

# EXTRAPOLATION DES FONCTIONS DE L'ECHELLE INTERNATIONALE DE TEMPERATURE DE 1990

F. Salvetat, C. Le Bihan, C. Compère  
Ifremer, RDT/IC

Technopôle de Brest – Iroise, B.P. 70, 29280 Plouzané, France

## Résumé

Cette étude a pour objet d'examiner la potentialité d'extrapolation des équations fournies par l'Echelle Internationale de Température de 1990 pour la modélisation des thermomètres à résistance de platine étalon.

L'étude a été menée par l'Ifremer pour ses besoins propres : l'extrapolation envisagée est restreinte à une gamme très étroite de température, de  $-10^{\circ}\text{C}$  à  $0^{\circ}\text{C}$  et de  $30^{\circ}\text{C}$  à  $60^{\circ}\text{C}$ .

Le but poursuivi est une diminution des manipulations à réaliser, et donc un gain de temps, un gain financier et des risques inhérents à la manipulation restreints.

## Abstract

The aim of this study is to examine the possibility of extrapolation of the 1990 International Temperature Scale functions for standard platinum resistance thermometer.

The study has been carried out by Ifremer for its own applications. The proposed extrapolation is limited to the range  $-10^{\circ}\text{C}$  to  $0^{\circ}\text{C}$  and  $30^{\circ}\text{C}$  to  $60^{\circ}\text{C}$ .

The purpose is to reduce experiments and thus, calibration time, costs and handling risks.

## Introduction

De par ses missions, l'Ifremer (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) dispose d'un large éventail de capteurs de température. Ces équipements sont en majorité destinés à mesurer des températures dans la gamme allant de  $-10^{\circ}\text{C}$  à  $60^{\circ}\text{C}$ . Les incertitudes de mesures visées sont de quelques millièmes de degrés Celsius. De telles spécifications sont par exemple nécessaires en océanographie physique où l'évolution de la température de certaines zones est minime.

Pour satisfaire la demande métrologique sur ces équipements de mesures océanographiques, le

laboratoire de métrologie de l'Ifremer a donc fait le choix de s'équiper de thermomètres à résistance de platine 25 ohms (Thermomètre à Résistance de Platine Etalon, TRPE) associés à des ponts de mesure de résistance et des résistances étalons. Ces chaînes de mesure sont raccordées annuellement dans un laboratoire externe aux quatre points fixes préconisés par l'Echelle Internationale de Température de 1990 (EIT90) pour couvrir la gamme allant de  $-10^{\circ}\text{C}$  à  $60^{\circ}\text{C}$  :  $-38,8344^{\circ}\text{C}$  (Point Triple de Mercure, PTHg),  $0,01^{\circ}\text{C}$  (Point Triple de l'Eau, PTH<sub>2</sub>O),  $29,7646^{\circ}\text{C}$  (Point de Fusion du Gallium, PFGa) et  $156,5985^{\circ}\text{C}$  (Point de Congélation de l'Indium, PCIn).

Toutefois, ce raccordement externe génère plusieurs difficultés :

- le transport : les thermomètres sont acheminés en train personnellement afin de limiter les risques d'endommagement.

- l'immobilisation du matériel : de une à deux semaines d'étalonnage et jusqu'à un mois et demi d'immobilisation avec l'organisation du transport.

- le coût : le coût d'étalonnage en point fixe est élevé.

- l'exposition à des températures extrêmes,  $-38,8344^{\circ}\text{C}$  et  $156,5985^{\circ}\text{C}$ , alors que les TRPE ne sont jamais utilisés au-delà de  $-10^{\circ}\text{C}$  et  $60^{\circ}\text{C}$ .

- les risques de choc : ils augmentent avec la multiplication des manipulations.

Ces éléments amènent le laboratoire de métrologie de l'Ifremer à rechercher une solution alternative. La proposition soumise est basée sur l'analyse des données et méthodes de raccordement des TRPE de l'Ifremer. Elle consiste à réaliser une modélisation des TRPE au point triple de l'Eau et au point de fusion du Gallium conformément aux équations fournies par l'EIT90 sur ce domaine et d'extrapoler cette modélisation jusqu'à  $-10^{\circ}\text{C}$  et  $60^{\circ}\text{C}$ .

## Matériels et méthodes

### Matériels

Les TRPE faisant l'objet de l'étude sont de marque Rosemount 162CE et Leeds & Northrup 8167-25.

Ils sont associés à des ponts de mesure de résistance Guildline et Measurement International et des résistances de référence Guildline 9330 de résistance nominale 10 ohms.

Les travaux menés impliquent également une cellule de Gallium Pyro Contrôle Chauvin Arnoux, un point triple de l'Eau N.P.L. ainsi qu'un bain thermostaté Hart 7009 muni d'un bloc d'égalisation.

### Rappel des fonctions de l'EIT90 [1]

#### - La fonction écart :

Pour le domaine allant de 0°C au PCIn (156,5985°C) :

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

avec  $W(T_{90}) = \frac{R(T_{90})}{R(0,01^\circ\text{C})}$  (résistance réduite)

$R(T_{90})$  : Résistance du TRPE en ohms à la température  $T_{90}$ , température sur l'EIT90.

$a$  : Coefficient déterminé lors de l'étalonnage du TRPE.

$W_r(T_{90})$  : Fonction de référence

Pour le domaine allant du PTHg (-38,8344°C) au PFGa (29,7646°C) :

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a [W(T_{90}) - 1] + b [W(T_{90}) - 1]^2 \quad (2)$$

avec  $W(T_{90}) = \frac{R(T_{90})}{R(0,01^\circ\text{C})}$  (résistance réduite)

$a$  et  $b$  : coefficients déterminés lors de l'étalonnage du TRPE.

#### - La fonction inverse de la fonction de référence :

Pour le domaine allant de 0°C au PCAg (Point de Congélation de l'Argent, 961,78°C) :

$$T_{90} / K - 273,15 = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left[ \frac{W_r(T_{90}) - 2,64}{1,64} \right]^i \quad (3)$$

avec  $T_{90} / K$  : Température en Kelvin

$W_r(T_{90})$  : Fonction de référence

$D_0$  et  $D_i$  : Coefficients fournis par les tables

Pour le domaine allant du Point Triple de l'Hydrogène, PTe-H<sub>2</sub><sup>1</sup> (13,8033K) au PTH<sub>2</sub>O (0,01°C) :

$$T_{90} / 273,16K = B_0 + \sum_{i=1}^{15} B_i \left[ \frac{W_r(T_{90})^{1/6} - 0,65}{0,35} \right]^i \quad (4)$$

Avec  $T_{90} / K$  : Température en Kelvin

$W_r(T_{90})$  : Fonction de référence

$B_0$  et  $B_i$  : Coefficients fournis par les tables

Les températures négatives allant de -10°C à 0°C sont donc calculées en combinant les fonctions (2) et (4).

Les températures positives de 0°C à 60°C font appel aux équations (1) et (3).

### Méthode

La proposition avancée par le laboratoire de métrologie de l'Ifremer consiste à ne retenir que le jeu d'équations (1) et (3) pour l'ensemble du domaine allant de -10°C à 60°C.

---

<sup>1</sup> Hydrogène dont les formes ortho- et para- moléculaires sont en équilibre de concentration.

Afin de quantifier l'impact d'une telle modification, nous avons dissocié différentes étapes :

1/ Tout d'abord, nous évaluons pour les températures positives la répercussion de l'utilisation du point de fusion du Gallium pour le calcul de la fonction écart en lieu et place du point de fusion de l'Indium.

2/ Ensuite, nous chiffrons pour les températures négatives l'impact provenant de la substitution des équations mathématiques de ce domaine par celles du domaine des températures positives.

3/ Enfin, nous finalisons l'étude en réalisant une inter-comparaison entre des équipements « extrapolés » et un équipement raccordé conformément à l'EIT90 afin d'entériner et, si besoin, de compléter les conclusions des deux précédentes étapes.

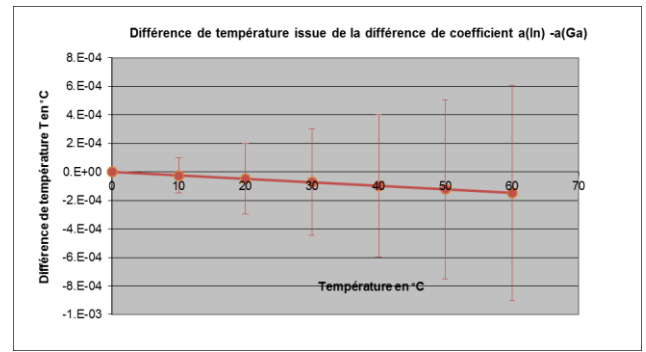
## **Résultats et discussions**

### **Etape 1 - Températures positives : calcul du coefficient a par étalonnage en point de fusion du Gallium**

Bien que les équations calculées soient strictement identiques à celles recommandées par l'EIT90, le calcul du coefficient a de la fonction écart est dorénavant basé sur des données d'étalonnage en point de fusion du Gallium et non en point de fusion de l'Indium.

Au travers de l'analyse de plusieurs étalonnages de nos TRPE réalisés par le Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE), nous sommes en mesure de calculer la différence de température qui en découle. Nous calculons le coefficient a à l'aide des données d'étalonnage LNE au point de fusion du Gallium et comparons les températures issues de ce coefficient a avec celles issue du coefficient a à l'Indium.

Les différences de température calculées pour la gamme des températures positives sont représentées dans la figure ci-dessous. Les résultats sont des moyennes des valeurs obtenues pour l'ensemble de nos TRPE (Rosemount 162CE et Leeds & Northrup 8167-25) sur plusieurs années (de 2 à 5 années selon les TRPE). Nous y avons également indiqué l'étendue des résultats.



La conclusion que nous en tirons est que les températures calculées selon l'EIT90 et celles extrapolées sont équivalentes à mieux que  $1.10^{-3}^{\circ}\text{C}$ .

Toutefois, ce chiffrage se base sur des réalisations de points fixes au LNE et sous-entend qu'afin d'obtenir une erreur similaire notre laboratoire doit être en mesure d'effectuer une réalisation de point de fusion de Gallium de même qualité (justesse et incertitude). Si ce n'est pas le cas, il est alors incontournable d'en connaître l'impact sur la modélisation. Ainsi, nous avons calculé qu'une erreur de justesse de réalisation du point de fusion du Gallium ou du point triple de l'Eau de  $0,5.10^{-3}^{\circ}\text{C}$  entraîne une erreur d'extrapolation à  $60^{\circ}\text{C}$  de  $1.10^{-3}^{\circ}\text{C}$ . Quant à l'incertitude de réalisation du point de fusion du Gallium, l'application de la loi de propagation des incertitudes [2], nous permet d'obtenir l'incertitude associée sur le calcul d'une température extrapolée.

### **Etape 2 - Températures négatives : substitution des équations de l'EIT90 et modélisation des équations avec le point de fusion du Gallium**

Pour cette étape, à la place des équations (2) et (4), nous appliquons les équations (1) et (3) pour les températures négatives.

L'erreur correspondante est donc la somme :

A - D'une erreur liée à l'utilisation de l'équation (3) à la place de l'équation (4) : le chiffrage de cette erreur se fait en calculant la différence de température obtenue par les deux équations pour des valeurs définies de  $W_r$ . Cette erreur est maximale pour  $-10^{\circ}\text{C}$  et représente une surestimation de la température de  $4,1.10^{-5}^{\circ}\text{C}$ .

B - D'une erreur liée à l'utilisation de l'équation (1) avec un coefficient a déterminé au PFGa à la place de l'équation (2) avec des coefficients a et b déterminés au PFGa et au PTHg. L'estimation

de cette erreur est donc directement liée à la réalisation des étalonnages aux points fixes.

L'évaluation de l'erreur globale (A et B) se fait comme à l'étape 1 à l'aide de données d'étalonnages réalisés au LNE.

La différence moyenne de température est une sous-estimation de la température de  $9,6 \cdot 10^{-5} \text{°C}$  avec une étendue de  $\pm 1,6 \cdot 10^{-4} \text{°C}$ .

Les températures issues de TRPE « extrapolés » ou raccordés de manière classique sont donc similaires à mieux que  $5 \cdot 10^{-4} \text{°C}$ .

### **Etape 3 - Validation par inter-comparaison de TRPE**

Afin de vérifier les précédents résultats, nous inter-comparons à  $-10 \text{°C}$  et  $60 \text{°C}$ , quatre TRPE « extrapolés » avec un TRPE considéré comme référence, étalonné de manière classique aux quatre points fixes.

Les TRPE « extrapolés » ont été étalonnés et modélisés au point triple de l'Eau et au point de fusion du Gallium au sein du laboratoire.

L'inter-comparaison se déroule en bain d'huile thermostaté muni d'un bloc de cuivre et dont les caractéristiques sont une homogénéité et une stabilité inférieures à  $1 \cdot 10^{-3} \text{°C}$  à  $-10 \text{°C}$  et  $60 \text{°C}$ .

Pour une température de  $-10 \text{°C}$ , les écarts de température entre les TRPE extrapolés et le TRPE de référence sont tous inférieurs à  $1 \cdot 10^{-3} \text{°C}$ . Les résultats sont donc similaires à ceux de l'étape 2.

A  $60 \text{°C}$ , sur certains TRPE des différences allant jusqu'à  $3 \cdot 10^{-3} \text{°C}$  sont constatées.

Bien que supérieures aux valeurs annoncés à l'étape 1, ces données sont en cohérence avec les écarts attendus par le laboratoire. En effet, nous retrouvons un cumul des différents effets annoncés. Tout d'abord, nous avons l'effet de l'extrapolation soit un écart de  $1 \cdot 10^{-3} \text{°C}$ . Nous retrouvons également l'erreur de justesse sur notre réalisation du point triple de l'Eau par rapport au point triple de l'Eau du LNE : dans notre cas,  $6 \cdot 10^{-4} \text{°C}$  aboutissant à une erreur de calcul de température extrapolée à  $60 \text{°C}$  égale à  $1 \cdot 10^{-3} \text{°C}$ . Enfin, nous observons la variabilité des mesures de température réalisées en bain d'huile dont les caractéristiques avoisinent  $1 \cdot 10^{-3} \text{°C}$ .

En synthèse, nous retiendrons donc cette valeur de  $3 \cdot 10^{-3} \text{°C}$  comme étant l'impact inhérent à

l'extrapolation pour le laboratoire de métrologie de l'Ifremer.

## **Conclusions**

Le projet de l'Ifremer vise à établir la potentialité d'extrapoler les formulations mathématiques recommandées par l'EIT90 pour les TRPE sur le domaine de température borné par le point triple de l'Eau et le point de fusion du Gallium jusqu'à  $-10 \text{°C}$  et  $60 \text{°C}$ .

Les deux premières étapes de l'étude reposent sur l'analyse de données de raccordements externes de TRPE. Elles concluent à une similarité des méthodes préconisées par l'EIT90 et de l'extrapolation proposée par Ifremer à mieux que  $1 \cdot 10^{-3} \text{°C}$ .

La troisième étape basée sur une inter-comparaison entre des TRPE « extrapolés » et un TRPE raccordé « classiquement » chiffre une concordance des températures mesurées à  $3 \cdot 10^{-3} \text{°C}$ . Ce résultat soulève l'importance de la justesse de réalisation des points fixes sur l'extrapolation.

De ce fait, il n'est pas possible de chiffrer un impact lié à l'extrapolation de manière universelle : chaque laboratoire doit quantifier son « impact propre ».

L'extrapolation reste cependant possible : elle permet de diminuer considérablement les temps, coûts et risques de manipulation, mais elle nécessite de mettre en place une surveillance accrue des points fixes (participation à des campagnes de comparaison inter-laboratoire très régulières, possession de moyens redondants de surveillance, etc...).

## **Références**

[1] Collection des monographies du Bureau National de Métrologie, monographie n°17, Compléments d'information à L'Echelle Internationale de Température de 1990, Paris : BNM, 1989, ch. 3, pp. 128-132.

[2] Norme européenne NF ENV 13005, Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure, AFNOR, Aout 1999