

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Nuclear power plants – Instrumentation important to safety – Thermocouples:
characteristics and test methods**

**Centrales nucléaires de puissance – Instrumentation importante pour la sûreté –
Thermocouples: caractéristiques et méthodes d'essai**





THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2013 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester.

If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembé
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

Useful links:

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

The advanced search enables you to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...).

It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available on-line and also once a month by email.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) on-line.

Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: csc@iec.ch.

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Liens utiles:

Recherche de publications CEI - www.iec.ch/searchpub

La recherche avancée vous permet de trouver des publications CEI en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...).

Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

Just Published CEI - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et aussi une fois par mois par email.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) en ligne.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: csc@iec.ch.



IEC 62651

Edition 1.0 2013-04

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Nuclear power plants – Instrumentation important to safety – Thermocouples:
characteristics and test methods**

**Centrales nucléaires de puissance – Instrumentation importante pour la sûreté –
Thermocouples: caractéristiques et méthodes d'essai**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX



ICS 27.120.20

ISBN 978-2-83220-754-3

**Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	8
2 Normative references	8
3 Terms and definitions	8
4 List of abbreviations	11
5 Principle of a thermocouple	11
5.1 General.....	11
5.2 Types of thermocouples for nuclear applications	13
5.2.1 General	13
5.2.2 Type K.....	13
5.2.3 Type T	13
5.2.4 Type J	13
5.2.5 Type N	13
5.2.6 Type E.....	13
5.2.7 Type C	13
5.2.8 Noble metal thermocouples (Type S,R,B)	14
6 Technology of thermocouple assemblies	14
6.1 Thermocouple assembly.....	14
6.1.1 General	14
6.1.2 Direct contact	15
6.1.3 Direct immersion	15
6.1.4 Thermowell mounted	15
6.2 Performance.....	15
6.2.1 Accuracy	15
6.2.2 Range of measurement	15
6.2.3 Response time.....	15
6.2.4 Reliability	15
6.3 Design and construction requirements.....	16
6.3.1 General	16
6.3.2 Reference junctions.....	16
6.3.3 Construction principles	16
6.3.4 Materials	17
6.3.5 Insulation resistance (ungrounded thermocouple)	18
6.3.6 Interchangeability – Replacement.....	18
6.4 Installation of thermocouple assembly	18
6.4.1 Installation requirements	18
6.4.2 Installation in a thermowell	19
6.4.3 Connections	19
6.5 Operational features of thermocouples	20
6.5.1 General considerations on the use of thermocouples.....	20
6.5.2 Ambient conditions (normal and accident operations)	21
6.5.3 Metallurgical inhomogeneities.....	21
6.5.4 Corrosion.....	21
6.5.5 Thermocouple stability.....	21
6.5.6 Cold working phenomena	22

7	Tests	22
7.1	General	22
7.2	Performance tests and pre-production testing.....	22
7.2.1	General	22
7.2.2	Calibration	23
7.2.3	Response time.....	23
7.2.4	Electrical insulation resistance tests	23
7.3	Qualification tests (type tests)	23
7.3.1	General	23
7.3.2	Repeatability (thermal shock)	24
7.3.3	Vibration.....	25
7.3.4	Steam test or high pressure hydraulic test	25
7.3.5	Thermal cycling	26
7.3.6	Harsh environmental conditions qualification	26
7.4	Production tests	26
7.4.1	Manufacturing factors	26
7.4.2	Examination.....	27
7.4.3	Identification.....	28
8	Technical information required.....	28
	Bibliography.....	30
	Figure 1 – Schematic diagram of a thermocouple.....	11
	Figure 2 – Electrical structures of a thermocouple.....	14
	Figure 3 – Installation of a thermocouple in a thermowell.....	19
	Table 1 – List of thermocouples and their use in an NPP	12
	Table 2 – Example of vibration test requirements.....	25

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

NUCLEAR POWER PLANTS – INSTRUMENTATION IMPORTANT TO SAFETY – THERMOCOUPLES: CHARACTERISTICS AND TEST METHODS

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 62651 has been prepared by subcommittee 45A: Instrumentation and control of nuclear facilities, of IEC technical committee 45: Nuclear instrumentation.

The text of this standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
45A/904/FDIS	45A/920/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

INTRODUCTION

a) Technical background, main issues and organisation of the Standard

This IEC standard specifically focuses on thermocouple characteristics and test methods. It is intended that the Standard be used by operators of NPPs (utilities), systems evaluators, designers and by licensors.

b) Situation of the current Standard in the structure of the IEC SC 45A standard series

IEC 62651 is the third level SC 45A document tackling the generic issue of design and qualification of thermocouples. It provides the technical background to the nature and use of thermocouples. It provides information on the choice of thermocouple type in relation to the nuclear power applications of concern. It describes the method of use of thermocouples in nuclear reactors. It gives detailed type test and manufacturing test requirements.

IEC 62651 is to be read in association with IEC 60737 which is the appropriate IEC SC 45A document which provides guidance on temperature sensors for reactor applications in general, and with IEC 60780 for equipment qualification. Other IEC standards of general application to thermocouples are given in the normative references of clause 2, and IAEA documents and background information are referenced in the bibliography.

For more details on the structure of the IEC SC 45A standard series, see item d) of this introduction.

c) Recommendations and limitations regarding the application of the Standard

It is important to note that this Standard establishes no additional functional requirements for safety systems.

Aspects for which special recommendations have been provided in this Standard are:

- the types of thermocouple suitable for nuclear reactor applications;
- the normal mounting arrangements;
- the use of hot or cold reference junctions and of compensating cable;
- the mechanical and metallurgical aspects to be considered;
- the use and types of cold-end seals;
- installation;
- testing.

To ensure that the Standard will continue to be relevant in future years, the emphasis has been placed on issues of principle, rather than specific technologies.

d) Description of the structure of the IEC SC 45A standard series and relationships with other IEC documents and other bodies documents (IAEA, ISO)

The top-level document of the IEC SC 45A standard series is IEC 61513. It provides general requirements for I&C systems and equipment that are used to perform functions important to safety in NPPs. IEC 61513 structures the IEC SC 45A standard series.

IEC 61513 refers directly to other IEC SC 45A standards for general topics related to categorization of functions and classification of systems, qualification, separation of systems, defence against common cause failure, software aspects of computer-based systems, hardware aspects of computer-based systems, and control room design. The standards

referenced directly at this second level should be considered together with IEC 61513 as a consistent document set.

At a third level, IEC SC 45A standards not directly referenced by IEC 61513 are standards related to specific equipment, technical methods, or specific activities. Usually these documents, which make reference to second-level documents for general topics, can be used on their own.

A fourth level extending the IEC SC 45A standard series, corresponds to the Technical Reports which are not normative.

IEC 61513 has adopted a presentation format similar to the basic safety publication IEC 61508 with an overall safety life-cycle framework and a system life-cycle framework. Regarding nuclear safety, it provides the interpretation of the general requirements of IEC 61508-1, IEC 61508-2 and IEC 61508-4, for the nuclear application sector, regarding nuclear safety. In this framework IEC 60880 and IEC 62138 correspond to IEC 61508-3 for the nuclear application sector. IEC 61513 refers to ISO as well as to IAEA GS-R-3 and IAEA GS-G-3.1 for topics related to quality assurance (QA).

The IEC SC 45A standards series consistently implements and details the principles and basic safety aspects provided in the IAEA code on the safety of NPPs and in the IAEA safety series, in particular the IAEA Safety Standard SSR 2/1, establishing safety requirements related to the design of Nuclear Power Plants, and the Safety Guide NS-G-1.3 dealing with instrumentation and control systems important to safety in Nuclear Power Plants. The terminology and definitions used by SC 45A standards are consistent with those used by the IAEA.

NOTE It is assumed that for the design of I&C systems in NPPs that implement conventional safety functions (e.g. to address worker safety, asset protection, chemical hazards, process energy hazards) international or national standards would be applied, that are based on the requirements of a Standard such as IEC 61508.

NUCLEAR POWER PLANTS – INSTRUMENTATION IMPORTANT TO SAFETY – THERMOCOUPLES: CHARACTERISTICS AND TEST METHODS

1 Scope

This International Standard describes the requirements for thermocouples suitable for nuclear power plant (NPP) applications. Thermocouples are widely used in NPPs with other temperature measurement devices such as Resistance Temperature Detectors (RTDs). They are simple and robust and have some specific characteristics (range of measurement and maximum temperature) which make them uniquely suitable for some measurements.

The requirements given in this standard for thermocouples include design, materials, manufacturing, testing, calibration, procurement, and inspection.

The scope of this standard does not cover the design, material selection, and construction of the thermowell, the guide tube, the extension cable, and the temperature transmitter or bridge which may be associated with the thermocouple.

2 Normative references

The following documents, in whole or in part, are normatively referenced in this document and are indispensable for its application. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60584-1:1995, *Thermocouples – Part 1: Reference tables*

IEC 60584-2:1982, *Thermocouples – Part 2: Tolerances*
Amendment 1:1989

IEC 60584-3:2007, *Thermocouples – Part 3: Extension and compensating cables – Tolerances and identification system*

IEC 60737:2010, *Nuclear power plants – Instrumentation important to safety – Temperature sensors (in-core and primary coolant circuit) – Characteristics and test methods*

IEC 60780, *Nuclear power plants – Electrical equipment of the safety system – Qualification*

IEC 60980, *Recommended practices for seismic qualification of electrical equipment of the safety system for nuclear generating stations*

IEC 61513, *Nuclear power plants – Instrumentation and control important to safety – General requirements for systems*

IEC 61515:1995, *Mineral insulated thermocouple cables and thermocouples*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

3.1

accuracy of measurement

closeness of the agreement between the result of a measurement and the conventionally true value of the measurand

Note 1 to entry: "Accuracy" is a qualitative concept.

Note 2 to entry: The term precision should not be used for "accuracy".

[SOURCE: IEC 60050-394:2007, 394-40-35]

3.2

calibration

set of operations that establish, under specified conditions, the relationship between values of quantities indicated by measuring instrument or measuring system, or values represented by a material measure or a reference material, and the corresponding values realized by standards

[SOURCE: IEC 60050-394:2007, 394-40-43]

3.3

reference junction

junction of the thermocouple which is at a known (reference) temperature to which the measuring temperature is compared

Note 1 to entry: The reference junction is also called the cold junction.

[SOURCE: IEC 60584-1:1995, definition 2.4]

3.4

drift

variation in sensor or instrument channel output that may occur between calibrations that cannot be related to changes in the process variable or environmental conditions

[SOURCE: IEC 62385:2007, definition 3.7]

3.5

measurement junction

the metal-to-metal junction of the thermocouple located where the temperature is measured. The second junction is located at a reference temperature

Note 1 to entry: The measurement junction is also called the hot junction.

3.6

performance monitoring

process of demonstrating that an installed instrument channel continues to perform its intended function of monitoring the process variable with the expected accuracy, response time, and stability

[SOURCE: IEC 62385:2007, definition 3.13]

3.7

response time

the period of time necessary for a component to achieve a specified output state from the time that it receives a signal requiring it to assume that output state

[SOURCE: IAEA Safety Glossary, edition 2007]

3.8

extension and compensating cables

cables used for the electrical connection between the open ends of a thermocouple and the reference junction in those installations where the conductors of the thermocouple are not directly connected to the reference junction. The thermoelectric properties of extension and compensating cables must be close to the properties of the corresponding thermocouple

[SOURCE: IEC 60584-3:2007, definition 3.1]

3.9

extension cables

cables manufactured from conductors having the same nominal composition as those of the corresponding thermocouple. They are designated by the letter "X" following the designation of the thermocouple, for example "JX"

[SOURCE: IEC 60584-3:2007, definition 3.1.1]

3.10

compensating cables

cables manufactured from conductors having a composition different from the corresponding thermocouple. They are designated by the letter "C" following the designation of the thermocouple, for example "KC". In some cases different tolerances apply for the same thermocouple type over different temperature ranges. These are distinguished by additional letters such as, for example, KCA and KCB

[SOURCE: IEC 60584-3:2007, definition 3.1.2]

3.11

thermocouple

pair of conductors of dissimilar materials joined at one end and forming part of an arrangement using the thermoelectric effect for temperature measurement

[SOURCE: IEC 60584-2:1982, definition 2.2]

3.12

thermocouple assembly

an assembly used for temperature measurement, comprising a double set of junctions (hot and cold junctions), cables, connections and an electronic system measuring very low voltages

3.13

thermowell

protective jacket for RTDs, thermocouples and other temperature sensors. The thermowell is also used to facilitate replacement of the temperature sensor

[SOURCE: IEC 62385:2007, definition 3.19]

3.14

time constant

in the case of a first order system, the time required for the output signal of a system to reach 63,2 % of its final variation after a step change of its input signal. If the system is not a first order system, the term "time constant" is not appropriate. For a system of a higher order, the term "response time" should be used

[SOURCE: IEC 62385:2007, definition 3.20]

3.15

thermoelectric (Seebeck) effect

the thermoelectric effect is the production of an electromotive force EMF due to the difference of temperature between two junctions of different metals or alloys forming part of the same circuit

[SOURCE: IEC 60584-2, definition 2.1]

4 List of abbreviations

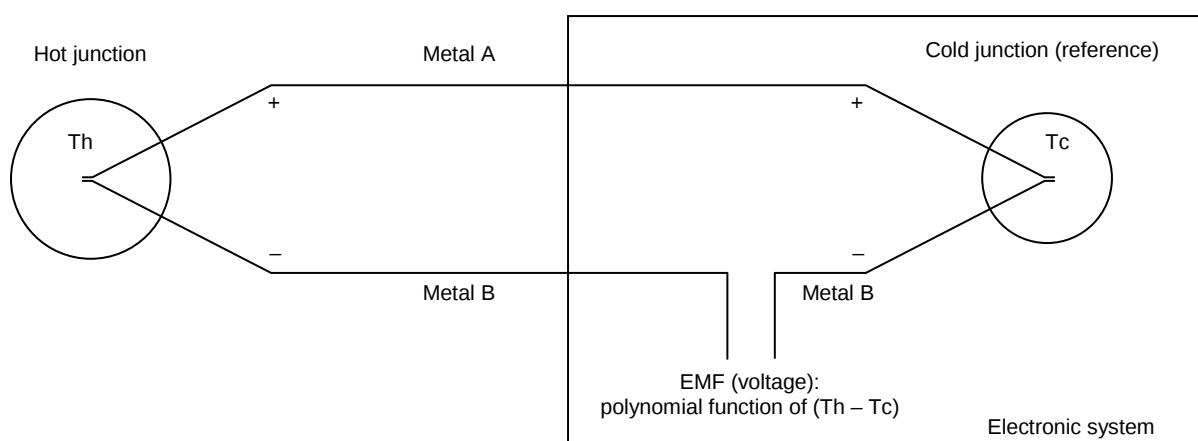
EMF	Electromotive Force
HELB	High Energy Line Break
LOCA	Lost Of Coolant Accident
NPP	Nuclear Power Plant
QA	Quality Assurance
RTD	Resistance Temperature Detector

5 Principle of a thermocouple

5.1 General

When two wires made from dissimilar metals are joined together (by welding or at terminals) at both ends, a small voltage appears on the loop depending on the temperature difference between the two ends as shown on Figure 1. This phenomenon is known as the Seebeck effect. It is the basic principle of a thermocouple used for temperature measurement.

The metal forming one wire is electrically positive compared to the other.



Key

T_h temperature of hot junction

T_c temperature of cold junction

Figure 1 – Schematic diagram of a thermocouple

The measuring end is called the hot junction and the other end at a reference temperature is called the cold junction. An electronic system measures the voltage and converts it to give the temperature by comparison with the reference temperature measured by another principle. The relationship between the thermocouple EMF signal and the process temperature is a

polynomial combination whose coefficients are given by Table 1 of IEC 60584-1:1995. The typical voltage generated by type K thermocouple is about 40 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ from a source with the impedance of the loop resistance of the metals.

The EMF, and therefore the sensitivity and the range of measurement, depend on the nature of the metals. Although many combinations of metals are possible, only specific ones are selected, defining a limited range of types of thermocouple. Each type of thermocouple is defined according to three tolerance classes: Class 1, 2 or 3. Each class corresponds to a tolerance and an associated range where the tolerance is valid.

IEC 60584-2 gives detailed requirements about the classes of tolerance.

IEC 61515 gives general requirements regarding mineral insulated thermocouples and cables.

The environmental conditions in an NPP imply that only some types of thermocouples are recommended.

Table 1 gives the most common thermocouple types. The given temperature range corresponds to the superposition of the three classes of tolerances as described in IEC 60584-2.

Table 1 – List of thermocouples and their use in an NPP

Type	Positive Metal/Alloy	Negative Metal/Alloy	Typical temperature range $^\circ\text{C}$	Example of application
K	Nickel – Chromium	Nickel – Aluminium	–200 to +1 150	Primary circuit PWR
T	Copper	Copper – Nickel	–200 to +350	Not in neutron flux
J	Iron	Copper – Nickel	–40 to +750	Not in neutron flux
N	Nickel – Chromium- Silicon	Nickel – Silicon	–200 to +1 200	Fuel temperature
E	Nickel – Chromium	Copper – Nickel	–200 to +750	Not in neutron flux
C	Tungsten – Rhenium (5 %)	Tungsten – Rhenium (26 %)	0 to +2 300	Not in neutron flux
R	Platinum – Rhodium (13 %)	Platinum	0 to +1 700	Not in neutron flux
S	Platinum – Rhodium (10 %)	Platinum	0 to +1 700	Not in neutron flux
B	Platinum – Rhodium (30 %)	Platinum Rhodium (6 %)	+600 to +1 820	Not in neutron flux

Some other types of thermocouples based on Molybdenum – Niobium (MoNb) or their alloys may be considered for high performance applications.

The categories (T, J, E, C, R, S, B) are described in 5.2 for information only.

Only K, N and E types are generally used for nuclear applications, in accordance with the limitations on exposure to neutron flux of Table 1.

5.2 Types of thermocouples for nuclear applications

5.2.1 General

For nuclear applications, and specifically for measurement on and in the primary coolant circuit of reactors, thermocouples with a robust design and a high quality shall be used. They are protected within a metal sheath and insulated with a mineral material.

Thermocouples are used on water reactors for measurement of fuel channel outlet temperature, which is particularly important in beyond design basis conditions. They may be used in travelling fuel channel probes on water-cooled reactors, often for calibration purposes. They are used on gas cooled reactors for measurements of fuel temperature, and fuel channel outlet temperature, which are needed for reactor protection and for control, and are also used for measurement of moderator and core support structural temperature.

More details are given in IEC 60737.

5.2.2 Type K

Type K thermocouple is the most widely used thermocouple. Its voltage output signal curve is virtually linear against the temperature and has a good sensitivity. Type K thermocouples can be used in temperatures up to 1 150 °C and, for short periods, up to 1 250 °C depending on sheath material and diameter.

5.2.3 Type T

This thermocouple is not very commonly used. Its temperature range is limited to –200 °C up to +350 °C. It is used in moist or negative temperature conditions because of its resistance to corrosion and the greater homogeneity of the component wires that reduce errors due to temperature gradients.

5.2.4 Type J

Type J Thermocouple has a limited temperature range: –40 °C to +750 °C. Its sensitivity increases up to 55 µV/°C and its output signal can be changed by the contamination of the iron. It is not recommended for nuclear applications.

5.2.5 Type N

This thermocouple has a good thermoelectric stability. It has an excellent oxidation resistance at high temperature. It is well adapted for accurate measurements in air, up to 1 200 °C. In vacuum or controlled atmosphere, it can withstand 1 300 °C depending on sheath materials and diameter

N thermocouples are more stable than noble metal thermocouples (S or B) under radiation conditions, but they are less stable at high temperature without radiation. Their drift depends on the sheath material and the temperature. Under certain conditions Type K are more stable than type N.

5.2.6 Type E

Thanks to its high sensitivity, the type E thermocouple is mainly used for cryogenic measurements. As it is non-magnetic, it can be preferred for some specific applications.

5.2.7 Type C

The type C thermocouple is mainly used for high temperature measurements, specifically for nuclear applications not subject to neutron flux.

5.2.8 Noble metal thermocouples (Type S,R,B)

The noble metal thermocouples are dedicated to high temperature measurements (over 1 500 °C). Pure platinum and platinum/rhodium alloys develop smaller voltages than junctions with common metal. These thermocouple become active and are not recommended for nuclear applications.

6 Technology of thermocouple assemblies

6.1 Thermocouple assembly

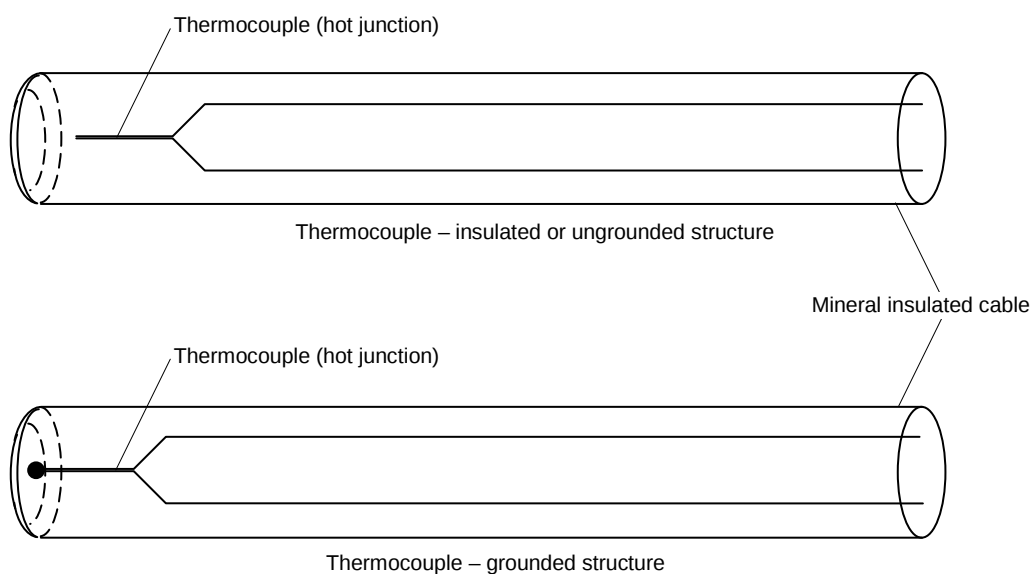
6.1.1 General

A thermocouple is a sensitive element which delivers a small electric signal in direct relation with the temperature. It can be used in association with mechanical and electrical components (thermowell, cables, junction box), to position, protect and connect it to an electronic device for signal processing. The set of these components is the thermocouple assembly. This standard refers to the thermocouple assemblies and their use in an NPP.

The basic structure of a thermocouple used in NPP is a mineral insulated cable with the thermocouple junction at the end of the cable. Two structures are possible:

- Insulated or ungrounded structure when the thermocouple is not electrically connected to the sheath.
- Grounded structure when the thermocouple is in direct contact with the envelope of the sheath.

Figure 2 shows the two possible structures of a thermocouple



IEC 803/13

Figure 2 – Electrical structures of a thermocouple

Depending on the nature of the substance whose temperature is measured (gas, liquid, solid) and the conditions of measurement (fixed, flow rate, electrical conditions), the mechanical arrangement of the thermocouple will differ according to:

- direct contact with the component;

- direct immersion;
- protected in a metallic support (thermowell) .

6.1.2 Direct contact

The end of the thermocouple is welded or fixed on the metallic surface of the component. This is for example the typical arrangement for the incore thermocouple for the measurement of in-core temperature on the surface of the fuel element.

6.1.3 Direct immersion

The thermocouple is in direct contact with the fluid of which the temperature is measured.

6.1.4 Thermowell mounted

In the case of the measurement of the temperature of a fluid in a circuit, the thermocouple is generally inserted in a protective support called the thermowell.

The use of a thermowell makes any replacement of the thermocouple easier.

The mechanical contact of the end of the thermocouple with the envelope of the thermowell is important regarding the accuracy and the response time.

6.2 Performance

6.2.1 Accuracy

The accuracy of a thermocouple depends on the characteristics of the materials themselves and the accuracy of the cold junction temperature measurement. IEC 60584-2 specifies the amount by which the measurements may deviate from ideal behaviour for each type of thermocouple. Three classes of tolerance are defined in Table 1 of IEC 60584-2:1982. The class of tolerance of a thermocouple depends on the manufacturing process.

6.2.2 Range of measurement

The range of measurement is given by the type of the thermocouple as indicated above. The range differs according to the class of tolerance as indicated in IEC 60584-2.

6.2.3 Response time

The response time of a thermocouple assembly depends on its structure including the thermowell.

The response time of a thermocouple depends on the diameter of the wires, the mass of materials around the junction and its efficiency in transferring heat from its outer surfaces to the wire sensing element. A thermocouple can be shaped in order to reduce the thermal inertia and to shorten the response time.

For NPP applications, the response time requirement shall be specified according to the functions to be performed.

6.2.4 Reliability

The reliability requirement of thermocouples used for safety functions are defined from reliability requirements of the safety system. Experience of carefully manufactured thermocouples provided with high Quality Assurance and Quality Control requirements for NPP applications is that their reliability is high. Thermocouples operated in safety systems should have their design lives defined. For thermocouples whose design life is less than the

design life of the NPP or the safety system, then arrangement shall be made for these thermocouples to be replaced or re-assessed before their design life is reached.

6.3 Design and construction requirements

6.3.1 General

The thermocouple and its associated devices shall meet the requirements described in this standard and in IEC 60737. Safety or other requirements for the application shall be determined according to national and international requirements and practice, including IEC 61513.

6.3.2 Reference junctions

A thermocouple is a differential device giving an electric signal related to the difference of temperature between the hot junction (to be measured) and the cold junction (reference). The cold junction is typically not kept at a known temperature but rather the temperature is measured at the cold junction and this measurement is used to perform the cold junction temperature compensation to obtain the actual process temperature at the measurement junction.

6.3.3 Construction principles

Thermocouples can be supplied in different internal constructions, which depend on the manufacture, qualification requirements, and applications. For thermocouples being used in an NPP, the design and structure of the thermocouple should consider the environmental conditions in which the sensor is being used under normal operating and under design basis accident conditions, as well as the qualification tests specified by the user. The use of a flexible mineral-insulated cable between the thermocouple and the connector is commonly adopted, and the user may also adopt any other construction. A variation of this design may include a rigid exterior sheath over the mineral-insulated cable between the thermocouple and the connector, this sheath being welded to the connector.

Thermocouples can be manufactured with various forms depending on the conditions of the measurement.

Three types of thermocouple are commonly used:

- Simple thermocouple: The wires are not protected and separate from each other, the hot junction is directly fastened or soldered onto the surface of the component. This type is not normally used in NPPs.
- Thermocouple with a grounded hot junction: The wires are isolated from each other (except at the junction itself) and inserted in a metallic protective sheath. The hot junction is electrically connected to the protective sheath.
- Thermocouple with an isolated hot junction (i.e. ungrounded): The wires are isolated from each other (except at the junction itself) and inserted in a protective sheath. The hot junction is electrically isolated from the protective sheath.

The methods of manufacture of the measuring junction are:

- exposed junction – the thermocouple is made with the junction extended beyond the end of the sheath and insulant and remaining unprotected, such arrangements are not normally used;
- grounded junction – the conductors are welded to the end cap, which is welded to the sheath to form the closure;
- ungrounded or isolated junction – the thermocouple is formed and the hot junction located at a controlled position from the sheath closure end cap.

Protecting the measuring junction with a sheath has the following advantages:

- The conductors are protected from the environmental conditions.
- The insulant is protected from moisture.
- The conductors are not subject to mechanical damage.

The ungrounded or insulated junction also has the following advantages:

- Differential expansion between conductors and sheath will not cause stress on the conductors.
- The thermocouple is protected from earth faults.
- The signal interference problems of earthed thermocouples can be eliminated.

6.3.4 Materials

6.3.4.1 Thermocouple wires

The wires used for thermocouples shall be carefully identified and documented. The size of conductor is a compromise. It should balance:

- mechanical strength;
- an allowance for oxidation;
- minimum loop resistance;
- reduction of thermal conduction from the hot junction;
- reduction of radiation;
- the time taken to reach thermal equilibrium.

6.3.4.2 Cable construction

Matched thermocouple conductors are surrounded by a mineral insulation, held in a metal tube. This is then reduced by drawing, swageing, or rolling, which also compacts the insulant and removes voids.

Depending on the type of the measurement needed, the design of the cable can differ significantly.

The method of construction and the quality checks employed shall be sufficient to ensure that the geometry of the thermocouple is adequately controlled. This includes wire spacing, symmetry, position of the junction, and the absence of voids in the insulant.

The characteristics of the cable include:

- quality of the insulant of the highest grade of magnesia;
- standard outside diameters of cables;
- capacity of passing a specific pressure test;
- sheath materials like chromium-nickel alloy where fuel temperature is measured, of the same composition as the fuel element sheath.

6.3.4.3 Seals and adhesives

Sheathed thermocouples (see 6.3.3) shall be hermetically sealed. The connector may or may not be an integral part of the thermocouple assembly. Thermocouples used in a harsh environment, such as in high-temperature and/or radiation areas, shall be designed without organic material. The use of mineral material is recommended. The leak tightness of the insulating termination shall be tested according to an adequate and proven procedure. Commonly suggested seals of the connector are glass-to-metal or ceramic-to-metal, which should have less than 10^{-8} cm³/s leak rate when tested with helium at an atmospheric differential pressure.

All cements, adhesives, or seals used internally in the device shall be capable of withstanding the service conditions without functional deterioration and without emitting gases. All non-metallic materials, when used for seals, protective finishes, and so forth, shall be moisture and flame-resistant. These non-metallic materials shall not support fungus growth and shall not be adversely affected by the ambient environments specified in the performance requirements of this standard.

6.3.4.4 Sheath closure

The sheath closure at the measuring junction should be an end cap of the same material, welded onto the sheath, using argon-arc methods. This also allows filling the end void with insulant before the sheath is closed. For sizes below 1,5 mm, plasma-arc welding may be used, with no end cap fitted and closure done by heating the sheath metal with the measuring junction pointing downwards so that it can flow to form a cast end.

6.3.4.5 Reference (cold end) seal

To prevent ingress of moisture, a seal is needed at the cold end of the thermocouple, by a seal pot fixed to the sheath by brazing, welding or crimping. Before attaching the seal pot to the sheath, flexible wires fitted with insulating sleeves are brazed to the thermocouple conductors. The joints should be arranged about halfway along within the seal pot. This is filled with a sealing compound suitable for sealing up to 105 °C. The seals shall be tested for effectiveness after completion.

6.3.5 Insulation resistance (ungrounded thermocouple)

The insulation resistance is a parameter that gives information regarding the tightness of the sheath.

The insulation resistance of an ungrounded thermocouple depends on the diameter of the cable sheath, the temperature, the quality and purity and moisture content of the insulant.

The insulation resistance and the voltage to use for the resistance measurement shall be given by the manufacturer at ambient temperature and operation temperature. The insulation resistance should be in the range of at least 100 MΩ to 1 000 MΩ and the voltage for the measurement in the range 50 V to 500 V, depending on the diameter of the sheath.

Typically, the insulation resistance decreases by two orders of magnitude between the ambient temperature and 200 °C, and this needs to be considered in design.

6.3.6 Interchangeability – Replacement

Every sensor produced under the same specification shall be interchangeable with any other of the same type, within the tolerances.

The handling of thermocouples when removed from the reactor circuit and any radiation hazards that may be involved should be considered in any design.

6.4 Installation of thermocouple assembly

6.4.1 Installation requirements

Errors can be introduced because of installation conditions. The following precautions should be observed:

- any action that might cause cold working should be avoided;
- installation should note the manufacturer's specified minimum bending radius for the cable;
- severe bending or flexing of the wires should be avoided;

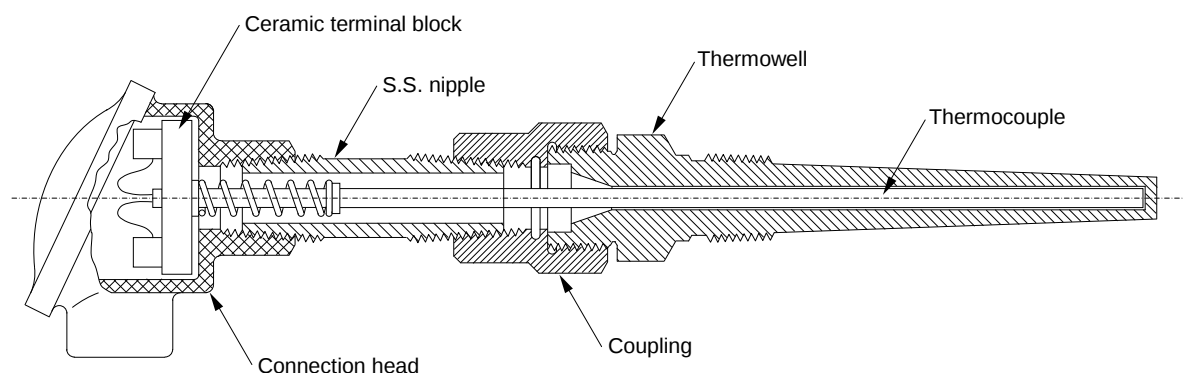
- conductors should be connected correctly;
- the number of connections in the measuring circuit should be kept to a minimum;
- the thermocouple reference junctions should be accessible and not in a hostile environment;
- the thermocouple should be located so that the measured temperature is representative of the object or medium being observed;
- for fluid temperature measurement, the thermocouple depth of immersion should be such that the effects of heat transfer from the measuring junction or laminar flow conditions are minimised.

6.4.2 Installation in a thermowell

In a thermowell, the thermocouple shall be held by spring pressure (see Figure 3). The user shall ensure that the thermocouple is compatible with the design of the thermowell, the connection head, the extension guide tube, and the end fittings.

The connector assembly shall prevent moisture intrusion that may result in a leakage current, thus degrading the signal and producing a false temperature indication. The cable connector assembly shall also provide mechanical protection for the connections, thus preventing mechanical stresses from rendering the circuit susceptible to the effects of moisture intrusion, or breaking off the connections completely.

If fastening devices, such as screws, pins, bolts and similar, are used, these parts shall be installed with a means for preventing loss of tightness. These parts, when subject to removal or adjustment, shall not be swaged, peened, stacked, or otherwise permanently deformed.



IEC 804/13

Figure 3 – Installation of a thermocouple in a thermowell

6.4.3 Connections

6.4.3.1 Cables

6.4.3.1.1 General

In an NPP, the connection of the thermocouple to the electronic system requires the use of a cable. This cable needs very specific characteristics to avoid parasitic signals due to the gradient of temperature all along the cable route. Two solutions are possible to select the cable:

- extension cable;
- compensating cable.

Extension cables or compensating cables shall have characteristics matching the EMF/temperature curves for the thermocouple itself over a limited temperature range.

Requirements from IEC 60584-3 for the identification and colour coding of the compensating and extension wires, the tolerances applicable, and their electrical properties shall be considered in the design.

6.4.3.1.2 Extension cables

An extension cable should have conductors of the same nature as the thermocouple elements, extending it to the reference junction and having the same thermoelectric properties as those of the thermocouple within the whole range of utilisation of the table.

6.4.3.1.3 Compensating cable

Compensating cable should be used from the positions of the primary junction boxes where the thermocouple cables themselves are brought out from the reactor (or other measurement location), for connection to the measurement system. The compensating cable should have the same characteristics as the thermocouple itself at the general environmental conditions of the cable ways and routes taken from the primary junction boxes to the measurement system.

Where compensating cable is used, the junction with the thermocouple wires shall be in a suitable termination box which should be hermetically sealed. The thermocouple cable shall be sealed against moisture ingress to the insulant material. An insulation testing criteria shall be defined for such thermocouples, (typical figures are for several megohms, see also IEC 60737). The seal and extension cable may be specified as part of the application or recommended by the temperature-sensor manufacturer.

6.4.3.2 Connectors

As a connector is, by definition, an extra junction, the choice of a connector for a thermocouple has great importance. Only a specific and appropriately matching connector can be used for a given thermocouple. The nature and polarity of each contact shall be selected carefully against the type of thermocouple and its cables.

The temperature rating of the thermowell connector shall equal or exceed the maximum possible temperature or the accident temperature specified by the user.

Unless otherwise specified, the manufacturer shall supply the mating connector half with the thermocouple.

6.5 Operational features of thermocouples

6.5.1 General considerations on the use of thermocouples

In nuclear application, both “direct-immersion” and “thermowell-mounted” thermocouple designs are commonly used; however, this standard does not exclude any other design of thermocouple which may be required for certain special applications in various types of reactors.

A thermocouple by principle has a very small sensitive element, characterized by some specific features:

- It can measure the temperature at a small location.
- The response time of a thermocouple is faster than the response time of a RTD, due to its small dimensions and thermal inertia.
- It can be in direct contact (by soldering, welding or suitable fixtures) with the surface of the component whose temperature is measured.

- It can measure high temperatures, therefore it is the preferred solution for in-core applications, when the temperature can be higher than 1 000 °C.
- It can withstand a very high radiation dose rate, due to its metallic and mineral structure.

6.5.2 Ambient conditions (normal and accident operations)

The environmental conditions for operation of each thermocouple assembly shall be specified:

- Range and maximum temperature for the sensitive element.
- Plant design life.
- Radiation exposure rate (normal operation and accident operation).
- Air / steam environments (temperature, humidity, contaminants, steam pressure).

6.5.3 Metallurgical inhomogeneities

An ideal thermocouple has homogeneous conductors with uniform EMF characteristics. Then the thermal EMF is a function only of the temperature difference between the junctions, and only depends on the characteristics of the individual thermocouple elements. However, chemical, physical and metallurgical inhomogeneities are produced in manufacture and in subsequent use of the thermocouple.

Therefore the thermal EMF of a practical thermocouple is also a function of the temperature distribution along individual thermo elements. The thermocouple characteristics therefore have a component caused by the interaction of the inhomogeneous regions of the thermocouple and the temperature gradient. This component is superimposed on the ideal EMF output characteristic.

Inhomogeneities from the manufacturing process can be kept small and constant. Inhomogeneities from usage of the thermocouple give greater concern. All thermocouples have spurious thermal EMFs due to inhomogeneities which are developed at elevated temperatures in subsequent use.

6.5.4 Corrosion

Oxidized or severely corroded thermocouples can have an erroneous signal. Changes in wire composition can result from corrosion and contamination by other elements. Oxide scale, brazing alloys and fluxes constitute possible source of drift away from initial calibration. Periodic checks are recommended to verify the calibration of a thermocouple.

6.5.5 Thermocouple stability

The stability and EMF of thermocouples are affected by:

- Contaminants in the thermocouple alloys (sulphur, oils and greases).
- The nickel-base alloys of Type K thermocouples are subject to attack in conditions of limited oxygen availability;
- Inhomogeneities of composition as reactive solute elements such as chromium, manganese and aluminium, which are depleted by internal oxidation.
- Cold working causing small changes in characteristics, which can be removed by heat treatment. The alloys NiCr, CuNi and NiAl can recover by heating to 450 °C for a period of several hours.

By changing the alloys from the disordered state to the ordered condition, the output of the thermocouples can change by at least $\pm 1\%$. The conditions in nuclear reactor application can also affect accuracy and stability as follows:

- Thermal and fast neutron flux affect thermocouple alloys, producing material composition and structural changes.

- Nickel is particularly stable so nickel-based thermocouples are recommended for use within the core of a nuclear reactor, although long-term exposure to in-core flux levels can cause changes in thermocouple output of several degrees.
- Magnetic field effects can cause transformations perturbing the thermal EMFs of the Type K negative conductor.

6.5.6 Cold working phenomena

Repeated stressing or bending, commonly called “cold working” of a thermocouple wire can generate stress and distortion of the material crystalline structure, resulting in significant potential for measurement error. This produces unintended junctions in the wire. When these junctions are located in a temperature gradient, a voltage is generated that results in a temperature measurement error

Installation shall be prepared carefully with specific extension or compensating cable to limit this phenomenon.

7 Tests

7.1 General

Tests shall be carried out to prove that thermocouples comply with the requirements of this standard. It is not intended or recommended that all tests shall be performed on every thermocouple being supplied.

Three kinds of tests are therefore described as follows:

- Performance tests
- Qualification tests (type tests)
- Routine production tests

Qualification tests (type tests) shall be carried out on samples of each particular design and range of thermocouple. Where the function of the thermocouple is important to safety, equipment qualification requirements shall be determined and carried out in accordance with IEC 60780 and IEC 60980.

Routine production tests shall be carried out on every thermocouple after manufacturing.

The manufacturer shall conduct all routine tests and carry out all inspections necessary to ensure that the material, workmanship, and operation are of the degree of excellence required by this standard and to demonstrate that the equipment supplied is calibrated and functionally performs as specified herein.

All inspection and test procedures, calibration equipment, and calibration equipment certificates shall be available to the user for acceptance prior to the commencement of manufacture.

7.2 Performance tests and pre-production testing

7.2.1 General

These tests are performed to validate the design of a thermocouple. Each thermocouple shall meet the performance requirements of this subclause.

7.2.2 Calibration

Calibration is the operation that allows the measurement of the functional response of the thermocouple at fixed and stable temperature. Two methods are generally considered to calibrate thermocouples:

- The fixed point method: The method consists of placing the sensor in a chamber whose constant uniform temperature is defined by the thermodynamic equilibrium between different phases of a pure substance.
- Comparison method to a reference sensor. The method consists of placing the sensor in a chamber whose constant uniform temperature has been measured using a standard sensor which is taken as a reference.

The temperature measurement consists of converting an accurate voltage measurement into a temperature by using a polynomial function given in normative Annex A of IEC 60584-1.

The typical calibration procedure is a combination of the fixed point method (0 °C) and the comparison method at higher temperature, with a reference junction held at an accurately known temperature such as 0 °C.

a) At 0 °C: fixed point method

The sensor comes to equilibrium in a well-stirred ice bath maintained at $0\text{ °C} \pm 0,2\text{ °C}$.

The EMF generated by the thermocouple shall be measured with a high resolution DC voltmeter (typically better than $\pm 0,05\%$).

b) At 100 °C or at operating temperature as specified by the user: comparison method.

The sensor is immersed in a bath of silicone oil, or other appropriate fluid, adjacent to a secondary standard, which is directly traceable to an approved temperature standard. The sensor shall be immersed deeply enough to render the stem conduction error negligible.

The bath temperature shall be within $\pm 1\text{ °C}$ of the desired calibration temperature when the EMF reading is taken. The bath temperature stability and temperature uncertainty shall be established and the effect of any non-uniformity or residual temperature stability of the bath shall be accounted for in calculating the overall accuracy of the thermocouple calibration process.

7.2.3 Response time

A typical test method for determining response time is to quickly plunge the detector at 20 °C into water flowing at a specified speed and temperature (typically = $1\text{ m/s} \pm 0,15\text{ m/s}$ and at $75\text{ °C} \pm 2,5\text{ °C}$). Alternatively, the sensor can be heated in air and then plunged into room temperature water flowing at 1 m/s. Unless otherwise specified, the time to reach 63,2 % of the step change in temperature shall not exceed 20 s for a thermocouple in a thermowell or 3 s for a thermocouple alone (ungrounded structure).

7.2.4 Electrical insulation resistance tests

Electrical insulation tests are performed only on thermocouples with a junction insulated from the sheath (ungrounded structure). The measurement is performed with a megohmmeter at a voltage specified by the manufacturer. The thermocouple with insulated junction shall successfully meet acceptance criteria for the electrical insulation resistance test as specified in 6.3.5.

7.3 Qualification tests (type tests)

7.3.1 General

To demonstrate that the thermocouple is suitable for the service stipulated above, 10 % of the same production batch or no less than three sensors chosen at random, produced by normal methods and processes, shall be subjected to a qualification test. This test shall qualify all models of a common design.

The qualification tests are performed on thermocouple after the production tests.

These qualification tests shall be specified according to the operational environmental conditions. For example they consist of the following tests:

- repeatability;
- vibration test;
- steam test;
- thermal cycle, and
- final calibration and accuracy.

When thermocouples are used for applications important to safety and under design basis accident environmental conditions, the qualification test shall include the following special tests:

- accident simulation test, based on the most onerous conditions to be withstood;
- seismic test; and
- irradiation test.

Environmental qualification for a plant accident scenario, such as a LOCA or a high-energy line break, shall be specified in the individual thermocouple specification sheets. Qualification shall be carried out in accordance with the technical specification defined by the user. In the absence of any specific instruction from the user, the qualification tests shall be performed in accordance with the methods and procedures provided in IEC 60780 and in IEC 60980.

For the laboratory to perform the qualification tests, the user shall define

- the normal operating environments of these thermocouples;
- the thermocouple mounting arrangement;
- the harsh environments as a result of the postulated accidents or design basis accidents;
- the normal and accident safety functions;
- the thermocouple performance requirements;
- the mission times of the measurements; and
- the floor response spectrum for seismic qualification.

7.3.2 Repeatability (thermal shock)

The thermocouples shall successfully meet the acceptance criteria stated in the repeatability (thermal shock) test specified below.

Minimum and maximum temperatures (T_{min} and T_{max}) shall be specified. The thermocouple EMF is monitored during the test with a high resolution DC voltmeter (typically better than $\pm 0,05\%$).

The sensor shall be transferred between baths at T_{min} to T_{max} and back to T_{min} for 25 cycles. Each transfer shall be achieved in less than 5 s and the sensor shall remain immersed in the bath for a minimum of 60 s between transfers. The sensor may be mounted in the thermowell to be used for this test but shall be allowed to stabilize at each temperature for a minimum period of 1 min.

The number of cycles and the procedure may be specified jointly by the user and the manufacturer.

7.3.3 Vibration

The thermocouple shall successfully meet acceptance criteria for a mechanical endurance test (vibrations). The conditions of the test (frequency range, duration of one sweep cycle, type of frequency sweep, vibration level, and test duration) and the acceptance criteria should be defined according to the conditions and the application of the temperature measurement.

An example of a typical test procedure is given as follows:

The sensor is mounted in a fashion similar to the installation (in particular, the spring tension shall be identical to the installation) and heated at a specified temperature for the duration of the test. The sensor is then subjected to vibration in two planes in two separate runs: one perpendicular and one parallel to the sensor's longitudinal axis. An example of vibration conditions to be used for each run is given in Table 2.

Table 2 – Example of vibration test requirements

Frequency range	10 Hz - 5 000 Hz
Duration of one sweep cycle	10 Hz - 5 000 Hz - 10 Hz cycle in 1 h
Type of frequency sweep	Logarithmic
Vibration level	0,762 mm max. peak to peak, subject to 5 g max. peak
Test duration	2 h in each plane

The thermocouple EMF shall be continuously monitored on an oscilloscope for continuity and short circuits over the test run.

The sensor shall be disqualified unless all the following conditions are met:

- a) no short or open circuit is indicated;
- b) calibration at ice-point has shifted by no more than $\pm 0,2$ °C
- c) calibration at 100 °C has shifted by no more than $\pm 0,5$ °C, and
- d) the sensor meets the insulation resistance requirements (for insulated junction type thermocouple).

This vibration test is not intended to replace any seismic qualification test which may be called for by the user. If the thermocouple is required to perform any temperature measurement during and after a seismic event, see IEC 60980.

7.3.4 Steam test or high pressure hydraulic test

7.3.4.1 Steam test

This test concerns specific thermocouple assemblies which have to withstand such environmental conditions. It applies to the whole thermocouple assembly.

The thermocouple shall be tested to demonstrate that the measurements capability is kept after applying the test conditions. The assembly is exposed to saturated steam at 101 kPa $\pm$ 2,0 kPa for a period of 2 h. At the end of this period, the connector pins shall be dried.

The insulation resistance of insulated thermocouples shall be checked. The value shall be higher than 100 M Ω at 100 V.

7.3.4.2 High pressure hydraulic test

A high pressure hydraulic test may be performed in lieu of a steam test. The thermocouple is exposed for 2 h to a high hydraulic pressure in a test chamber. The pressure is fixed according to the operating conditions.

The insulation resistance of insulated thermocouples shall be checked. The value shall be higher than 100 MΩ.

7.3.5 Thermal cycling

The thermocouple shall be cycled between two stable temperatures for a specified number of complete cycles. The temperature range and number of cycles shall be agreeable to both the user and the manufacturer. Typical temperature range and number of cycles are between ambient temperature and T_{max} for 100 complete cycles.

The cycle speed may be chosen for convenience, the only requirement being that the sensor is allowed to stabilize at each temperature. Calibration at 0 °C shall be checked before and after the test. The calibration shall not shift more than 0,2 °C at 0 °C and 0,3 °C at 100 °C.

The insulation resistance of insulated thermocouples shall be checked. The value shall be higher than 100 MΩ.

7.3.6 Harsh environmental conditions qualification

Environment qualification for a plant accident scenario, such as a loss of coolant accident (LOCA) or a high-energy line break (HELB), shall be specified in the individual thermocouple specification sheets. Qualification shall be done in accordance with the technical specification as defined by the user. In the absence of any specific instruction from the user, the qualification tests shall be performed in accordance with the methods and procedures provided in IEC 60780.

Certain thermocouples with their cable connector assemblies may be used in nuclear safety I&C systems; they are required to perform their temperature measurement safety functions continuously throughout the defined mission time. If such a requirement is specified, the thermocouple with the complete assembly shall be subjected to a range of qualification tests. This is to demonstrate and to ensure that the thermocouple and its assembly is capable of performing its required functions under various operating and design basis accident conditions that may occur during the life of the plant.

For the laboratory to perform the qualification tests, the user shall define the normal operating environments of these thermocouples, harsh environments as a result of the postulated accidents or design basis accidents, normal and accident safety functions, the thermocouple performance, their mission times, and floor-response spectrum for seismic qualification, see IEC 60980.

The thermocouples specific for in-core measurements shall be qualified to their operating conditions (normal and accidental). That includes tests in reactor and tests in a test loop at the maximum temperature condition

7.4 Production tests

7.4.1 Manufacturing factors

Each thermocouple produced shall be subject to a sequence of tests to verify the quality of the manufacturing as defined in IEC 60737.

The following factors shall be considered in specifying a production program and a schedule of production tests:

- a) Manufacturing materials shall be approved. In particular, the surface of components shall be free from contamination by nuclear poisons such as boron, cadmium and gadolinium, by materials that may become a source of corrosion and by chemically reactive materials such as chlorine. Unacceptable lubricants and other injurious materials shall be excluded.

The materials used for the manufacture of cable and sensor sheaths shall be in accordance with the specification and shall be free from harmful defects which might shorten the sensor's useful life. The insulating materials shall have a composition designed to ensure high-insulation resistance, freedom from corrosion and acceptable irradiation performance throughout the sensor life.

- b) Cables shall be correctly processed and tested. This should include tests or evidence of conformity of materials to show
- heat treatment to ensure correct annealing and grain size;
 - tests to ensure conductor geometry;
 - sheath integrity tests to ensure freedom from holes;
 - sheath and conductor ductility tests;
 - tests to ensure correct conductor resistance and insulant insulation resistance;
 - tests for susceptibility to corrosion;
 - tests to ensure that the sheath has adequately uniform thickness and is free from sources of potential failures.

The method of the insulation resistance measurement shall be specified.

- c) Before assembly is started, an approved process shall be used to clean all sensors and cable sheaths. After cleaning, they shall be inspected for surface finish and leak tested to ensure integrity.
- d) Every completed sensor shall be calibrated and a test certificate supplied.
- e) The quality of the junction depends on the manufacturing process. The process should be validated by a metallographic examination of the junction on a sample.
- f) Every completed sensor and cable shall be labeled with its type, a serial number, the length of its cable and the name of the cable manufacturer. It shall be supplied in an approved container which will protect it during transport, storage and handling at the reactor site.
- g) Documentation, such as certificates of witnessed tests, etc., shall be agreed between the manufacturer and the purchaser. This documentation should make it possible to ensure compliance with this standard and other applicable or agreed standards which relate to materials and their purity.
- h) It is possible to damage mineral insulated cables by the application of excessive test voltages. The maximum test voltages to be used during insulation resistance measurements shall be specified.
- i) Thermocouples shall be made from approved cables. Conductor materials shall conform to appropriate thermocouple standards and the manufacturer should certify to the purchaser compliance with these requirements. Checks to verify the thermoelectric EMF of the conductors should be carried out.
- j) The welding of junctions and the closure of cable sheaths shall be carried out by approved processes. These should address the need to minimize exposure of the insulant to ambient moisture levels. Electrical insulation (if applicable), conductor loop resistance and radiographic tests including radiographs of the hot junction should be carried out on all units. Tests for metallurgical conditions such as metallographic examination or ductility and corrosion tests shall be carried out on a small sample basis.
- k) Both ends of the thermocouple shall be sealed before shipment.

7.4.2 Examination

The sensor shall be examined to comply with the criteria below:

- a) Workmanship – the sensor shall exhibit high-quality workmanship.
- b) Finish – pits, scratches or other defects outside the agreed tolerances shall be cause for rejection.
- c) Dimensions – all parts of the sensor shall be measured to ensure conformance to the approved drawing dimensions.
- d) Identification – the sensor shall be checked to ensure that all identification data required by this standard is present.

7.4.3 Identification

Each device shall be identified with the following information:

- manufacturer's name or identity;
- manufacturer's model and/or serial number;
- user's identification number(s).

The identification shall be made by electro-etching on a non-critical surface according to the acceptable quality assurance procedure. Also, when specified, each device shall show the code identity of the user, attached to the instrument in the form of a metal tag, wired securely to the device. The tag shall be brass or stainless steel.

8 Technical information required

The technical information required should include drawings of the thermocouple, clearly showing dimensions, internal wiring diagrams, materials used and internal construction, as well as information regarding dimensions of supports, mounting arrangements, and electrical connections.

The thermocouple manual shall consist of, as a minimum, the following information:

- descriptive data on the equipment;
- applicable drawings;
- internal wiring diagrams;
- specifications;
- production test results;
- qualification test results, as applicable; and
- a detailed parts list.

The NPP shall maintain up-to-date manuals for the duration of the station life or for the operating life of the thermocouple, as appropriate.

A performance specification for the thermocouple may include the following:

- type and range of measurement;
- nominal calibration curve and accuracy;
- depth of immersion;
- thermal response time with thermowell;
- insulation resistance in case of insulated thermocouple;
- qualified service conditions;
- environmental and seismic qualification, as applicable;
- any other pertinent data, such as electrical characteristics.

A description of the quality assurance program and an outline plan for quality control of the thermocouple production may be filed together with the performance specification.

Bibliography

IAEA NS-G-1.3, *Instrumentation and Control Systems Important to Safety in Nuclear Power Plants*

IAEA SSR 2/1:2011, *Safety of Nuclear Power Plants: Design*

IAEA GS-R-3:2006, *The management system for facilities and activities*

“Modern Power Station Practice”, volume F chapter 4, Pergamon Press, Third Edition, 1992.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	34
INTRODUCTION.....	36
1 Domaine d'application	38
2 Références normatives	38
3 Termes et définitions	39
4 Liste des abréviations.....	41
5 Principe de fonctionnement d'un thermocouple	41
5.1 Généralités.....	41
5.2 Types de thermocouples utilisables pour des applications nucléaires	43
5.2.1 Généralités.....	43
5.2.2 Type K.....	44
5.2.3 Type T	44
5.2.4 Type J	44
5.2.5 Type N	44
5.2.6 Type E.....	44
5.2.7 Type C	44
5.2.8 Thermocouples réalisés à partir de métaux nobles (Type S,R,B)	44
6 Technologie d'assemblage des thermocouples	45
6.1 Assemblage thermocouple	45
6.1.1 Généralités.....	45
6.1.2 Contact direct.....	46
6.1.3 Immersion directe	46
6.1.4 Montage en doigt de gant	46
6.2 Performances	46
6.2.1 Précision	46
6.2.2 Gamme de mesures	46
6.2.3 Temps de réponse.....	46
6.2.4 Fiabilité	46
6.3 Exigences de conception et de fabrication	47
6.3.1 Généralités.....	47
6.3.2 Jonctions de référence	47
6.3.3 Principes de fabrication	47
6.3.4 Matériaux de fabrication	48
6.3.5 Résistance d'isolement (thermocouple non mis à la terre)	49
6.3.6 Interchangeabilité – Remplacement	49
6.4 Installation de l'assemblage thermocouple	50
6.4.1 Exigences d'installation	50
6.4.2 Installation d'un doigt de gant.....	50
6.4.3 Connexions	51
6.5 Caractéristiques opérationnelles des thermocouples	52
6.5.1 Considérations générales sur l'utilisation des thermocouples.....	52
6.5.2 Conditions d'ambiance (fonctionnements normal et accidentel)	52
6.5.3 Défaut d'homogénéité métallurgique.....	52
6.5.4 Corrosion.....	53
6.5.5 Stabilité du thermocouple	53
6.5.6 Phénomène de travail à froid	53

7	Essais	54
7.1	Généralités.....	54
7.2	Essais de performance et essais de pré production	54
7.2.1	Généralités.....	54
7.2.2	Etalonnage	54
7.2.3	Temps de réponse.....	55
7.2.4	Essais de résistance d'isolement électrique	55
7.3	Essais de qualification (essais de type)	55
7.3.1	Généralités.....	55
7.3.2	Répétabilité (chocs thermiques)	56
7.3.3	Vibrations	57
7.3.4	Essai vapeur ou essai hydraulique haute pression.....	57
7.3.5	Cycles thermiques	58
7.3.6	Qualification aux conditions environnementales hostiles	58
7.4	Essais de production	59
7.4.1	Caractéristiques de fabrication	59
7.4.2	Examen	60
7.4.3	Identification.....	60
8	Informations techniques demandées.....	60
	Bibliographie.....	62
	Figure 1 – Schéma représentant un thermocouple	42
	Figure 2 – Structures électriques d'un thermocouple	45
	Figure 3 – Installation d'un thermocouple dans un doigt de gant	51
	Tableau 1 – Liste des thermocouples et de leurs utilisations possibles en centrale nucléaire.....	43
	Tableau 2 – Exemple d'exigences portant sur l'essai de vibration	57

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CENTRALES NUCLÉAIRES DE PUISSANCE – INSTRUMENTATION IMPORTANTE POUR LA SÛRETÉ – THERMOCOUPLES: CARACTÉRISTIQUES ET MÉTHODES D'ESSAI

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de la CEI. La CEI n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de brevet. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 62651 a été établie par le sous-comité 45A: Instrumentation et contrôle-commande des installations nucléaires, du comité d'études 45 de la CEI: Instrumentation nucléaire.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
45A/904/FDIS	45A/920/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de la CEI sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

INTRODUCTION

a) Contexte technique, questions importantes et structure de la présente norme

La présente norme CEI s'intéresse plus particulièrement aux caractéristiques des thermocouples et aux méthodes d'essai applicables à ceux-ci.

L'objectif de la présente norme est d'être utilisée par les exploitants de centrales nucléaires, les évaluateurs et les concepteurs de système et par les régulateurs.

b) Position de la présente norme dans la collection de normes du SC 45A de la CEI

La CEI 62651 est le document du SC 45A de la CEI de troisième niveau qui traite du problème générique de conception et de qualification des thermocouples. Elle fournit les informations techniques de base relatives à la nature et à l'utilisation des thermocouples. Elle fournit des informations en ce qui concerne le choix du type de thermocouples à faire pour un réacteur nucléaire. Elle établit des exigences détaillées pour les essais de type et les essais de fabrication.

La CEI 62651 doit être lue avec la CEI 60737 qui est le document approprié établissant des recommandations pour les capteurs de température utilisables en général dans les applications relatives aux réacteurs nucléaires et avec la CEI 60780 pour les aspects concernant la qualification des matériels. Les autres normes CEI généralement applicables pour les thermocouples sont citées à l'Article 2. Les références des documents de l'AIEA ainsi que de documents pertinents relatifs au contexte se trouvent dans la bibliographie.

Pour plus de détails sur la collection de normes du SC 45A de la CEI, voir le point d) de cette introduction.

c) Recommandations et limites relatives à l'application de présente norme

Il est important de noter que la présente norme n'établit pas d'exigence fonctionnelle supplémentaire pour les systèmes de sûreté.

La présente norme fournit des recommandations particulières pour les aspects suivant:

- les types de thermocouples adaptés aux applications concernant les réacteurs nucléaires,
- les dispositions de montages courants,
- l'utilisation de jonction de référence froide ou chaude et de câble de compensation,
- les aspects mécaniques et métallurgiques à prendre en compte,
- l'utilisation et les types de joint pour les terminaisons froides,
- l'installation,
- les essais.

Afin d'assurer la pertinence de la présente norme pour les années à venir, l'accent est mis sur les questions de principes plutôt que sur les technologies particulières.

d) Description de la structure de la collection des normes du SC 45A de la CEI et relations avec d'autres documents de la CEI, et d'autres organisations (AIEA, ISO)

Le document de niveau supérieur de la collection de normes produites par le SC 45A de la CEI est la CEI 61513. Cette norme traite des exigences relatives aux systèmes et équipements d'instrumentation et de contrôle-commande (systèmes d'I&C) utilisés pour

accomplir les fonctions importantes pour la sûreté des centrales nucléaires, et structure la collection de normes du SC 45A de la CEI.

La CEI 61513 fait directement référence aux autres normes du SC 45A de la CEI traitant de sujets génériques, tels que la catégorisation des fonctions et le classement des systèmes, la qualification, la séparation des systèmes, les défaillances de cause commune, les aspects logiciels et les aspects matériels relatifs aux systèmes programmés, et la conception des salles de commande. Il convient de considérer que ces normes, de second niveau, forment, avec la norme CEI 61513, un ensemble documentaire cohérent.

Au troisième niveau, les normes du SC 45A de la CEI, qui ne sont généralement pas référencées directement par la norme CEI 61513, sont relatives à des matériels particuliers, à des méthodes ou à des activités spécifiques. Généralement ces documents, qui font référence aux documents de deuxième niveau pour les activités génériques, peuvent être utilisés de façon isolée.

Un quatrième niveau qui est une extension de la collection de normes du SC 45A de la CEI correspond aux rapports techniques qui ne sont pas des documents normatifs.

La CEI 61513 a adopté une présentation similaire à celle de la CEI 61508, avec un cycle de vie de sûreté d'ensemble et un cycle de vie de sûreté des systèmes. Au niveau sûreté nucléaire, elle est l'interprétation des exigences générales des CEI 61508-1, CEI 61508-2 et CEI 61508-4 pour le secteur nucléaire, pour ce qui concerne le domaine de la sûreté nucléaire. Dans ce domaine, la CEI 60880 et la CEI 62138 correspondent à la CEI 61508-3 pour le secteur nucléaire. La CEI 61513 fait référence aux normes ISO ainsi qu'aux documents AIEA GS-R-3 et AIEA GS-G-3.1 pour ce qui concerne l'assurance qualité.

Les normes produites par le SC 45A de la CEI sont élaborées de façon à être en accord avec les principes de sûreté fondamentaux du Code AIEA sur la sûreté des centrales nucléaires, ainsi qu'avec les guides de sûreté de l'AIEA, en particulier avec la norme AIEA SSR 2/1 qui établit les exigences de sûreté relatives à la conception des centrales nucléaires et avec le guide de sûreté NS-G-1.3 qui traite de l'instrumentation et du contrôle commande importants pour la sûreté des centrales nucléaires. La terminologie et les définitions utilisées dans les normes produites par le SC 45A sont conformes à celles utilisées par l'AIEA.

NOTE Il est fait l'hypothèse que pour la conception des systèmes d'I&C qui sont supports de fonctions de sûreté conventionnelle (par exemple pour garantir la sécurité des travailleurs, la protection des biens, la prévention contre les risques chimiques, la prévention contre les risques liés au procédé énergétique) on applique des normes nationales ou internationales, dont les exigences sont comparables à des normes telles que la CEI 61508.

CENTRALES NUCLÉAIRES DE PUISSANCE – INSTRUMENTATION IMPORTANTE POUR LA SÛRETÉ – THERMOCOUPLES: CARACTÉRISTIQUES ET MÉTHODES D'ESSAI

1 Domaine d'application

La présente Norme Internationale établit des exigences applicables aux thermocouples utilisables dans le cadre d'applications destinées aux centrales nucléaires de puissance. Les thermocouples sont très largement utilisés dans les centrales nucléaires de puissance en même temps que d'autres instruments de mesure de température tels que les sondes de température à résistance (SR). Les thermocouples sont simples et robustes et présentent certaines caractéristiques particulières (gamme de mesures et température maximale) qui font qu'ils sont les seuls à pouvoir réaliser certaines mesures.

Les exigences fournies dans cette norme concernent la conception, les matériaux, la fabrication, les essais, l'étalonnage, l'achat et l'inspection des thermocouples eux-mêmes.

Le domaine d'application de la présente norme ne couvre pas la conception, le choix des matériaux et la fabrication des doigts de gant, des tubes guide, des câbles d'extension et des capteurs ou de ponts de température qui peuvent être associés aux thermocouples.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CEI 60584-1:1995, *Couples thermoélectriques – Partie 1: Tables de référence*

CEI 60584-2:1982, *Couples thermoélectriques – Partie 2: Tolérances*
Amendement 1:1989

CEI 60584-3:2007, *Couples thermoélectriques – Partie 3: Câbles d'extension et de compensation – Tolérances et système d'identification*

CEI 60737:2010, *Centrales nucléaires de puissance – Instrumentation importante pour la sûreté – Capteurs de température (dans le cœur et le circuit primaire) – Caractéristiques et méthodes d'essai*

CEI 60780, *Centrales nucléaires – Equipements électriques de sûreté – Qualification*

CEI 60980, *Pratiques recommandées pour la qualification sismique du matériel électrique du système de sûreté dans les centrales électronucléaires*

CEI 61513, *Centrales nucléaires de puissance – Instrumentation et contrôle-commande importants pour la sûreté – Exigences générales pour les systèmes*

CEI 61515:1995, *Câbles et couples thermoélectriques à isolation minérale dits 'chemisés'*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document les termes et définitions suivants s'appliquent.

3.1

exactitude de mesure

étroitesse de l'accord entre une mesure et la valeur conventionnellement vraie du mesurande

Note 1 à l'article: »L'exactitude" est un concept qualitatif.

Note 2 à l'article: Il convient que le terme «précision» ne soit pas employé à la place de «exactitude».

[SOURCE: CEI 60050-394:2007, 394-40-35]

3.2

étalonnage

ensemble des opérations établissant, dans des conditions spécifiées, la relation entre les valeurs de la grandeur indiquées par un appareil de mesure ou un système de mesure, ou les valeurs représentées par une mesure matérialisée ou par un matériau de référence, et les valeurs correspondantes de la grandeur réalisées par des étalons

[SOURCE: CEI 60050-394:2007, 394-40-43]

3.3

jonction de référence

jonction du couple thermoélectrique qui est à une température connue (température de référence), à laquelle est comparée la température à mesurer

Note 1 à l'article: La jonction de référence est aussi appelée jonction froide.

[SOURCE: CEI 60584-1:1995, définition 2.4]

3.4

dérive

variation de la sortie d'un capteur ou d'une chaîne d'instrumentation qui peut survenir entre deux opérations d'étalonnage et qui n'est pas due à l'évolution d'une variable du procédé ou des conditions d'environnement

[SOURCE: CEI 62385:2007, définition 3.7]

3.5

jonction de mesure

jonction bimétallique située au point de mesure de la température. La seconde jonction est située à la température de référence

Note 1 à l'article: La jonction de mesure est aussi appelée la jonction chaude.

3.6

surveillance des performances

vérification des performances

processus permettant de démontrer qu'une chaîne d'instrumentation continue d'assurer la fonction attendue de surveillance d'une variable du procédé avec la précision, le temps de réponse et la stabilité souhaités

[SOURCE: CEI 62385:2007, définition 3.13]

3.7

temps de réponse

temps nécessaire séparant l'instant où la sortie d'un composant atteint un état spécifié et l'instant où le composant a reçu le signal qui lui impose de rejoindre cet état de sortie

[SOURCE: Glossaire de sûreté de l'AIEA, édition 2007]

3.8

câbles d'extension et de compensation

câbles utilisés pour les connexions électriques entre les terminaisons ouvertes d'un couple thermoélectrique et la jonction de référence dans les installations où les conducteurs du couple thermoélectrique ne sont pas connectés directement à la jonction de référence. Les propriétés thermoélectriques des câbles d'extension et de compensation doivent être proches de celles du couple thermoélectrique correspondant.

[SOURCE: CEI 60584-3:2007, définition 3.1]

3.9

câbles d'extension

câbles fabriqués à partir d'un conducteur ayant la même composition nominale que ceux du couple thermoélectrique correspondant. Ils sont désignés par la lettre "X" suivant la désignation du couple thermoélectrique, par exemple "JX".

[SOURCE: CEI 60584-3:2007, définition 3.1.1]

3.10

câbles de compensation

câbles fabriqués à partir de conducteurs ayant une composition différente de celle du couple thermoélectrique correspondant. Ils sont désignés par la lettre "C" suivant la désignation du couple thermoélectrique, par exemple "KC". Dans certains cas, des tolérances différentes sont applicables pour le même couple thermoélectrique dans des gammes de températures différentes. Elles sont distinguées par une lettre supplémentaire, par exemple "KCA" et "KCB".

[SOURCE: CEI 60584-3:2007, définition 3.1.2]

3.11

thermocouple

couple thermoélectrique

paire de conducteurs de matériaux différents assemblés à l'une de leurs extrémités, afin de former un ensemble utilisable pour la mesure de température par effet thermoélectrique

[SOURCE: CEI 60584-2:1982, définition 2.2]

3.12

ensemble thermocouple

montage utilisé pour la mesure de température comprenant un couple de jonctions (une jonction chaude et une jonction froide), des câbles, des connecteurs et un système de mesure électronique pour les très basses tensions

3.13

doigt de gant

enveloppe de protection de sonde à résistance, de thermocouples, ou d'autres capteurs de température. Le doigt de gant est utilisé pour faciliter le remplacement des capteurs de température

[SOURCE: CEI 62385:2007, définition 3.19]

3.14

constante de temps

dans le cas d'un système du premier ordre, temps nécessaire pour que la sortie d'un système atteigne 63,2 % du niveau de sortie final après un échelon d'entrée. Si le système n'est pas du premier ordre, l'expression constante de temps n'a pas de sens. Le terme le plus approprié pour les systèmes d'un ordre supérieur est temps de réponse.

[SOURCE: CEI 62385:2007, définition 3.20]

3.15

effet thermoélectrique (Seebeck)

l'effet thermoélectrique consiste en la production d'une force électromotrice FEM, créée par la différence de température entre les deux liaisons de métaux ou d'alliages différents constituant un même circuit

[SOURCE: CEI 60584-2:1982, définition 2.1]

4 Liste des abréviations

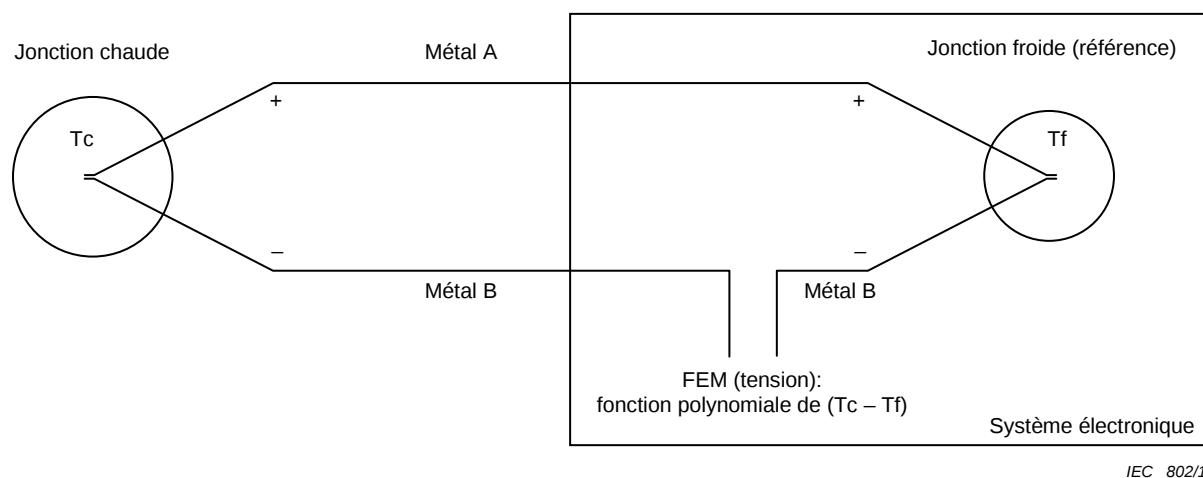
FEM	Force électromotrice
HELB	Rupture de tuyauterie de haute énergie (High Energy Line Break)
APRP	Accident de Perte du Réfrigérant Primaire
CNP	Centrale Nucléaire de Puissance
AQ	Assurance Qualité
SR	Sonde de température à résistance

5 Principe de fonctionnement d'un thermocouple

5.1 Généralités

Lorsque deux fils constitués de métaux différents sont en contact (par soudage ou aux bornes) à leurs deux extrémités, une faible tension dont le niveau dépend de la différence entre les températures aux extrémités des fils, apparaît au niveau de la boucle, comme cela est représenté par la Figure 1. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet Seebeck. C'est le principe de base utilisé pour mesurer la température à l'aide de thermocouple.

Le métal constituant l'un des fils est électriquement positif comparé à l'autre.



Légende

T_c température de la jonction chaude

T_f température de la jonction froide

Figure 1 – Schéma représentant un thermocouple

L'extrémité, objet de la mesure, est appelée «jonction chaude» et l'autre extrémité à la température de référence est appelée «jonction froide». Un système électronique mesure la tension et la convertit pour fournir une valeur de température par rapport à la température de référence qui elle est mesurée sur la base d'un autre principe. La relation entre le signal FEM du thermocouple et la température procédé est une combinaison polynomiale dont les coefficients sont fournis dans le Tableau 1 de la CEI 60584-1:1995. Généralement la tension produite par les thermocouples de type K est de l'ordre de $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ correspondant à une source électrique présentant l'impédance de la boucle formée par les deux fils métalliques.

La FEM et donc la sensibilité et la gamme de mesures dépendent de la nature des métaux. Même si toutes les combinaisons de métaux sont possibles, seules certaines particulières sont choisies, définissant ainsi une gamme limitée des types de thermocouple. Chaque type de thermocouple est défini en fonction de trois classes de tolérance: Classe 1, 2 ou 3. Chaque classe correspond à un niveau de tolérance et une gamme associée pour laquelle ces tolérances sont valides.

La CEI 60584-2 fournit les exigences détaillées applicables aux classes de tolérance.

La CEI 61515 fournit les exigences générales applicables aux thermocouples et aux câbles présentant une isolation minérale.

Du fait des conditions d'ambiance prévalant dans une centrale nucléaire de puissance, seule l'utilisation de certains types de thermocouples est recommandée.

Le Tableau 1 donne les types de thermocouples les plus communs. La gamme de températures donnée correspond à la superposition des trois classes de tolérance comme cela est décrit par la CEI 60584-2.

Tableau 1 – Liste des thermocouples et de leurs utilisations possibles en centrale nucléaire

Type	Métal/Alliage positif	Métal/Alliage négatif	Gamme de températures classique °C	Exemple d'application
K	Nickel – Chrome	Nickel – Aluminium	–200 à +1 150	Circuit primaire REP
T	Cuivre	Cuivre – Nickel	–200 à +350	Pas en présence de flux neutroniques
J	Fer	Cuivre – Nickel	–40 à +750	Pas en présence de flux neutroniques
N	Nickel – Chrome- Silicium	Nickel – Silicium	–200 à +1 200	Température du combustible
E	Nickel – Chrome	Cuivre – Nickel	–200 à +750	Pas en présence de flux neutroniques
C	Tungstène – Rhénium (5 %)	Tungstène – Rhénium (26 %)	0 à +2 300	Pas en présence de flux neutroniques
R	Platine – Rhodium (13 %)	Platine	0 à +1 700	Pas en présence de flux neutroniques
S	Platine – Rhodium (10 %)	Platine	0 à +1 700	Pas en présence de flux neutroniques
B	Platine – Rhodium (30 %)	Platine – Rhodium (6 %)	+600 à +1 820	Pas en présence de flux neutroniques

Certains autres types de thermocouples, réalisés à base de Molybdène – Niobium (MoNb) ou de leurs alliages, peuvent être considérés pour des applications nécessitant un niveau de performance élevé.

Les catégories (T, J, E, C, R, S, B) sont seulement décrites à titre informatif en 5.2.

En règle générale seuls les types K, N et E sont utilisés pour les applications nucléaires, en fonction des limitations en termes d'exposition aux flux neutroniques indiquées par le Tableau 1.

5.2 Types de thermocouples utilisables pour des applications nucléaires

5.2.1 Généralités

Pour les applications nucléaires, et en particulier pour les mesures dans et sur le circuit primaire du réacteur, on doit utiliser des thermocouples conçus de façon robuste et réalisés avec un niveau de qualité élevé. Ceux-ci sont protégés par des gaines métalliques et comportent une isolation minérale.

Les thermocouples sont utilisés sur les réacteurs nucléaires à eau pour la mesure de la température de sortie des assemblages combustibles, ce qui est particulièrement important pour les conditions hors dimensionnement. Ils peuvent être utilisés dans des sondes mobiles au niveau des assemblages combustibles des réacteurs nucléaires à eau, ceci souvent dans un but d'étalonnage. Ils sont utilisés sur les réacteurs nucléaires refroidis par gaz pour mesurer la température du combustible et la température en sortie des assemblages combustibles, pour la protection et la conduite du réacteur. Ils sont aussi utilisés pour mesurer la température du modérateur et celle des structures de support du cœur.

Plus de détails sont fournis par la CEI 60737.

5.2.2 Type K

Les thermocouples de type K sont les plus largement utilisés. La courbe de leur signal de tension de sortie est pratiquement linéaire par rapport à la température et présente une bonne sensibilité. Les thermocouples de type K peuvent être utilisés pour des températures allant jusqu'à 1 150 °C, et pendant de courtes périodes pour des températures allant jusqu'à 1 250 °C en fonction du matériau de gainage et du diamètre.

5.2.3 Type T

Ces thermocouples ne sont pas communément utilisés. Leur gamme de températures de fonctionnement limitée va de –200 °C à +350 °C. Ils sont utilisés dans des conditions d'ambiance humide ou correspondant à des températures négatives du fait de leur bonne résistance à la corrosion et de la plus grande homogénéité des fils les composant, ce qui réduit les erreurs provoquées par les variations de température.

5.2.4 Type J

Les thermocouples de type J ont une gamme de températures de fonctionnement limitée de –40 °C à +750 °C. Leur sensibilité peut aller jusqu'à 55 µV/°C et leur signal de sortie peut être affecté par la contamination du fer. Leur utilisation n'est pas recommandée pour les applications nucléaires.

5.2.5 Type N

Les thermocouples de ce type présentent une bonne stabilité thermoélectrique. Ils offrent une excellente résistance à l'oxydation à haute température. Ils sont bien adaptés aux mesures précises dans l'air jusqu'à 1 200 °C. Dans le vide ou en atmosphère contrôlée, ils résistent jusqu'à des températures avoisinant les 1 300 °C en fonction du matériau de gainage et du diamètre.

En présence de rayonnements, les thermocouples de type N sont plus stables que les thermocouples réalisés à partir de métaux nobles (S ou B), par contre ils sont moins stables à haute température sans présence de rayonnement. Leur dérive dépend du matériau employé pour la gaine et de la température. Sous certaines conditions les thermocouples de type K sont plus stables que ceux de type N.

5.2.6 Type E

Grace à leur sensibilité élevée, les thermocouples de type E sont principalement utilisés pour les mesures cryogéniques. Comme ils sont amagnétiques, leur emploi peut être préféré pour des applications particulières.

5.2.7 Type C

Les thermocouples de type C sont principalement utilisés pour mesurer des températures élevées, en particulier pour les applications nucléaires non soumises à des flux neutroniques.

5.2.8 Thermocouples réalisés à partir de métaux nobles (Type S,R,B)

Les thermocouples réalisés à partir de métaux nobles sont dédiés à la mesure des températures élevées (au dessus de 1 500 °C). Le platine pur ou l'alliage platine/rhodium produisent des tensions de jonction plus faibles que celle produites par des métaux communs. Ces thermocouples s'activent et leur utilisation n'est pas recommandée pour des applications nucléaires.

6 Technologie d'assemblage des thermocouples

6.1 Assemblage thermocouple

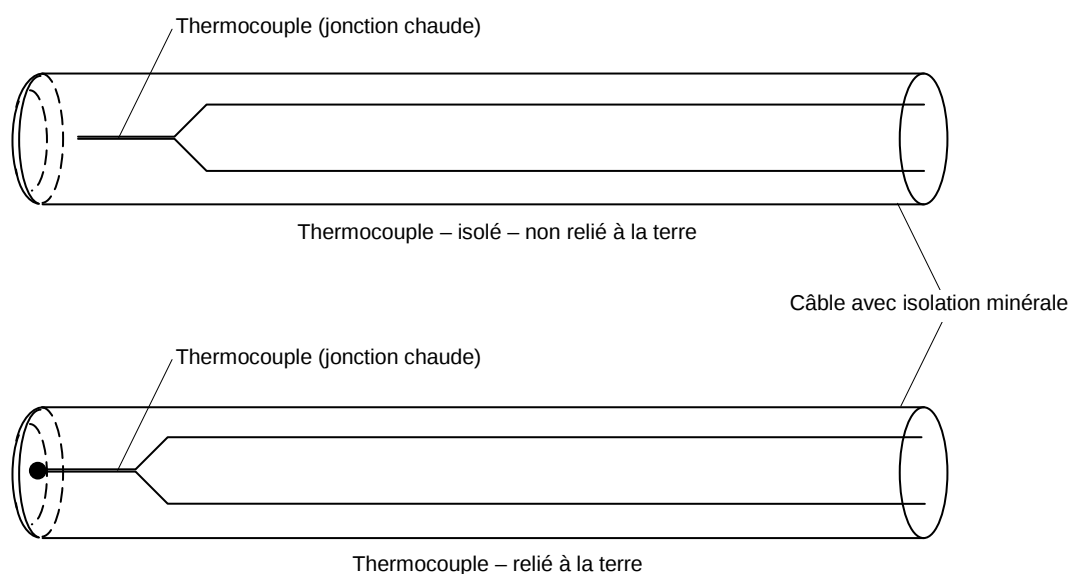
6.1.1 Généralités

Un thermocouple est un élément sensible qui produit un signal électrique faible en fonction de la température. Il peut être utilisé en association avec des composants électriques et mécaniques (doigt de gant, câble, boîte de connexion), pour le maintenir en position, pour le protéger et pour le brancher à des appareils électroniques de traitement du signal. L'ensemble de ces composants forment l'assemblage thermocouple. La présente norme s'intéresse aux assemblages thermocouple et à leur utilisation dans les centrales nucléaires de puissance.

La structure de base d'un thermocouple utilisé en centrale nucléaire se présente sous la forme d'un câble à isolant minéral avec une jonction thermocouple à l'extrémité. Deux types de structure sont possibles:

- une structure isolée ou non connectée à la terre lorsque le thermocouple n'est pas en contact électrique avec la gaine,
- une structure mise à la terre lorsque le thermocouple est en contact direct avec l'enveloppe de la gaine.

La Figure 2 présente les deux structures possibles pour un thermocouple.



IEC 803/13

Figure 2 – Structures électriques d'un thermocouple

En fonction de la nature des substances dont on mesure la température (gaz, liquide, solide) et des conditions de mesure (fixes, débit, conditions électriques), les montages mécaniques varieront en fonction:

- de la mise en contact direct avec le composant;
- de l'immersion directe;
- de la protection dans un support métallique (doigt de gant).

6.1.2 Contact direct

L'extrémité du thermocouple est soudée ou fixée à la surface métallique du composant. Ceci est le montage classique pour thermocouple utilisé dans le cœur pour la mesure de la température dans le cœur à la surface des éléments combustibles.

6.1.3 Immersion directe

Le thermocouple est en contact direct avec le fluide dont il mesure la température.

6.1.4 Montage en doigt de gant

Dans le cas de la mesure de la température du fluide d'un circuit, le thermocouple est généralement glissé dans un support protecteur appelé doigt de gant.

L'utilisation d'un doigt de gant facilite tous les remplacements du thermocouple.

Le contact mécanique de l'extrémité du thermocouple avec l'enveloppe du doigt de gant est important en ce qui concerne la précision et le temps de réponse.

6.2 Performances

6.2.1 Précision

La précision des thermocouples dépend des caractéristiques des matériaux eux-mêmes ainsi que de la précision de la mesure de la température de la jonction froide. La CEI 60584-2 spécifie la valeur de la déviation pouvant affecter la mesure par rapport au comportement idéal et ceci pour chaque type de thermocouple. Trois classes de tolérance sont définies par le Tableau 1 fourni dans la CEI 60584-2:1982. La classe de tolérance d'un thermocouple dépend du procédé de fabrication.

6.2.2 Gamme de mesures

La gamme de mesures est donnée par le type du thermocouple comme indiqué ci-dessus. La gamme varie conformément à la classe de tolérance indiquée dans la CEI 60584-2.

6.2.3 Temps de réponse

Le temps de réponse d'un assemblage thermocouple dépend de sa structure y compris celle du doigt de gant.

Le temps de réponse d'un thermocouple dépend du diamètre des fils, de la masse des matériaux entourant la jonction et de l'efficacité de cette masse à conduire la chaleur de la surface externe aux fils correspondant aux éléments sensibles. La forme d'un thermocouple peut être déterminée pour réduire au maximum l'inertie thermique et diminuer le temps de réponse.

Pour les applications destinées aux centrales nucléaires de puissance, les exigences relatives au temps de réponse doivent être spécifiées par rapport aux fonctions à réaliser.

6.2.4 Fiabilité

Les exigences de fiabilité applicables aux thermocouples utilisés pour des fonctions de sûreté sont définies à partir des exigences de fiabilité portant sur les systèmes de sûreté. Le retour d'expérience acquis sur des thermocouples fabriqués soigneusement avec une Assurance Qualité et des exigences de contrôle qualité de niveau élevé montre que la fiabilité de ces thermocouples est élevée. Il convient que les durées de vie de conception des thermocouples fonctionnant au sein de systèmes de sûreté soient définies. Les montages associés aux thermocouples dont la durée de vie à la conception est inférieure à la durée de vie de la

centrale nucléaire doivent permettre le remplacement de ces thermocouples ou leur réévaluation avant la fin de leur durée de vie.

6.3 Exigences de conception et de fabrication

6.3.1 Généralités

Les thermocouples et les composants associés doivent satisfaire aux exigences décrites dans la présente norme et dans la CEI 60737. Les exigences de sûreté ou autre, relatives à l'application doivent être déterminées conformément aux exigences et aux pratiques nationales et internationales, ceci comprenant la CEI 61513.

6.3.2 Jonctions de référence

Un thermocouple est un système de type différentiel qui produit un signal électrique en fonction de la différence de température entre la jonction chaude (à mesurer) et la jonction froide (la référence). Généralement la jonction froide n'est pas maintenue à une température donnée mais la température est mesurée à la jonction froide et cette mesure est utilisée pour réaliser la compensation relative à température de la jonction froide pour calculer la température du procédé à la jonction de mesure.

6.3.3 Principes de fabrication

Les thermocouples fournis peuvent présenter différentes structures constitutives internes, qui dépendent de la fabrication, des exigences de qualification et des applications. Pour les thermocouples employés dans les centrales nucléaires de puissance, il convient que la conception et les structures des thermocouples prennent en compte les conditions environnementales dans lesquelles les capteurs sont utilisés en conditions de fonctionnement normal et en conditions d'accident de dimensionnement, ainsi que les essais de qualification spécifiés par l'utilisateur. On utilise généralement un câble à isolant minéral entre le thermocouple et le connecteur, mais l'utilisateur peut aussi retenir un autre principe de construction. Une variante de conception est possible avec l'utilisation d'une gaine rigide externe enveloppant le câble minéral entre le thermocouple et le connecteur, cette gaine étant soudée au connecteur.

Les thermocouples peuvent être fabriqués en adoptant des formes différentes qui dépendent des conditions de mesure.

Trois types de thermocouples sont généralement utilisés:

- Thermocouple simple: les fils ne sont pas protégés et sont séparés l'un de l'autre, la jonction chaude est simplement fixée ou soudée à la surface du composant. Ce type de thermocouples n'est généralement pas utilisé en centrale nucléaire.
- Thermocouple présentant une jonction chaude mise à la terre: les fils sont isolés l'un de l'autre (sauf à la jonction elle-même) et sont glissés dans une gaine métallique protectrice. La jonction chaude est branchée électriquement à la gaine métallique protectrice.
- Thermocouple présentant une jonction chaude isolée (à savoir non mise à la terre): les fils sont isolés l'un de l'autre (sauf à la jonction elle-même) et sont glissés dans une gaine métallique protectrice. La jonction chaude est isolée électriquement de la gaine métallique protectrice.

Les méthodes de fabrication des jonctions de mesure sont les suivantes:

- jonction exposée – le thermocouple est fabriqué avec la jonction qui se prolonge sans protection en dehors de la gaine et de l'isolation, de tels montages ne sont généralement pas utilisés;
- jonction mise à la terre – les conducteurs sont soudés au bouchon terminal, qui est soudé à la gaine pour la fermer;

- jonction non reliée à la terre ou isolée – le thermocouple est fabriqué et sa jonction chaude est placée en un point du bouchon terminal de la gaine qui fait l'objet de surveillance.

La protection de la jonction de mesure par une gaine présente les avantages suivants:

- Les conducteurs sont protégés des conditions d'ambiance.
- L'isolation est protégée de l'humidité.
- Les conducteurs ne subissent pas de dommage mécanique.

Les jonctions isolées ou non mises à la terre présentent les avantages suivants:

- La dilatation différentielle entre les conducteurs et la gaine ne produit pas de contrainte sur les conducteurs.
- Le thermocouple est protégé des défauts de mise à la terre.
- Les problèmes liés aux interférences de signaux entre thermocouples mis à la terre peuvent être éliminés.

6.3.4 Matériaux de fabrication

6.3.4.1 Conducteurs des thermocouples

Les fils conducteurs utilisés pour les thermocouples doivent être soigneusement identifiés et indiqués dans la documentation. La taille choisie pour les conducteurs est un compromis. Il convient de prendre en compte:

- la tenue mécanique;
- la tolérance à l'oxydation;
- une résistance minimale de la boucle;
- la réduction de la conduction thermique à partir de la jonction chaude;
- la résistance aux rayonnements;
- le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre thermique.

6.3.4.2 Réalisation des câbles

Les fils conducteurs des thermocouples sont insérés dans un isolant minéral et maintenus dans une gaine tubulaire métallique. L'ensemble est alors réduit en diamètre par étirement, emboutissage, ou formage qui compactent l'isolant et suppriment les vides.

Suivant le type de mesure nécessaire, la conception des câbles peut différer de manière significative.

La méthode de fabrication et les vérifications de la qualité employées doivent être suffisantes pour garantir que la géométrie du thermocouple est contrôlée de façon appropriée. Ceci comprend l'espacement des conducteurs, la symétrie, la position de la jonction et l'absence de vide au niveau de l'isolant.

Les caractéristiques des câbles comprennent:

- la qualité de l'isolation à teneur élevée en magnésie utilisée,
- le diamètre externe normalisé des câbles,
- l'aptitude des câbles à subir des essais de pression particuliers,
- les matériaux de gainage utilisés, tels que l'alliage chrome-nickel, sur lesquels les températures du combustible sont mesurées et qui ont la même composition que les gaines des éléments combustibles.

6.3.4.3 Joints et adhésifs

Les thermocouples gainés (voir 6.3.3) doivent être fermés hermétiquement. Les connecteurs peuvent ou non faire partie intégrante de l'assemblage thermocouple. Les thermocouples utilisés en environnement hostile, par exemple sous haute température ou en présence de rayonnements, doivent être conçus sans recourir à l'utilisation de matériaux organiques. L'utilisation de matériaux minéraux est recommandée. La perte d'étanchéité au niveau des extrémités isolantes doit être testée conformément aux procédures appropriées et éprouvées. Les joints généralement recommandés pour les connecteurs sont du type verre-métal ou céramique-métal; ceux-ci présentent un taux de fuite inférieur à 10^{-8} cm³/s pour des essais réalisés avec de l'hélium sous une pression différentielle atmosphérique.

Tous les ciments, adhésif ou joints utilisés doivent être capables de résister aux conditions de fonctionnement en service sans dégradation fonctionnelle et sans émission de gaz. Tous les matériaux non métalliques, utilisés pour réaliser des joints, pour réaliser une finition de protection, doivent être résistants à l'humidité et au feu. Les champignons ne doivent pas pouvoir se développer sur ces matériaux non métalliques et ils doivent supporter les conditions ambiantes spécifiées au niveau des exigences de performances de la présente norme sans se dégrader.

6.3.4.4 Fermeture de la gaine

Il convient que la fermeture de la gaine à la jonction de mesure soit assurée par soudure à l'argon d'un bouchon du même métal que la gaine. Ceci permet de remplir les vides dans l'isolant avant que la gaine ne soit fermée. Pour les diamètres inférieurs à 1,5 mm la soudure à l'arc sous plasma peut être utilisée sans bouchon en chauffant le métal de la gaine et en orientant l'extrémité de la jonction de mesure vers le bas pour que le métal fondu coule et en forme ainsi une extrémité étanche.

6.3.4.5 Joint de référence (jonction froide)

Pour empêcher l'humidité d'entrer, un joint est nécessaire au niveau de la jonction froide du thermocouple, celui-ci peut être assuré par un pot d'étanchéité fixé à la gaine par brasage, soudage ou sertissage. Avant de fixer le pot d'étanchéité à la gaine, les câbles flexibles munis de manchettes d'isolation sont brasés aux conducteurs du thermocouple. Il convient que les joints soient disposés sur la moitié du pot d'étanchéité. Celui-ci est rempli d'un matériau permettant d'assurer l'étanchéité jusqu'à une température de 105 °C. Les joints doivent être testés pour vérifier leur efficacité lorsqu'ils sont faits.

6.3.5 Résistance d'isolement (thermocouple non mis à la terre)

La résistance d'isolement est un paramètre qui donne une information relative à l'étanchéité de la gaine.

La résistance d'isolement d'un thermocouple isolé dépend du diamètre de la gaine du câble, de la température, de la qualité, de la pureté et du niveau d'humidité de l'isolant.

La résistance d'isolement et la tension à utiliser pour mesurer la résistance doivent être données par le fabricant à la température ambiante et à la température de fonctionnement. Il convient que la résistance d'isolement soit comprise dans une gamme allant au moins de 100 MΩ à 1000 MΩ et que la tension de mesure soit comprise dans la gamme allant de 50 V à 500 V, en fonction du diamètre de la gaine.

Généralement, la résistance d'isolement diminue de l'ordre de deux décades entre la température ambiante et 200 °C, et ceci doit être pris en compte au niveau de la conception.

6.3.6 Interchangeabilité – Remplacement

Chaque capteur fabriqué avec les mêmes spécifications doit être interchangeable avec n'importe quel autre capteur du même type, en prenant en compte les tolérances admises.

Il convient de prendre en compte dès leur conception, les manutentions à réaliser sur les thermocouples, lorsque ceux-ci seront retirés du circuit réacteur ainsi que tous les risques liés aux rayonnements.

6.4 Installation de l'assemblage thermocouple

6.4.1 Exigences d'installation

Des erreurs peuvent être introduites du fait des conditions d'installation. Il convient de prendre les précautions suivantes:

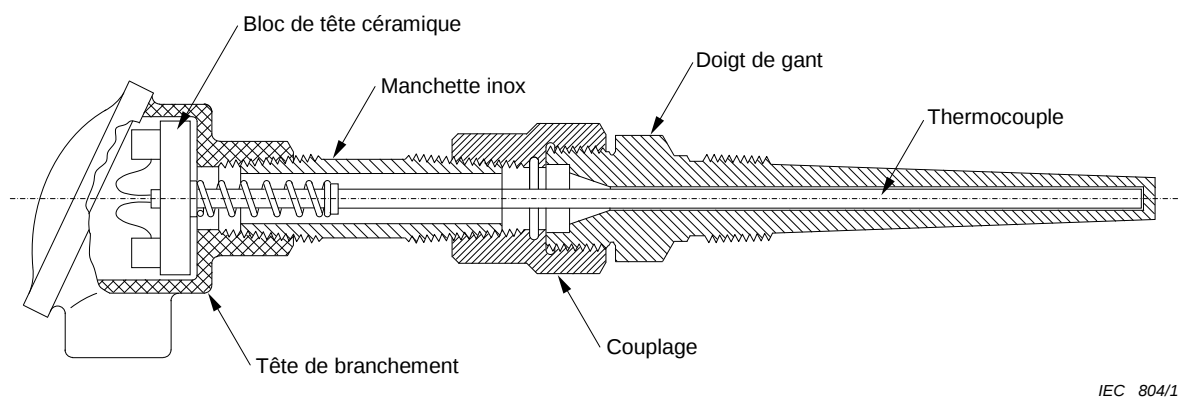
- éviter toute action qui pourrait entraîner le phénomène de travail à froid;
- il convient de prendre note pour l'installation des rayons de courbure minimum relatifs aux câbles spécifiés par le fabricant;
- éviter de plier ou de courber anormalement les conducteurs;
- brancher correctement les conducteurs;
- limiter le nombre de raccords sur le circuit de mesure;
- il convient que les jonctions de référence soient accessibles et ne soient pas situées dans un environnement hostile;
- il convient que les thermocouples soient placés à un endroit convenable où la température est représentative de celle l'objet ou du milieu à mesurer;
- pour la mesure de la température des fluides, il convient que la profondeur d'immersion du thermocouple soit telle que les effets de transfert de chaleur de la jonction de mesure ou les effets des conditions de débit laminaire soient minimisés.

6.4.2 Installation d'un doigt de gant

Dans un doigt de gant, le thermocouple doit être maintenu à l'aide d'un ressort de compression (voir Figure 3). L'utilisateur doit s'assurer que le thermocouple est compatible avec la conception du doigt de gant, de la tête de branchement, du tube guide d'extension et des dispositifs de l'extrémité du thermocouple.

L'ensemble de branchement doit empêcher les entrées d'humidité qui peuvent entraîner l'apparition de courant de fuite, et ainsi dégrader la qualité du signal et produire des erreurs de mesure. La prise de branchement du câble doit aussi assurer la protection mécanique des connexions, et ainsi éviter les contraintes mécaniques qui sont susceptibles d'avoir des effets au niveau des entrées d'humidité ou des pertes complètes de connexions.

Si on utilise des dispositifs de fixation, tels que des écrous, des clavettes, des boulons ou autres, ces éléments doivent être utilisés d'une manière telle que l'étanchéité ne soit pas dégradée. Ces dispositifs lorsqu'ils sont retirés ou qu'ils font l'objet d'ajustement, ne doivent pas être étirés, martelés ou empilés pour éviter une déformation permanente de l'assemblage.



IEC 804/13

Figure 3 – Installation d'un thermocouple dans un doigt de gant

6.4.3 Connexions

6.4.3.1 Câbles

6.4.3.1.1 Généralités

Dans une centrale nucléaire de puissance, le branchement d'un thermocouple au système électronique nécessite l'emploi d'un câble. Ce câble a des caractéristiques très particulières qui évite le parasitage du signal dû aux variations de température le long des chemins de câbles. Deux solutions de câble sont possibles pour réaliser la liaison:

- câble d'extension,
- câble de compensation.

Les câbles d'extension ou de compensation doivent présenter des caractéristiques compatibles avec les courbes FEM/température relatives au thermocouple lui-même sur une gamme limitée de températures.

On doit prendre en compte au niveau conception les exigences de la CEI 60584-3 applicables pour les codes-couleurs et l'identification des conducteurs d'extension, les tolérances applicables et les propriétés électriques.

6.4.3.1.2 Câbles d'extension

Il convient qu'un câble d'extension ait des conducteurs de même nature que les éléments du thermocouple, qu'il le prolonge jusqu'à la jonction de référence et qu'il présente les mêmes propriétés thermoélectriques que ceux du thermocouple dans toute la gamme d'utilisation donnée par les tableaux.

6.4.3.1.3 Câbles de compensation

Il convient d'utiliser un câble de compensation à partir du boîtier de raccordement primaire dans lequel les câbles du thermocouple en provenance du réacteur (ou d'un autre emplacement de mesure) ont été connectés, pour le brancher au système de mesure. Il convient que le câble de compensation ait les mêmes caractéristiques que le thermocouple dans les conditions environnementales des chemins de câble entre le boîtier de raccordement et le système de mesure.

Lorsqu'un câble de compensation est utilisé, le branchement avec les conducteurs du thermocouple doit se faire dans un boîtier de raccordement étanche. Le câble du thermocouple doit être étanche vis-à-vis de l'humidité pour protéger les isolants. On doit définir un critère d'essai d'isolement pour de tels thermocouples, (en général on prend des valeurs de plusieurs mégohms, voir aussi la CEI 60737). Les joints et les câbles d'extension

peuvent être spécifiés comme faisant partie de l'application ou recommandées par le fabricant.

6.4.3.2 Connecteurs

Comme un connecteur est par définition une jonction supplémentaire, le choix des connecteurs pour un thermocouple revêt une grande importance. Seul des connecteurs particuliers et adapté peuvent être utilisés pour un thermocouple donné. La nature et la polarité de chaque contact doivent être choisies soigneusement par rapport au type de thermocouple et à ses câbles.

La limite de gamme de température associée à la gaine du connecteur doit être égale ou supérieure à la température maximum possible ou à la température accidentelle spécifiée par l'utilisateur.

Sauf spécifié différemment, le fabricant doit fournir le connecteur apparié avec le thermocouple.

6.5 Caractéristiques opérationnelles des thermocouples

6.5.1 Considérations générales sur l'utilisation des thermocouples

Dans les applications nucléaires, les thermocouples sont couramment utilisés en 'immersion directe' ou 'monté en doigt de gant'. Néanmoins, la présente norme n'exclut pas d'autres types de conception qui peuvent être nécessaires pour des applications particulières sur différents types de réacteur.

Un thermocouple comporte généralement un élément sensible très petit et présente des caractéristiques particulières:

- Il peut mesurer une température dans un endroit bien localisé.
- Le temps de réponse d'un thermocouple est plus court que celui d'une sonde à résistance, du fait de ses faibles dimensions et de son inertie thermique.
- Il peut être en contact direct (par brasage, soudure ou par montage à l'aide de dispositifs adaptés) avec la surface du composant dont il faut mesurer la température.
- Il peut mesurer des températures élevées, ainsi il est la solution préférée pour les mesures en-cœur, pour lesquelles la température peut être supérieure à 1 000 °C.
- Il peut résister à des débits de dose très élevés du fait de sa structure métallique et minérale.

6.5.2 Conditions d'ambiance (fonctionnements normal et accidentel)

Les conditions environnementales de fonctionnement du thermocouple doivent être spécifiées:

- Gamme de températures et température maximale atteinte pour l'élément sensible.
- Durée de vie de la centrale prévue à la conception.
- Débit de dose (fonctionnement normal et accidentel).
- Environnement air/vapeur (température, humidité, produits contaminants, pression vapeur).

6.5.3 Défaut d'homogénéité métallurgique

Idéalement un thermocouple présente des conducteurs homogènes avec des caractéristiques de génération de FEM uniformes. Par ailleurs, la FEM thermique est une fonction de la différence de température entre les jonctions, et celle-ci dépend uniquement des caractéristiques des éléments individuels du thermocouple. Néanmoins des défauts

d'homogénéité physique, chimiques et métallurgiques apparaissent du fait de la fabrication et de l'emploi en exploitation du thermocouple.

Ainsi la FEM thermique d'un thermocouple est en pratique aussi une fonction de la distribution de la température le long des thermo éléments individuels. Les caractéristiques d'un thermocouple présentent donc une composante liée à l'interaction des parties non homogènes du thermocouple et du gradient de température. Cette composante se superpose à la caractéristique idéale de sortie de la FEM.

Le niveau de défauts d'homogénéité liés au processus de fabrication peut être maintenu à une valeur faible et constante. Le niveau de défauts d'homogénéité liés à l'utilisation dans le temps du thermocouple pose plus de problème. Tous les thermocouples sont le siège de FEMs parasites dues aux défauts d'homogénéité qui se sont développés au cours de l'exploitation du thermocouple à des températures élevées.

6.5.4 Corrosion

Les thermocouples qui ont subi une oxydation ou une corrosion importante peuvent produire un signal erroné. Les changements de composition des conducteurs peuvent résulter de la corrosion ou de la contamination par d'autres éléments. Les incrustations d'oxydes, les alliages de brasure ou les flux de soudage constituent des causes possibles de dérive par rapport à l'étalonnage initial. Des vérifications périodiques sont recommandées pour vérifier l'étalonnage des thermocouples.

6.5.5 Stabilité du thermocouple

La stabilité et la FEM des thermocouples sont affectées par:

- Les produits contaminants présents dans les alliages utilisés pour fabriquer les thermocouples (sulfures, huiles et graisses).
- Les alliages à base de nickel utilisés pour la fabrication des thermocouples de type K sont sujets à dégradation lorsqu'ils se trouvent en atmosphère pauvre en oxygène.
- Les défauts d'homogénéité de composition correspondant à des éléments réactifs dissouts, tels que le chrome, le manganèse et l'aluminium qui disparaissent par oxydation interne.
- Le travail à froid entraîne de petites variations au niveau des caractéristiques qui peuvent être corrigées par un traitement thermique. Les alliages NiCr, CuNi et NiAl peuvent être régénérés par chauffage à 450 °C pendant quelques heures.

En faisant passer les alliages d'un état désordonné à un état ordonné, on peut faire évoluer le signal de sortie d'un thermocouple d'au moins + 1 %. Les conditions qui prévalent pour une application nucléaire peuvent aussi avoir un impact sur la précision et la stabilité des thermocouples comme indiqué ci-dessous:

- Le flux de neutrons thermiques et rapides dégrade les alliages du thermocouple produisant des matériaux de composition et modifiant la structure du thermocouple.
- Le nickel est particulièrement stable aussi l'utilisation dans le cœur des réacteurs nucléaires des thermocouples réalisés à base de nickel est recommandée, bien qu'une exposition long terme aux rayonnements dans le cœur puissent entraîner une dérive de la sorties des thermocouples de plusieurs degrés.
- Les effets des champs magnétiques peuvent entraîner des transformations qui perturbent les FEM thermiques des conducteurs négatifs des thermocouples de type K.

6.5.6 Phénomène de travail à froid

Les contraintes ou les torsions répétées, qui sont appelées communément «travail à froid» sur les conducteurs du thermocouple, peuvent produire des contraintes et des distorsions de la structure cristalline de la matière pouvant entraîner des erreurs significatives de mesure. Ceci peut créer des jonctions non prévues au niveau des conducteurs. Lorsque ces jonctions

sont soumises à un gradient de température, une tension est produite et celle-ci se traduit par une erreur au niveau de la mesure.

On doit préparer soigneusement l'installation en utilisant des câbles d'extension ou de compensation particuliers pour limiter les conséquences de ce phénomène.

7 Essais

7.1 Généralités

Les essais doivent être réalisés pour prouver que les thermocouples satisfont aux exigences de la présente norme. Il n'est pas prévu, ni recommandé que tous les essais soient réalisés sur tous les thermocouples livrés.

Ainsi trois types d'essais sont décrits ci-dessous:

- Essais de performances.
- Essais de qualification (essais de type).
- Essais classiques de production.

Les essais de qualification (essais de type) doivent être faits sur un échantillon pour chaque conception particulière ou gamme de thermocouples. Lorsque la fonction assurée par les thermocouples est importante pour la sûreté, on doit déterminer les exigences de qualification du matériel et satisfaire à celles-ci conformément aux CEI 60780 et CEI 60980.

Les essais classiques de production doivent être faits sur chaque thermocouple après fabrication.

Le fabricant doit réaliser tous les essais classiques de production et doit faire toutes les inspections nécessaires pour garantir que les matériaux, le savoir-faire et le fonctionnement atteignent le degré d'excellence exigé par la présente norme pour montrer ainsi que le capteur fourni est étalonné et fonctionne comme cela a été spécifié.

Toutes les procédures d'essais et d'inspection, les appareils d'étalonnage et les certificats d'étalonnage des appareils doivent être mis à la disposition de l'utilisateur pour qu'il puisse en faire la recette avant que ne commence la fabrication.

7.2 Essais de performance et essais de pré production

7.2.1 Généralités

Ces essais sont réalisés pour valider la conception des thermocouples. Chaque thermocouple doit satisfaire aux exigences de ce paragraphe.

7.2.2 Etalonnage

L'étalonnage est l'opération qui permet de réaliser la mesure d'une réponse fonctionnelle du thermocouple à une température stable fixée. Deux méthodes sont généralement employées pour étalonner les thermocouples:

- La méthode du point fixe: la méthode consiste à placer le capteur dans une chambre dont la température constante uniforme est déterminée par l'équilibre thermodynamique entre différentes phase d'une substance pure.
- La méthode de comparaison avec un capteur de référence. Cette méthode consiste à placer le capteur dans une chambre dont la température uniforme a été mesurée en utilisant un capteur de référence.

La mesure de température consiste à convertir une mesure précise de tension en une température à l'aide d'une fonction polynomiale donnée par la CEI 60584-1 dans son annexe normative A.

Une procédure d'étalonnage classique fait intervenir une combinaison de la méthode du point fixe (0 °C) et de la méthode de comparaison à une température plus élevée avec une jonction de référence maintenue précisément à une température connue telle que 0 °C.

a) A 0 °C: méthode du point fixe

le capteur atteint l'équilibre dans un bain de glace régulièrement brassée et maintenu à $0\text{ °C} \pm 0,2\text{ °C}$.

La FEM produite par le thermocouple doit être mesurée avec un voltmètre en CC de haute précision (généralement meilleure que $\pm 0,05\%$).

b) A 100 °C ou à la température de fonctionnement telle que spécifiée par l'utilisateur: méthode de comparaison

Le capteur est immergé dans un bain d'huile de paraffine ou dans un autre fluide approprié, juste à côté d'une référence secondaire, qui peut être directement tracée en fonction d'une référence de température approuvée. Le capteur doit être immergé suffisamment profondément pour que l'erreur du schéma de conduction puisse être considérée comme négligeable.

La température du bain doit varier au plus de $\pm 1\text{ °C}$ par rapport à la température d'étalonnage souhaitée pour que la lecture de la FEM soit faite. La stabilité de la température du bain et l'incertitude portant sur cette valeur de température doivent être déterminées et les effets liés à la non-uniformité ou à la stabilité de la température doivent être pris en compte pour évaluer la précision du processus d'étalonnage du thermocouple.

7.2.3 Temps de réponse

Une méthode classique pour déterminer le temps de réponse consiste à plonger rapidement le détecteur maintenu à 20 °C dans de l'eau courante à un débit et à une température spécifiée (généralement $= 1\text{ m/s} \pm 0,15\text{ m/s}$ et à $75\text{ °C} \pm 2,5\text{ °C}$). D'une autre façon le capteur peut être chauffé dans l'air et ensuite plongé dans un courant d'eau s'écoulant à un débit de 1 m/s. Sauf si cela est spécifié différemment, le temps nécessaire pour atteindre 63,2 % de la valeur de l'échelon de température ne doit pas dépasser 20 s pour un thermocouple monté dans un doigt de gant ou 3 s pour un thermocouple isolé (structure non mise à la terre).

7.2.4 Essais de résistance d'isolement électrique

Les essais d'isolement électrique sont à réaliser seulement sur les thermocouples présentant une jonction isolée de la gaine (structure non mise à la terre). La mesure est réalisée avec un mégohmmètre à la tension précisée par le fabricant. Le thermocouple avec une jonction isolée doit satisfaire avec succès aux critères de recette concernant l'essai de résistance d'isolement électrique tel que spécifié en 6.3.5.

7.3 Essais de qualification (essais de type)

7.3.1 Généralités

Pour montrer que des thermocouples sont adaptés au service prévu, 10 % d'un même lot de production et pas moins de trois capteurs choisis de façon aléatoire, produits par les méthodes et processus habituels, doivent être soumis aux essais de qualification. Cet essai doit qualifier tous les modèles d'une conception commune.

Les essais de qualification sont réalisés sur les thermocouples après les essais de production.

Les essais de qualification doivent être spécifiés conformément aux conditions environnementales de fonctionnement. Par exemple ils comprennent les essais suivants:

- répétabilité,
- essais aux vibrations,
- essais en vapeur,
- cycles thermiques, et
- étalonnage final et précision.

Lorsque les thermocouples sont utilisés pour des applications importantes pour la sûreté et dans des conditions environnementales correspondant à des accidents de dimensionnement, les essais de qualification doivent comprendre les essais particuliers suivants:

- essais de simulation d'accident reposant sur les conditions les plus sévères à prendre en compte,
- essais sismiques, et
- essais de tenue aux rayonnements.

Les scénarii d'accidents touchant la centrale développés pour la qualification environnementale, tels que l'APRP ou la rupture d'une ligne de vapeur haute pression, doivent être spécifiés pour chaque aux thermocouples individuels. La qualification doit être menée conformément aux spécifications techniques définies par l'utilisateur. En l'absence de toute instruction particulière formulée par l'utilisateur, les essais de qualification doivent être réalisés conformément aux méthodes et aux procédures fournies par les CEI 60780 et CEI 60980.

Pour que le laboratoire puisse réaliser les essais de qualification, l'utilisateur doit définir:

- l'environnement de fonctionnement normal de ces thermocouples;
- le dispositif de montage des thermocouples;
- l'environnement hostile résultant d'un accident prévu ou d'un accident de dimensionnement;
- les fonctions de sûreté relatives aux fonctionnements normal et accidentel;
- les exigences de performance portant sur les thermocouples;
- le temps de mission des mesures; et
- le spectre de réponse de plancher pour la qualification sismique.

7.3.2 Répétabilité (chocs thermiques)

Les thermocouples doivent satisfaire aux critères de recette définis dans les essais spécifiés ci-dessous pour ce qui concerne la répétabilité (chocs thermiques).

Les températures minimum et maximum (T_{min} et T_{max}) doivent être spécifiées. La FEM du thermocouple doit être surveillée durant l'essai avec un voltmètre CC haute résolution (généralement meilleure que $\pm 0,05$ %).

Le capteur doit être transféré d'un bain à la température T_{min} à un bain à la température T_{max} et vice-versa, ceci 25 fois. Chaque transfert doit être réalisé en moins de 5 s et le capteur doit resté immergé dans le bain pendant une durée d'au moins 60 s entre chaque transfert. Le capteur peut être monté dans un doigt de gant qui peut être utilisé pour cet essai mais on doit prendre les précautions pour lui permettre de se stabiliser à chaque température pendant au moins 1 min.

Le nombre de cycles et la procédure peuvent être définis conjointement par l'utilisateur et le fabricant.

7.3.3 Vibrations

Le thermocouple doit satisfaire aux critères de recette des essais d'endurance mécanique (vibrations). Il convient de définir les conditions d'essai (gamme de fréquences, durée d'un cycle de balayage, type de fréquence de balayage, niveau de vibration et durée de l'essai), ainsi que les critères de recette, conformément aux conditions et à l'application concernant la mesure de température.

Un exemple classique de procédure d'essai est fourni ci-dessous:

Un capteur est monté de la même façon que sur l'installation (en particulier le ressort de compression doit être le même que celui utilisé sur l'installation) et chauffé à une température spécifiée pour la durée de l'essai. Le capteur est successivement soumis aux vibrations selon deux plans: un plan perpendiculaire et un plan parallèle à l'axe longitudinal du capteur. Un exemple décrivant les conditions relatives aux vibrations pour chaque séquence est fourni dans le Tableau 2.

Tableau 2 – Exemple d'exigences portant sur l'essai de vibration

Gamme d'essai	10 Hz - 5 000 Hz
Durée d'un cycle de balayage	Cycle 10 Hz - 5 000 Hz - 10 Hz réalisé en 1 h
Type de fréquence de balayage	Logarithmique
Niveau de vibration	0,762 mm max. d'un pic à un pic, sujet à 5 g max. en pic
Durée de l'essai	2 h pour chaque plan

La FEM du thermocouple doit être surveillée en continu sur un oscilloscope pour vérifier sa continuité et les court-circuits pouvant apparaître au cours de la séquence d'essai.

Le capteur est qualifié si les conditions suivantes sont satisfaites:

- Pas d'indication de court-circuit ou d'ouverture du circuit,
- L'étalonnage au point de fusion de la glace n'a pas dérivé de plus de $\pm 0,2$ °C,
- L'étalonnage à 100 °C n'a pas dérivé de plus de $\pm 0,5$ °C, et
- le capteur satisfait aux exigences de résistance d'isolement (pour la jonction isolée du type de thermocouple).

L'essai de vibration n'est pas destiné à remplacer la qualification aux séismes qui peut être demandée par l'utilisateur. Si un thermocouple est nécessaire pour réaliser des mesures de température durant ou après un séisme, alors il faut prendre en compte la CEI 60980.

7.3.4 Essai vapeur ou essai hydraulique haute pression

7.3.4.1 Essai vapeur

Cet essai concerne plus particulièrement les assemblages thermocouple qui doivent résister à de telles conditions environnementales. Il s'applique à la totalité de l'assemblage thermocouple.

Le thermocouple doit être testé pour démontrer que son aptitude à la mesure est maintenue après application des conditions d'essai. L'assemblage est exposé à de la vapeur saturée à $101 \text{ kPa} \pm 2,0 \text{ kPa}$ pour une période de 2 h. A la fin de cette période, les broches des connecteurs doivent être séchées.

La résistance d'isolement des thermocouples isolés doit être vérifiée. La valeur doit être supérieure à $100 \text{ M}\Omega$ à 100 V.

7.3.4.2 Essai hydraulique haute pression

Un essai hydraulique haute pression peut être réalisé à la place de l'essai vapeur. Le thermocouple est soumis pendant 2 h à une haute pression hydraulique dans une chambre d'essai. La pression est fixée en fonction des conditions de fonctionnement.

La résistance d'isolement des thermocouples isolés doit être vérifiée. La valeur doit être supérieure à 100 MΩ.

7.3.5 Cycles thermiques

Les thermocouples doivent être soumis à des cycles thermiques, réalisés entre deux températures stables pour un nombre cycles complets déterminés. La gamme de températures et le nombre de cycles doivent faire l'objet d'un accord entre l'utilisateur et le fabricant. Généralement la gamme de températures est définie par la température ambiante et la Tmax et le nombre de cycles est de 100.

La vitesse d'exécution d'un cycle peut être choisie pour des raisons pratiques, la seule exigence étant qu'il soit permis au capteur de se stabiliser à chaque température. L'étalonnage à 0 °C doit être vérifié avant et après l'essai. L'étalonnage ne doit pas dériver de plus de 0,2 °C à 0 °C et de plus de 0,3 °C à 100 °C.

La résistance d'isolement des thermocouples isolés doit être vérifiée. La valeur doit être supérieure à 100 MΩ.

7.3.6 Qualification aux conditions environnementales hostiles

Les scénarii d'accidents touchant la centrale développés pour la qualification environnementale, tels que l'APRP ou la rupture d'une ligne de vapeur haute pression, doivent être spécifiés pour chaque thermocouple. La qualification doit être menée conformément aux spécifications techniques définies par l'utilisateur. En l'absence de toute instruction particulière formulée par l'utilisateur, les essais de qualification doivent être réalisés conformément aux méthodes et aux procédures décrites dans la CEI 60780.

Certains thermocouples, y compris leur ensemble de branchement de câbles, peuvent être utilisés au niveau de systèmes d'I&C de sûreté; il est exigé que ceux-ci réalisent en continu des mesures de température pour des fonctions de sûreté pour un temps de mission déterminé. Si de telles exigences sont spécifiées, les thermocouples avec leurs assemblages complets doivent être soumis à une gamme d'essais de qualification. Ceci doit démontrer et garantir que les thermocouples et leurs assemblages sont aptes à réaliser leurs fonctions prévues en présence de différentes conditions fonctionnement et d'accidents de dimensionnement qui peuvent être rencontrées durant la vie de la centrale.

Pour que le laboratoire puisse réaliser les essais de qualification, l'utilisateur doit définir: l'environnement correspondant au fonctionnement normal de ces thermocouples, l'environnement hostile pouvant être la conséquence d'accidents prévus ou d'accidents de dimensionnement, les fonctions de sûreté normales et accidentelles associées, les performances des thermocouples, leurs temps de mission et le spectre de réponse des planciers, pour la qualification sismique voir la CEI 60980.

Les thermocouples utilisés spécifiquement pour les mesures en cœur doivent être qualifiés par rapport à leurs conditions de fonctionnement (normales et accidentelles). Ceci comprend les essais dans le réacteur et les essais sur boucle en présence de conditions de température maximale.

7.4 Essais de production

7.4.1 Caractéristiques de fabrication

Chaque thermocouple fabriqué doit être soumis à une séquence d'essais pour vérifier la qualité de fabrication telle que définie dans la CEI 60737.

Les caractéristiques suivantes doivent être prises en compte pour spécifier le programme d'essais de production et les planifier:

- a) Les matériaux de fabrication doivent avoir fait l'objet d'une approbation, la surface des éléments ne doit pas être contaminée par des poisons neutroniques tels que le bore, le cadmium et le gadolinium, ni par des composants qui peuvent se révéler être source de corrosion ou par des composants réactifs chimiques tels que le chlore. Les lubrifiants non acceptables et autres matériaux agressifs doivent être exclus.

Les matériaux utilisés pour la fabrication des câbles et des gaines du capteur doivent être conformes aux spécifications et doivent être exempts de défauts dommageables qui pourraient limiter la durée de vie utile du capteur. La composition des matériaux isolants doit assurer la résistance d'isolement, l'absence de corrosion et des performances sous irradiation acceptables et ceci pour la durée de vie du capteur.

- b) Les câbles doivent être correctement pris en compte et testés. Pour cela, il convient de procéder à des essais et des certificats de conformité seront établis pour vérifier:

- le recuit et la taille des grains;
- la géométrie des conducteurs;
- l'absence de trous sur la gaine par des essais d'intégrité;
- essais de ductilité des conducteurs et de la gaine;
- les valeurs correctes de résistance des conducteurs et de la résistance d'isolement par essais;
- la résistance à la corrosion par essais de susceptibilité;
- la régularité de l'épaisseur de la gaine et l'absence de défaut potentiel pouvant entraîner une défaillance de celle-ci, par essais.

On doit spécifier la méthode de mesure de la résistance d'isolement.

- c) Avant le démarrage d'un ensemble, tous les capteurs et les gaines des câbles doivent être nettoyés en suivant un processus approuvé. Après nettoyage, ils doivent être inspectés pour tester leur surface externe et vérifier l'absence de fuite pour en garantir l'intégrité.
- d) Chaque capteur terminé doit être étalonné et un certificat d'essai doit être produit.
- e) La qualité des jonctions dépend du procédé de fabrication. Il convient que le procédé soit validé par examen métallographique de la jonction sur un échantillon.
- f) Chaque ensemble capteur/câble terminé doit être étiqueté pour indiquer son type, son numéro de série, la longueur de son câble et le nom du câblage. Il doit être approvisionné dans un conteneur approuvé qui le protège durant le transport, le stockage et les manutentions sur le site nucléaire.
- g) La documentation, telle que les certificats de constat des essais, etc. doit avoir fait l'objet d'approbation entre le fabricant et l'acheteur. Il convient que cette documentation garantisse la conformité à la présente norme et aux autres normes applicables ou qui ont fait l'objet d'un accord et qui portent sur les matériaux et leur pureté.
- h) Il est possible d'endommager des câbles à isolant minéral en leur appliquant des tensions d'essais excessives. Les tensions maximales d'essai qui doivent être utilisées durant les mesures de résistance d'isolement doivent être spécifiées.
- i) Les thermocouples doivent être fabriqués à partir de câbles approuvés. Les matériaux utilisés pour les conducteurs doivent être conformes et appropriés en fonction du type de thermocouple et il convient que le fabricant certifie à l'acheteur la conformité à ces exigences. Il convient de réaliser des vérifications de la FEM thermoélectrique des conducteurs.

- j) Les soudures des jonctions et l'obturation des gaines des câbles doivent être vérifiées par un procédé approuvé. Il convient que cela prenne en compte le besoin de minimiser l'exposition de l'isolant pour les niveaux d'humidité ambiante. Il convient de réaliser sur toutes les unités des essais d'isolement électrique (si cela est applicable), de résistance de la boucle des conducteurs et ceux radiographiques, y compris des radiographies des jonctions chaudes. On doit réaliser sur la base de petits échantillons des essais portant sur l'état métallurgique tels que des examens métallographiques ou des essais de corrosion ou de ductibilité.
- k) Les deux extrémités du thermocouple doivent être fermées hermétiquement avant expédition.

7.4.2 Examen

Le capteur doit faire l'objet d'un examen pour vérifier qu'il satisfait aux critères suivants:

- a) processus de fabrication – le capteur doit être fabriqué en respectant un haut niveau de qualité,
- b) finition – les accrocs, les rayures et les autres défauts d'aspect hors tolérance doivent entraîner le rejet du thermocouple,
- c) dimensions – toutes les parties du capteur doivent être mesurées pour garantir qu'elles sont conformes aux dimensions portées sur les plans approuvés,
- d) identification – on doit vérifier le capteur pour s'assurer que les données d'identification demandées par la présente norme sont présentes.

7.4.3 Identification

Chaque appareil doit être identifié à l'aide des informations suivantes:

- nom du fabricant ou son identité;
- modèle du fabricant et/ou numéro de série;
- numéro(s) d'identification utilisateur.

L'identification doit être réalisée par électro-gravure sur une surface non critique conformément aux procédures d'assurance qualité. De plus, lorsque cela est spécifié, chaque appareil doit présenter un code d'identité de l'utilisateur, attaché à l'instrument sous la forme d'une étiquette métallique, solidement attaché par un lien à l'appareil. L'étiquette doit être en laiton ou en acier inoxydable.

8 Informations techniques demandées

Il convient que les informations demandées comprennent les plans du thermocouple, présentant clairement les dimensions, les schémas de câblage interne, les matériaux utilisés, les structures de fabrication internes, aussi bien que les informations concernant les dimensions des supports, des dispositifs de montage et des branchements électriques.

Le manuel du thermocouple doit comprendre au minimum les informations suivantes:

- données descriptives de l'équipement;
- plans à jour;
- schémas de câblage interne;
- spécifications;
- résultats des essais de production;
- résultats des essais de qualification, le cas échéant, et;
- liste détaillée des parties constitutives.

En centrale, les manuels doivent être maintenus à jour pendant la durée de vie de la centrale ou pendant la durée de vie en service du thermocouple, comme cela est pertinent.

Les spécifications de performance pour le thermocouple peuvent comprendre les éléments suivants:

- type et gamme de mesures,
- courbe d'étalonnage nominal et précision,
- profondeur d'immersion,
- temps de réponse thermique avec un doigt de gant,
- résistance d'isolement pour un thermocouple isolé,
- conditions de service qualifiées,
- qualification environnementale et sismique, lorsque pertinent,
- toutes autres données pertinentes, telles les caractéristiques électriques.

Une description du programme d'assurance qualité et un plan descriptif du contrôle qualité relatif au thermocouple peuvent être ajoutés aux spécifications de performance.

Bibliographie

IAEA NS-G-1.3: *Instrumentation and Control Systems Important to Safety in Nuclear Power Plants*

IAEA SSR 2/1:2011, *Safety of Nuclear Power Plants: Design*

IAEA GS-R-3:2006, *The management system for facilities and activities*

“Modern Power Station Practice”, volume F chapter 4, Pergamon Press, Third Edition, 1992

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch