-0,040	-0,041	-0,042	-0,043	-0,045	-0,046
400	-0,048	-0,051	-0,053	-0,056	-0,059	-0,062	-0,065	-0,068	-0,072	-0,075

$(T_{90} - T_{76})/\text{mK}$										
500	-0,079	-0,083	-0,087	-0,090	-0,094	-0,098	-0,101	-0,105	-0,108	-0,112
600	-0,115	-0,118	-0,122	-0,125 ^(a)	-0,08	-0,03	0,02	0,06	0,11	0,16
700	0,20	0,24	0,28	0,31	0,33	0,35	0,36	0,36	0,36	0,35
800	0,34	0,32	0,29	0,23	0,22	0,18	0,14	0,10	0,06	0,03
900	-0,01	-0,03	-0,06	-0,08	-0,10	-0,12	-0,14	-0,16	-0,17	-0,18
1000	-0,19	-0,20	-0,21	-0,22	-0,23	-0,24	-0,25	-0,25	-0,26	-0,26
$t_{90}/^{\circ}\text{C}$	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
1000		-0,26	-0,30	-0,35	-6,39	-0,44	-0,49	-0,54	-0,60	-0,66
2000	-0,72	-0,79	-0,85	-0,93	-1,00	-1,07	-1,15	-1,24	-1,32	-1,41
3000	-1,50	-1,59	-1,69	1,78	-1,89	-1,99	-2,10	-2,21	-2,32	-2,43

(a) A $t_{90} = 630,6^{\circ}\text{C}$, la dérivée première de $(t_{90} - t_{68})$ présente une discontinuité et $(t_{90} - t_{68}) = -0,125^{\circ}\text{C}$

Ces deux documents ont été établis par le Comité consultatif de thermométrie et sont publiés par le Bureau international des poids et mesures (BIPM); ils seront révisés et remis à jour périodiquement.

Les différences $T_{90} - T_{68}$ sont indiquées à la figure 1 et dans le tableau 6. Le nombre des chiffres significatifs donnés dans le tableau permet de lisser les interpolations; toutefois, la reproductibilité de l'EIPT-68 est, dans beaucoup de domaines, nettement moins bonne que ne le laisserait supposer ce nombre.

Annexe 1. ANNEXE

A1.1. Échelle internationale de température de 1927 (EIT-27)

L'Échelle internationale de température de 1927 a été adoptée par la 7^e Conférence générale des poids et mesures, pour surmonter les difficultés pratiques de la détermination directe des températures thermodynamiques à l'aide du thermomètre à gaz et pour remplacer sous une forme qui soit universellement acceptable les différentes échelles nationales de température existantes. L'EIT-27 a été établie afin de permettre des mesures de température précises et reproductibles, aussi proches que possible de la température thermodynamique telle qu'on pouvait la déterminer à l'époque. Entre le point d'ébullition de l'oxygène et le point de congélation de l'or, elle s'appuyait sur un certain nombre de températures reproductibles (points fixes), auxquelles on avait assigné des valeurs numériques, et sur deux instruments d'interpolation normalisés. Chacun de ces instruments était étalonné à un ou plusieurs des points fixes, ce qui fournissait les valeurs des constantes des formules d'interpolation dans le domaine de température considéré. Le thermomètre à résistance de platine était utilisé dans le domaine inférieur et le thermocouple platine/platine rhodié au-dessus de 660 °C. Dans le domaine au-dessus du point de congélation de l'or, la température était définie suivant la loi du rayonnement de Wien; en pratique, cela conduisait invariablement à choisir un pyromètre optique comme instrument de travail.

A1.2. Échelle internationale de température de 1948 (EIT-48)

L'Échelle internationale de température de 1948 a été adoptée par la 9^e Conférence générale. Par rapport à l'EIT-27, elle présentait les changements suivants: la limite inférieure du domaine du thermomètre à résistance de platine était ramenée de -190 °C à la température du point d'ébullition de l'oxygène ($-182,97\text{ °C}$) et la jonction du domaine du thermomètre à résistance de platine à celui du thermocouple s'effectuait à la température de congélation de l'antimoine (630 °C environ) au lieu de 660 °C : la valeur de la température du point de congélation de l'argent passait de $960,5\text{ °C}$ à $960,8\text{ °C}$; pour l'or, le point de congélation remplaçait le point de fusion (1063 °C); la loi du rayonnement de Planck était substituée à la loi de Wien; la valeur assignée à la seconde constante du rayonnement devenait $0,014\,38\text{ m} \cdot \text{K}$ au lieu de $0,014\,32\text{ m} \cdot \text{K}$; les marges de tolérance pour les constantes des formules d'interpolation utilisées avec le thermomètre à résistance normalisé et avec le thermocouple normalisé étaient modifiées, la limitation concernant λT pour la pyrométrie optique ($\lambda T \leq 3 \cdot 10^{-3}\text{ m} \cdot \text{K}$) était remplacée par l'obligation d'utiliser un rayonnement « visible ».

A1.3. Échelle internationale pratique de température de 1948 (EIP-48), édition amendée de 1960

L'Échelle internationale pratique de température de 1948, édition amendée de 1960, a été adoptée par la 11^e Conférence générale, la 10^e Conférence générale avait, auparavant, adopté

le point triple de l'eau comme point unique définissant le kelvin, unité de température thermodynamique. En plus de l'introduction de l'adjectif « pratique », les modifications apportées à l'EIT-48 étaient les suivantes: le point triple de l'eau, défini comme étant 0,01 °C, remplaçait le point de fusion de la glace comme point d'étalonnage; le point de congélation du zinc (valeur assignée: 419,505 °C) pouvait avantageusement remplacer le point d'ébullition du soufre (444,6 °C) comme point d'étalonnage; les marges de tolérance pour les constantes des formules d'interpolation utilisées avec le thermomètre à résistance normalisé et le thermocouple normalisé étaient à nouveau modifiées; la restriction au rayonnement « visible » pour la pyrométrie optique était supprimée.

Les valeurs numériques des températures étant les mêmes dans l'EIT-48 et l'EIPT-48, cette dernière n'était pas une révision de l'échelle de 1948 mais seulement une forme amendée.

A1.4. Échelle internationale pratique de température de 1968 (EIPT-68)

En 1968, le Comité international des poids et mesures a promulgué l'Échelle internationale pratique de température de 1968, les pouvoirs nécessaires lui ayant été donnés par la 13^e Conférence générale en 1967- 1968. L'EIPT-68 comportait, par rapport à l'EIPT-48, de nombreuses et importantes modifications, en particulier des changements de valeurs numériques pour rendre T_{68} plus proche de la température thermodynamique; dans l'EIPT-48, on s'en écartait en effet de façon suffisamment importante pour que cela soit sensible à de nombreux utilisateurs. Les autres changements étaient les suivants: la limite inférieure de l'échelle était abaissée à 13,81 K: à des températures plus basses encore (de 0,5 K à 5,2 K) on recommandait l'emploi de deux échelles utilisant la pression de vapeur saturante de l'hélium: six nouveaux points fixes de définition étaient introduits: le point triple de l'hydrogène en équilibre (13,81 K), un point d'ébullition sous pression réduite de l'hydrogène en équilibre (17,042 K), le point d'ébullition normale de l'hydrogène en équilibre (20,28 K), le point d'ébullition du néon (27,102 K), le point triple de l'oxygène (54,361 K) et le point de congélation de l'étain (231,9681 °C) qui était admis comme pouvant remplacer le point d'ébullition de l'eau: le point d'ébullition du soufre était supprimé; les valeurs assignées à quatre points fixes étaient modifiées: point d'ébullition de l'oxygène (90,188 K), point de congélation du zinc (419,58 °C), point de congélation de l'argent (961,93 °C) et point de congélation de l'or (1064,43 °C); les formules d'interpolation dans le domaine du thermomètre à résistance devenaient beaucoup plus complexes; la valeur assignée à la seconde constante du rayonnement devenait 0,014 388 m · K; les marges de tolérance pour les constantes des formules d'interpolation utilisées avec le thermomètre à résistance normalisé et le thermocouple normalisé étaient à nouveau modifiées.

A1.5. Échelle internationale pratique de température de 1968 (EIPT-68), édition amendée de 1975

L'Échelle internationale pratique de température de 1968, édition amendée de 1975, a été adoptée par la 15^e Conférence générale en 1975. Comme dans le cas de l'EIPT-48 vis-à-vis de l'EIT-48, l'édition de 1975 n'introduisait pas de changements numériques; la plupart des modifications rédactionnelles avaient seulement pour but de clarifier et de simplifier son utilisation. Les changements les plus importants étaient les suivants: le point de l'oxygène était défini comme point de rosée et non plus comme point d'ébullition; le point triple de l'argon (83,798 K) était introduit et pouvait valablement se substituer au point de rosée de l'oxygène; de nouvelles valeurs de la composition isotopique du néon normal étaient adoptées;

la recommandation d'utiliser les valeurs de T données par les échelles de 1958 et de 1962 utilisant la pression de vapeur saturante, respectivement de ^4He et de ^3He , était annulée.

A1.6. Échelle provisoire de température de 1976 entre 0,5 K et 30 K (EPT-76)

L'Échelle provisoire de température de 1976 entre 0,5 K et 30 K a été mise en application pour remplir deux conditions importantes: fournir les moyens de réduire substantiellement les erreurs (par rapport aux températures thermodynamiques correspondantes) au-dessous de 27 K qui étaient apparues dans l'EIPT-68 et dans tout le domaine de température des échelles de 1958 et de 1962 utilisant la pression de vapeur saturante de ^4He et de ^3He ; combler la lacune entre 5,2 K et 13,81 K, où il n'existait aucune échelle internationale. Les autres objectifs qui avaient présidé à l'élaboration de l'EPT-76 étaient « que les différences entre les températures T_{76} et T soient lisses, qu'elle se raccorde sans discontinuité à l'EIPT-68 à 27,1 K et qu'elle soit en accord avec la température thermodynamique T aussi étroitement que le permettent ces deux conditions ». À l'inverse de l'EIPT-68 et pour assurer sa rapide adoption, plusieurs méthodes de réalisation de l'EPT-76 étaient approuvées: utilisation d'un instrument thermodynamique d'interpolation étalonné à un ou plusieurs des onze points fixes de définition spécifiés; au-dessus de 13,81 K, utilisation de l'EIPT-68 avec les différences publiées; au-dessous de 5 K, utilisation des échelles reposant sur la pression de vapeur saturante de l'hélium avec les différences publiées; utilisation des échelles bien établies de certains laboratoires avec les différences publiées. Par suite d'un « manque de cohérence interne », il était admis que « de légères ambiguïtés entre les réalisations » pouvaient être introduites. Cependant, on estimait que les avantages obtenus par l'adoption de l'EPT-76 comme échelle de travail, en attendant la révision et l'extension de l'EIPT-68, compensaient largement les inconvénients.



