

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60911

Première édition
First edition
1987-03

**Mesures pour surveiller la bonne réfrigération
du cœur des réacteurs à eau légère pressurisée**

**Measurements for monitoring adequate cooling
within the core of pressurized light water reactors**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60911: 1987

Numéros des publications

Depuis le 1^{er} janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

Publications consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- «Site web» de la CEI*
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement
(Catalogue en ligne)*
- **Bulletin de la CEI**
Disponible à la fois au «site web» de la CEI* et comme périodique imprimé

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI)*.

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Validity of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates

(On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary (IEV)*.

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

* See web site address on title page.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60911

Première édition
First edition
1987-03

**Mesures pour surveiller la bonne réfrigération
du cœur des réacteurs à eau légère pressurisée**

**Measurements for monitoring adequate cooling
within the core of pressurized light water reactors**

© IEC 1987 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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 l'éditeur.

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 the publisher.

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembé Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

R

Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue

SOMMAIRE

	Pages
PREAMBULE.....	4
PREFACE.....	4
INTRODUCTION.....	6
Articles	
1. Domaine d'application et objet.....	6
2. Terminologie.....	8
2.1 Domaine d'application des termes.....	8
2.2 Définitions.....	8
3. Conditions anormales d'arrêt.....	10
3.1 Fluide sous-refroidi.....	10
3.2 Fluide saturé.....	12
3.3 Fluide surchauffé.....	12
4. Prescriptions pour l'instrumentation.....	12
4.1 Mesures pour l'état sous-refroidi.....	14
4.2 Mesures pour l'état saturé.....	14
4.3 Mesures pour les conditions de surchauffe.....	20
5. Présentation de l'information.....	20
6. Classe de sûreté de l'instrumentation.....	20
7. Qualification.....	20
ANNEXE A - Analyse thermodynamique du circuit primaire.....	22
A1. Généralités.....	22
A2. Evaluation des conditions thermodynamiques.....	22
A3. Paramètres de visualisation.....	24
A4. Exemples de visualisations.....	26

CONTENTS

FOREWORD	Page 5
PREFACE.....	5
INTRODUCTION.....	7
Clause	
1. Scope and object.....	7
2. Terminology.....	9
2.1 Scope of terms.....	9
2.2 Definitions.....	9
3. Abnormal shutdown operating conditions.....	11
3.1 Subcooled coolant.....	11
3.2 Saturated coolant.....	13
3.3 Superheated coolant.....	13
4. Instrumentation requirements.....	13
4.1 Measurements for subcooled condition.....	15
4.2 Measurements for saturated condition.....	15
4.3 Measurements for superheated condition.....	21
5. Presentation of information.....	21
6. Safety classification of the equipment.....	21
7. Qualification.....	21
APPENDIX A - Thermodynamic analysis of the reactor coolant system.....	23
A1. General.....	23
A2. Assessment of thermodynamic conditions.....	23
A3. Display parameters.....	25
A4. Examples of displays.....	27

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**MESURES POUR SURVEILLER LA BONNE RÉFRIGÉRATION DU
CŒUR DES RÉACTEURS À EAU LÉGÈRE PRESSURISÉE**

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

PRÉFACE

La présente norme a été établie par le Sous-Comité 45A: Instrumentation des réacteurs, du Comité d'Etudes n° 45 de la CEI: Instrumentation nucléaire.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

Règle des Six Mois	Rapport de vote
45A(BC)91	45A(BC)95

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

La publication suivante de la CEI est citée dans la présente norme:

Publication n° 780 (1984): Qualification des constituants électriques du système de sûreté des centrales électronucléaires.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**MEASUREMENTS FOR MONITORING ADEQUATE COOLING WITHIN
THE CORE OF PRESSURIZED LIGHT WATER REACTORS**

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This standard has been prepared by Sub-Committee 45A: Reactor Instrumentations, of IEC Technical Committee No. 45: Nuclear Instrumentation.

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

Six Months' Rule	Report on Voting
45A(CO)91	45A(CO)95

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

The following IEC publication is quoted in this standard:

Publication No. 780 (1984): Qualification of Electrical Items of the Safety System for Nuclear Power Generating Stations.

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MESURES POUR SURVEILLER LA BONNE RÉFRIGÉRATION DU CŒUR DES RÉACTEURS À EAU LÉGÈRE PRESSURISÉE

INTRODUCTION

La seule façon d'obtenir un refroidissement correct du cœur du réacteur est de faire circuler le fluide de refroidissement à un débit suffisant pour extraire la chaleur produite dans le cœur. Dans les conditions normales de puissance, le refroidissement du cœur est surveillé correctement par les mesures habituelles de protection du réacteur. Le fluide est généralement injecté par circulation forcée afin de faciliter le transfert de chaleur. Il est toutefois possible, dans certaines conditions anormales d'arrêt, d'avoir une circulation naturelle du fluide ou même une absence de circulation.

Le fluide peut se présenter sous une phase ou sur deux phases, comme suit:

- a) une phase: soit un liquide, de la vapeur, ou un mélange de vapeur et de gaz;
- b) deux phases: un mélange de liquide et de vapeur/gaz.

On doit prévoir un nombre suffisant de mesures du bilan en fluide de refroidissement, dont la mesure du niveau fait partie, pour surveiller que le refroidissement correct du cœur est réalisé dans ces conditions anormales pour lesquelles l'action de l'opérateur peut s'avérer nécessaire, ou si une confirmation de la situation du bilan en fluide est utile.

Une mesure du sous-refroidissement et de son historique doit aussi être prévue pour aider l'opérateur et lui permettre d'éviter ces conditions anormales.

1. Domaine d'application et objet

La présente norme est applicable aux réacteurs à eau légère pressurisée.

Sous certaines conditions anormales de fonctionnement d'un réacteur à eau légère pressurisée (REL), l'expérience montre qu'il peut exister simultanément deux phases (eau et vapeur) et parfois deux niveaux dans les différentes parties du circuit primaire. On peut avoir un niveau dans la cuve du réacteur et un niveau différent dans le pressuriseur. Cela n'avait pas été pleinement pris en compte lors de la spécification initiale de l'instrumentation de la filière à eau pressurisée.

Cette norme a pour but de définir des prescriptions pour une instrumentation supplémentaire permettant la mesure des paramètres de refroidissement appropriés quand des conditions anormales apparaissent avec, soit une ou deux phases dans le fluide réfrigérant, soit du gaz dans la cuve du réacteur.

Les utilisateurs de REL peuvent disposer d'une telle instrumentation, destinée à présenter une information sur les conditions de refroidissement afin de permettre à l'opérateur de décider des actions nécessaires pour maintenir le refroidissement correct du cœur.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**MEASUREMENTS FOR MONITORING ADEQUATE COOLING WITHIN
THE CORE OF PRESSURIZED LIGHT WATER REACTORS****INTRODUCTION**

Adequate cooling of the reactor core can be achieved only by providing a sufficient amount of coolant flow to the core to remove the heat. Under normal power conditions, cooling of the core is adequately monitored by the normal reactor protection measurements. Normally, the coolant is forced circulated to facilitate the heat transfer. However, during certain abnormal shutdown conditions, the coolant might circulate naturally or the coolant might even become stationary.

The coolant can be in one phase or two phases :

- a) one phase: either liquid, or steam, or a mixture of steam and gas.
- b) two phases: a mixture of liquid and steam/gas.

Sufficient measurements of the coolant inventory shall be provided, of which the level measurement is a part, to monitor that adequate cooling is being achieved under those abnormal conditions for which operator action may be needed or for which confirmation of coolant inventory status is of value.

Measurement of the subcooling and its time history shall also be provided to assist the operator in avoiding those abnormal conditions.

1. Scope and object

This standard is applicable to pressurized light water reactors.

Experience has shown that in a pressurized light water reactor (PWR) system, under certain abnormal conditions, two phases (water and steam) and sometimes two levels can exist simultaneously in different parts of the reactor coolant system. This may appear as one level in the reactor vessel and a different level in the pressurizer. This was not considered fully when PWR instrumentation was originally specified.

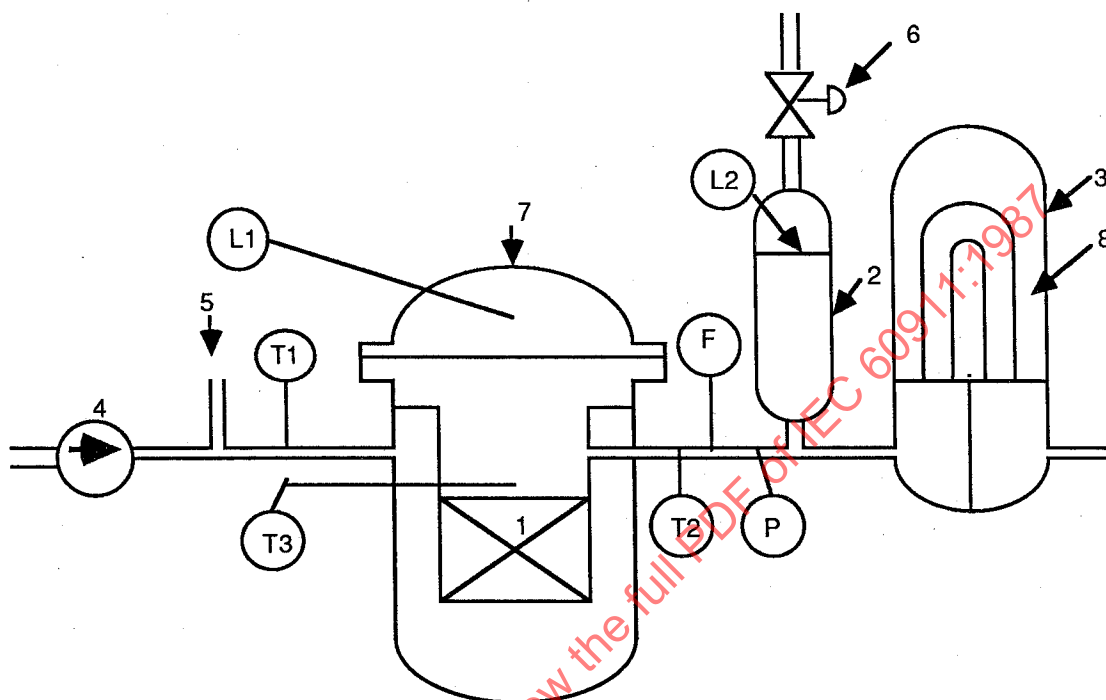
The objective of this standard is to define requirements for additional instrumentation to measure coolant parameters, which are of interest when abnormal conditions arise with either one or two phases of coolant or with gas included in the reactor vessel.

PWR users can acquire this instrumentation to present information on coolant conditions, in order to assist the operator to decide on actions needed to maintain adequate core cooling.

2. Terminologie

2.1 Domaine d'application des termes

Dans la présente norme, les termes concernant le refroidissement du réacteur et ceux relatifs aux composants primaires et à l'instrumentation d'un REL sont indiqués à la figure 1.



COMPOSANTS

- 1 = Cœur
- 2 = Pressuriseur
- 3 = Générateur de vapeur
- 4 = Pompe primaire de refroidissement
- 5 = Injection de sécurité
- 6 = Système de décharge de pression
- 7 = Cuve du réacteur
- 8 = Fluide réfrigérant secondaire

INSTRUMENTATION

- L1 = Niveau d'eau dans la cuve
- L2 = Niveau d'eau du pressuriseur
- P = Pression du fluide primaire
- F = Débit de refroidissement
- T1 = Température d'entrée réacteur
- T2 = Température sortie réacteur
- T3 = Température sortie cœur

Fig. 1. - Circuit primaire de refroidissement.

Les termes "doit", "il convient de/que", "doit en principe", "il y a lieu de" et "peut être" sont en accord avec les usages de la CEI.

2.2 Définitions

Les définitions suivantes sont applicables pour les besoins de la présente norme. Sauf spécification contraire donnée dans cette norme, la température et la pression sont celles à la sortie du cœur.

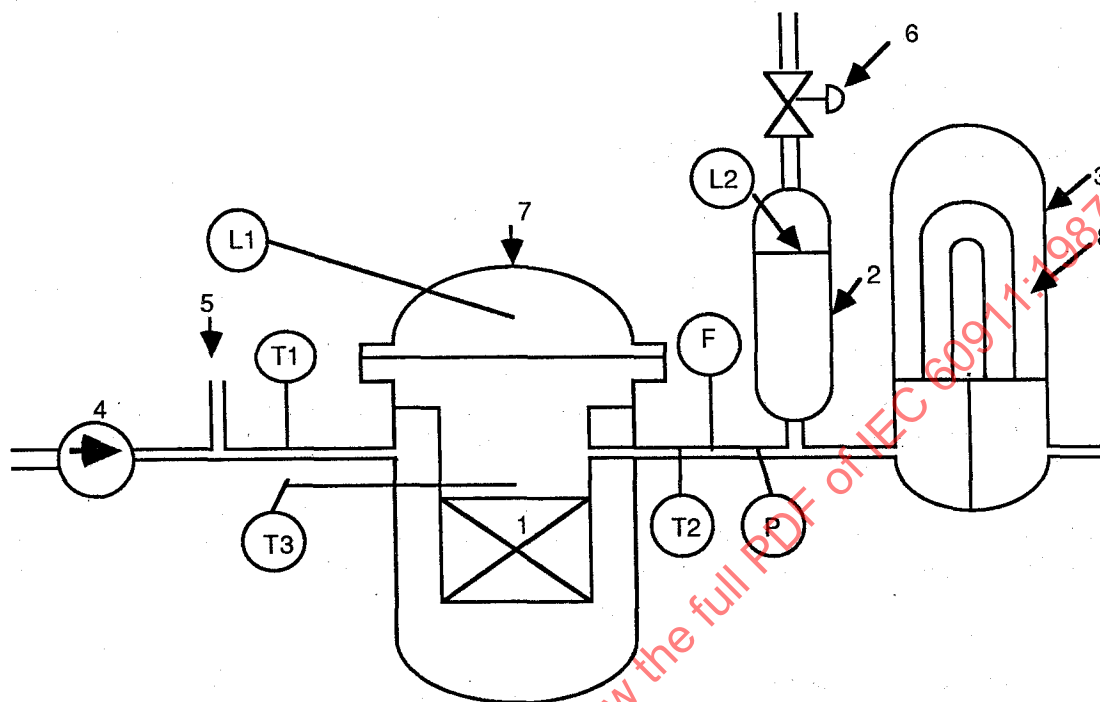
2.2.1 Sous-refroidissement et surchauffe

- Le sous-refroidissement est caractérisé par la différence positive entre la température de saturation à la pression existant dans le liquide et la température du liquide en ce point.

2. Terminology

2.1 Scope of terms

In this standard, the references are to the reactor coolant of a PWR with primary components and measurements as indicated in Figure 1.



COMPONENTS

- 1 = Core
- 2 = Pressurizer
- 3 = Steam generator
- 4 = Reactor coolant pump
- 5 = Safety injection
- 6 = Pressure relief system
- 7 = Reactor vessel
- 8 = Secondary coolant

INSTRUMENTATION

- L1 = Reactor vessel coolant level
- L2 = Pressurizer coolant level
- P = Reactor coolant pressure
- F = Coolant flow
- T1 = Reactor inlet temperature
- T2 = Reactor outlet temperature
- T3 = Core exit temperature

Fig. 1. - Reactor coolant system.

The terms "shall", "should" and "may be" are in accordance with IEC usage.

2.2 Definitions

For the purposes of this standard, the following definitions are applicable. If not otherwise specified in this standard, temperature and pressure refer to core exit temperature and pressure.

2.2.1 Subcooling and superheating

- Subcooling is the difference by which the saturation temperature corresponding to the pressure existing in the liquid exceeds the liquid temperature at that point.

- La surchauffe est caractérisée par la différence négative entre la température de saturation à la pression existant dans la vapeur et la température de la vapeur en ce point.

2.2.2 Vide

Volume occupé par la vapeur ou par le gaz. Cette définition s'applique à la fois aux bulles dispersées dans une phase liquide ou dans des volumes homogènes importants.

2.2.3 Fraction de vide

Rapport entre le vide et le volume total.

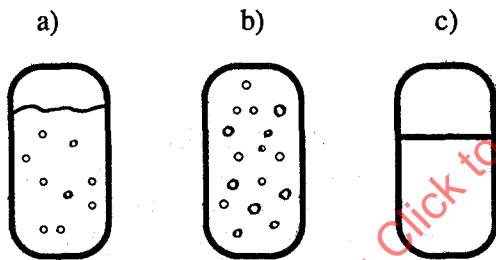
2.2.4 Niveau de liquide

Niveau de la surface horizontale séparant le liquide de la vapeur ou du gaz.

2.2.5 Niveau de liquide équivalent

Niveau qui existerait dans la cuve du réacteur si les phases vapeur et eau du fluide de refroidissement étaient complètement séparées et qui est aussi appelé niveau critique.

Différentes distributions de vide peuvent avoir le même niveau de liquide équivalent ainsi que le montrent les croquis a), b) et c) suivants:



Le croquis c) illustre le niveau équivalent correspondant au même volume de liquide que celui des croquis a) et b)

3. Conditions anormales d'arrêt

Il convient de considérer cet article en relation avec l'analyse de sûreté de la centrale pour les conditions normales et les conditions anormales d'arrêt. Cet article donne des explications sur les conditions anormales pour lesquelles cette instrumentation est utilisée et sa relation avec les conditions normales d'arrêt. Il y a lieu aussi de noter que l'instrumentation pour la mesure du niveau d'eau dans la cuve du réacteur peut être utilisée par l'opérateur pour lui indiquer le niveau de l'eau pendant les phases normales de remplissage et de vidange du réacteur (par exemple en période de rechargement).

3.1 Fluide sous-refroidi

Un refroidissement correct du cœur du réacteur est normalement assuré quand tout le fluide de la cuve du réacteur est sous-refroidi soit par circulation forcée, soit par circulation naturelle.

- Superheating is the difference by which the saturation temperature corresponding to the pressure existing in the steam is below the steam temperature at that point.

2.2.2 Void

The volume occupied by steam or gas. This definition applies both to bubbles dispersed within a liquid phase or to large homogeneous volumes.

2.2.3 Void fraction

The ratio of void to total volume.

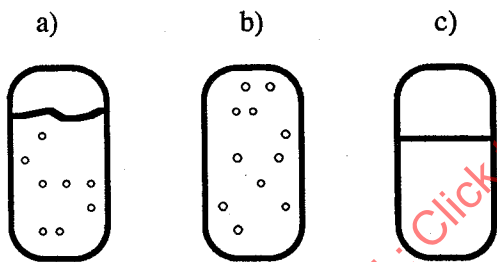
2.2.4 Liquid level

The level of the horizontal surface dividing liquid from steam or gas.

2.2.5 Equivalent liquid level

The level that would result in the reactor vessel if the steam and water phases of the coolant were completely separated, and which is also described as the collapsed water level.

Different void distributions may have the same equivalent liquid level as shown in the following sketches a), b) and c):



Sketch c) illustrates the equivalent level for the same volume of liquid as sketches a) and b)

3. Abnormal shutdown operating conditions

This clause should be considered in relation to the safety analysis for the plant for normal and abnormal shutdown conditions. It explains the abnormal conditions for which this instrumentation is used and its relation to normal shutdown conditions. It should also be noted that the reactor vessel water level measuring instruments may be used by the operator to indicate water level during periods of normal reactor vessel filling and draining (e.g. refuelling).

3.1 Subcooled coolant

Adequate cooling of the reactor core is normally ensured when all the coolant within the reactor vessel is subcooled, with either forced or natural circulation.

3.2 *Fluide saturé*

Une diminution du sous-refroidissement provoquée par une condition anormale, telle qu'une élévation de température ou une chute de pression, peut déterminer les conditions de saturation du fluide dans la cuve du réacteur. Une diminution dans le sous-refroidissement en puissance provoque un arrêt du réacteur par le jeu normal du système de protection. Si l'arrêt du réacteur a été effectué avec succès, seule la chaleur résiduelle du cœur reste à évacuer. Dès que les conditions de saturation du fluide existent, il est possible que des vides apparaissent dans le fluide réfrigérant. L'effet de ces vides sur le refroidissement correct du cœur est lié aux deux modes de circulation du fluide ci-après.

3.2.1 *Circulation naturelle ou non circulation*

La formation de vides a pour conséquence l'apparition d'un niveau liquide équivalent dans la cuve du réacteur. Dans ces conditions, le refroidissement correct est assuré, à condition que le cœur demeure recouvert d'eau.

3.2.2 *Circulation forcée*

Les pompes primaires de refroidissement du réacteur continuent à injecter le fluide sous forme d'un mélange homogène de liquide et de vapeur/gaz. Dans ces conditions, le refroidissement correct du cœur est assuré, même avec une teneur en vide relativement élevée.

3.3 *Fluide surchauffé*

Le fluide surchauffé est produit à la sortie du cœur par une importante réduction du bilan de réfrigération qui dépend des deux modes de circulation. En circulation naturelle réduite ou non-circulation, la vapeur surchauffée serait produite à la sortie du cœur si le niveau liquide équivalent descendait nettement en dessous de la partie supérieure du cœur. En circulation forcée, la vapeur surchauffée à la sortie du cœur peut apparaître seulement si le mélange en circulation atteint le cœur avec une teneur en vide élevée.

4. **Prescriptions pour l'instrumentation**

La conception de l'instrumentation destinée à la surveillance des conditions définies aux paragraphes 4.1 à 4.3 doit prendre en compte les facteurs suivants:

- La précision et le temps de réponse indiqués doivent satisfaire aux prescriptions énoncées dans les procédures d'urgence concernant ces paramètres pour pallier les conséquences d'un accident.
- L'instrumentation, y compris ses alimentations, doit être conçue pour fonctionner avec la fiabilité voulue et suivre les prescriptions spécifiées plus haut, pour les conditions normales et accidentelles d'environnement qu'elle risque de rencontrer, en adoptant la redondance ou la diversité voulues.
- L'instrumentation et ses alimentations doivent présenter une redondance appropriée pour répondre au critère de défaillance unique, quand il doit s'appliquer.

3.2 Saturated coolant

A decrease of subcooling caused by an abnormal condition such as a temperature increase or a pressure decrease may result in a saturated coolant condition in the reactor vessel. A decrease in subcooling at power will cause a reactor trip due to the normal protection system operation. If a reactor trip has been successfully initiated, only residual heat remains to be removed from the reactor core. Once a saturated coolant condition exists, it is possible for voids to form in the coolant system. The significance of void formation relative to adequate core cooling is dependent on the two coolant circulation modes as follows.

3.2.1 Natural circulation or stagnant condition

Void formation will result in the development of an equivalent liquid level in the reactor vessel. Adequate cooling under this condition exists if the core remains covered with water.

3.2.2 Forced circulation

Reactor coolant pumps will continue to circulate the coolant as a homogeneous mixture of liquid and steam/gas. Adequate core cooling under this condition is ensured even with a relatively high void fraction.

3.3 Superheated coolant

Superheated coolant is produced at the core exit as a result of a large coolant inventory reduction, depending on the two circulation modes. Under reduced natural circulation or stagnant condition, superheated steam would be produced at the core exit if the equivalent liquid level falls well below the top of the core. Under forced circulation, superheated steam at the core exit can occur only if the circulating mixture reaches the core at a high void fraction.

4. Instrumentation requirements

The design of instrumentation to monitor the conditions defined in Sub-clauses 4.1 to 4.3 shall take account of the following factors:

- Indicated accuracy and time response shall meet the requirements dictated by the emergency procedures which rely on the indications for successful accident recovery.
- The instrumentation system, including power supplies, shall be designed to operate with adequate reliability and meet the requirements previously specified when exposed to the normal and accident environmental conditions under which it is to be used, adopting redundancy or diversity as needed.
- The instrumentation and its power supplies shall have appropriate redundancy to meet the single failure criteria where this applies.

Le degré approprié de refroidissement du cœur dans les conditions de saturation ou de surchauffe peut être déterminé par la surveillance de la température de sortie du cœur. Cependant, cette mesure ne donne pas d'information sur l'évolution vers un refroidissement dégradé ou non. Il convient de prévoir en plus la mesure du niveau du liquide dans la cuve du réacteur en utilisant une instrumentation fiable.

4.1 Mesures pour l'état sous-refroidi

Pour confirmer que les conditions d'un refroidissement correct sont remplies, une instrumentation doit être prévue afin de surveiller le sous-refroidissement du fluide. Pour une surveillance du fluide du réacteur en condition monophasique, il faut mesurer et enregistrer les paramètres physiques suivants:

- pression du fluide réfrigérant;
- températures du fluide réfrigérant (à la sortie du cœur, à l'entrée et à la sortie du réacteur);
- niveau du fluide dans le pressuriseur.

A partir de ces mesures, il est possible d'évaluer le niveau de sous-refroidissement. L'instrumentation doit calculer et présenter ce niveau d'une manière continue ou à une cadence en rapport avec le temps de réponse exigé pour la mesure. Si le sous-refroidissement existe, le cœur du réacteur reste couvert aussi longtemps qu'il y a un niveau dans le pressuriseur.

4.2 Mesures pour l'état saturé

Lorsque le fluide de refroidissement est en condition biphasique, il est important de connaître le niveau liquide équivalent ou la teneur en vide. Le niveau liquide équivalent est important parce qu'il indique l'importance du dénoyage du cœur si les phases sont complètement séparées. Il y a normalement une plus grande capacité de refroidissement que celle indiquée par le niveau liquide équivalent.

Une instrumentation doit être prévue pour la surveillance du niveau liquide équivalent en circulation naturelle ou non-circulation, afin de confirmer le refroidissement correct ou d'indiquer une évolution vers des conditions imparfaites de refroidissement du cœur.

Pour permettre à l'opérateur d'entreprendre une action afin d'empêcher un refroidissement imparfait du cœur dans des conditions de circulation forcée, et éviter le complet assèchement du circuit primaire, une instrumentation doit être prévue pour lui indiquer le niveau liquide équivalent ou la présence de vides en circulation dans la cuve du réacteur, et lui permettre de surveiller l'évolution de ces paramètres.

Des méthodes de mesure du niveau d'eau peuvent fournir, soit une mesure continue, soit des mesures en des points déterminés sur la hauteur de la cuve, afin que le niveau liquide équivalent ou la teneur en vide puissent être déterminés pour toutes les conditions.

La mesure du courant des moteurs des pompes de refroidissement du réacteur peut être utile en indiquant la présence de vides dans le fluide de refroidissement.

The degree of adequacy of core cooling under saturated conditions can be determined by monitoring the core exit temperature. However, this measurement does not provide trend information on whether the conditions for core cooling are becoming worse or not. The reactor vessel liquid level measurement should be provided to supplement the above using reliable instrumentation.

4.1 *Measurements for subcooled condition*

To confirm that conditions for adequate cooling exist, instrumentation shall be provided to monitor the subcooling of the coolant. To monitor the reactor coolant during a one-phase condition, the following physical parameters shall be measured and recorded:

- reactor coolant pressure;
- reactor coolant temperatures (core exit, reactor inlet and reactor outlet);
- pressurizer coolant level.

From these measurements, it is possible to derive the amount of subcooling. The instrumentation system shall calculate and display the amount of subcooling continuously or at a frequency consistent with the required response time for the measurement. If subcooling exists, the reactor core is covered as long as there is a level in the pressurizer.

4.2 *Measurements for saturated condition*

When the coolant is in the two-phase condition, it is important to know the equivalent liquid level or the void fraction. The equivalent liquid level is important because it indicates the extent to which the core could be uncovered if the phases are completely separated. Normally, there is a greater cooling capacity than that which is indicated by the equivalent liquid level.

To confirm adequate cooling or to indicate the approach to an inadequate core cooling condition, instrumentation shall be provided to monitor the equivalent liquid level in the natural circulation or stagnant condition.

To enable the operator to take action to avoid an inadequate core cooling condition in the forced circulation condition and to avoid complete dryout of the reactor coolant system, instrumentation shall be provided to indicate the equivalent liquid level or the presence of circulating voids within the reactor vessel and to monitor the trend in these parameters.

Methods of measuring the water level may provide either a continuous measurement, or measurements at discrete points over a height in the reactor vessel, so that the equivalent liquid level or void fraction can be determined for all conditions.

Measurement of electrical current of the motors of reactor coolant pumps may be useful for indicating the presence of voids in the coolant.

L'instrumentation doit calculer et afficher le niveau liquide équivalent ou un paramètre représentant la teneur en vide d'une manière continue ou à une fréquence en rapport avec le temps de réponse exigé pour la mesure. Il y a plusieurs méthodes pour mesurer le niveau liquide. Les deux méthodes présentées ci-après sont actuellement utilisées.

4.2.1 *Mesure de la pression différentielle*

La méthode de mesure de la pression différentielle constitue un exemple de mesure continue illustré à la figure 2. Elle est utilisée pour mesurer le niveau de fluide de refroidissement dans les cuves de réacteurs, ainsi que dans les pressuriseurs ou les générateurs de vapeur. Cette méthode peut être utilisée à la fois pour la mesure du niveau de liquide équivalent en circulation naturelle et pour la mesure du vide et son évolution en circulation forcée.

Le principe de fonctionnement de la mesure de la pression différentielle est basé sur la comparaison entre le niveau supérieur du fluide dans la cuve du réacteur et une colonne extérieure de référence. Cette mesure n'exige pas d'instrumentation installée à l'intérieur de la cuve du réacteur, mais elle doit être compensée pour tenir compte de l'effet des variations de températures sur la densité du fluide de refroidissement dans la cuve. Puisque la température du fluide, utilisée pour la mesure de pression différentielle dans la colonne de référence à l'intérieur du bâtiment réacteur, varie pendant un accident, elle doit aussi être compensée pour les changements de pression différentielle de la colonne de référence. La compensation de la colonne de référence peut être effectuée par des mesures de température sur les portions verticales de la colonne de référence ou en installant une seconde colonne en parallèle, afin de détecter les variations de pression différentielle dans la colonne de référence. Il convient que cette mesure soit ensuite utilisée pour corriger la pression différentielle de cuve. La figure 2 illustre un système à deux colonnes de référence.

4.2.2 *Mesure par capteur chauffé*

Le capteur de température chauffé constitue un exemple de mesure de type discret illustré à la figure 3. Il est utilisé pour mesurer le niveau de liquide équivalent dans les pressuriseurs et dans les cuves de réacteurs. Le capteur de température chauffé peut être utilisé pour la mesure du niveau de liquide équivalent, aussi bien pour la circulation naturelle que forcée, et fournir une information sur le niveau du fluide de refroidissement dans le cœur.

Le principe de fonctionnement du capteur de température chauffé est basé sur la mesure de la différence de température entre un capteur chauffé et un capteur non chauffé en plusieurs points le long d'une sonde.

Quand un capteur est recouvert par le fluide de refroidissement, le transfert de chaleur est élevé, et l'écart de température entre les capteurs chauffé et non chauffé est faible. Quand un capteur commence à être dénoyé, le transfert de chaleur est réduit et l'écart de température entre les capteurs chauffé et non chauffé est élevé.

Si une protection adéquate contre les projections d'eau ou contre la pénétration d'eau dans les capteurs est prévue, l'instrument peut détecter un niveau de liquide équivalent au-dessus du cœur aussi bien pendant la circulation naturelle que forcée. La figure 3 illustre la méthode de mesure par capteur chauffé du niveau de liquide équivalent dans la partie supérieure de la cuve au-dessus du cœur.

The instrumentation system shall calculate and display the equivalent liquid level or a parameter representing void content continuously or at a frequency consistent with the required response time for the measurement. There are several methods for measuring liquid level. The two methods described below are currently in use.

4.2.1 *Differential pressure measurement*

An example of the continuous type of measurement is the differential pressure method, illustrated in Figure 2. It is used for measuring the coolant level in the reactor vessel and also in the pressurizers and steam generators. The differential pressure method can be used to determine both the equivalent liquid level with natural circulation and the void content, and trending with forced circulation.

The working principle of the differential pressure measurement is the comparison of the head of fluid in the reactor vessel with an external reference leg. This measurement requires no instrumentation installed within the reactor vessel, but the measurement must be compensated to account for the effect of temperature changes on the coolant density in the vessel. Since the fluid temperature of the differential pressure measurement reference leg inside the containment building will change during an accident, there shall also be compensation for the reference leg differential pressure changes. The reference leg compensation can be accomplished with temperature measurements on the vertical portions of the reference leg or by installing a second reference leg in parallel with the original reference leg to detect the change in reference leg differential pressure. This measurement would then be used to correct the vessel differential pressure measurement. Figure 2 illustrates the compensating reference leg arrangement.

4.2.2 *Heated sensor measurement*

An example of the discrete type of measurement is the heated temperature sensor, illustrated in Figure 3. It is used to measure the equivalent liquid level in pressurizers and reactor vessels. The heated temperature sensor can be used for equivalent liquid level measurement in both natural and forced circulation, and provides information about the location of the coolant level relative to the core.

The working principle of the heated temperature sensor is the measurement of the temperature difference between a heated and an unheated sensor at each of several heights along a probe.

When a sensor is covered with coolant, the resistance to heat transfer is low and the difference between heated and unheated sensors is small. When a sensor becomes uncovered, the resistance to heat transfer is high and the difference between the heated and unheated sensor is large.

If adequately shielded from inadvertent splashing or wetting of the sensors, the instrument can detect equivalent liquid level above the core during both natural circulation and forced circulation operation. Figure 3 illustrates the heated sensor method for equivalent liquid level measurement in the upper vessel region above the core.

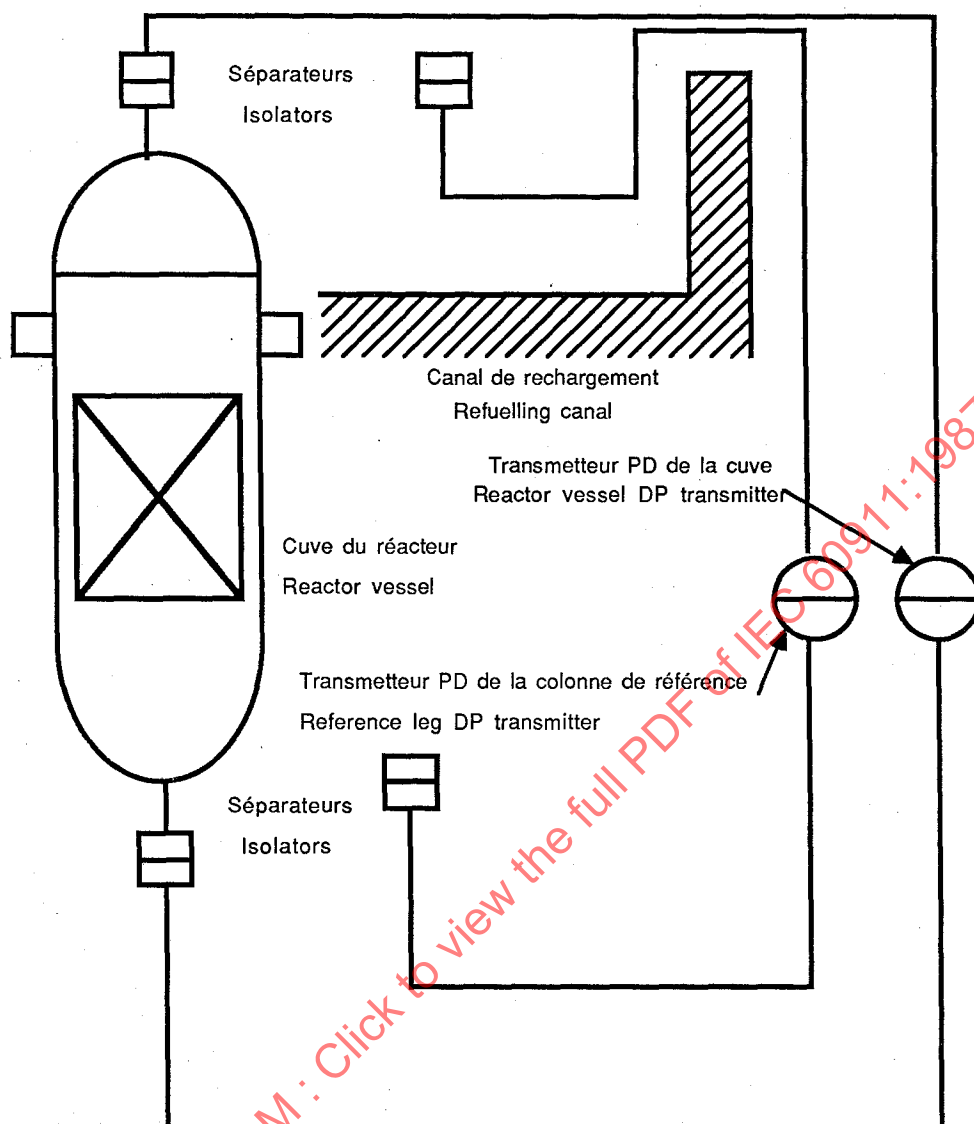


Fig. 2. - Mesure de la pression différentielle.
Differential pressure measurement.

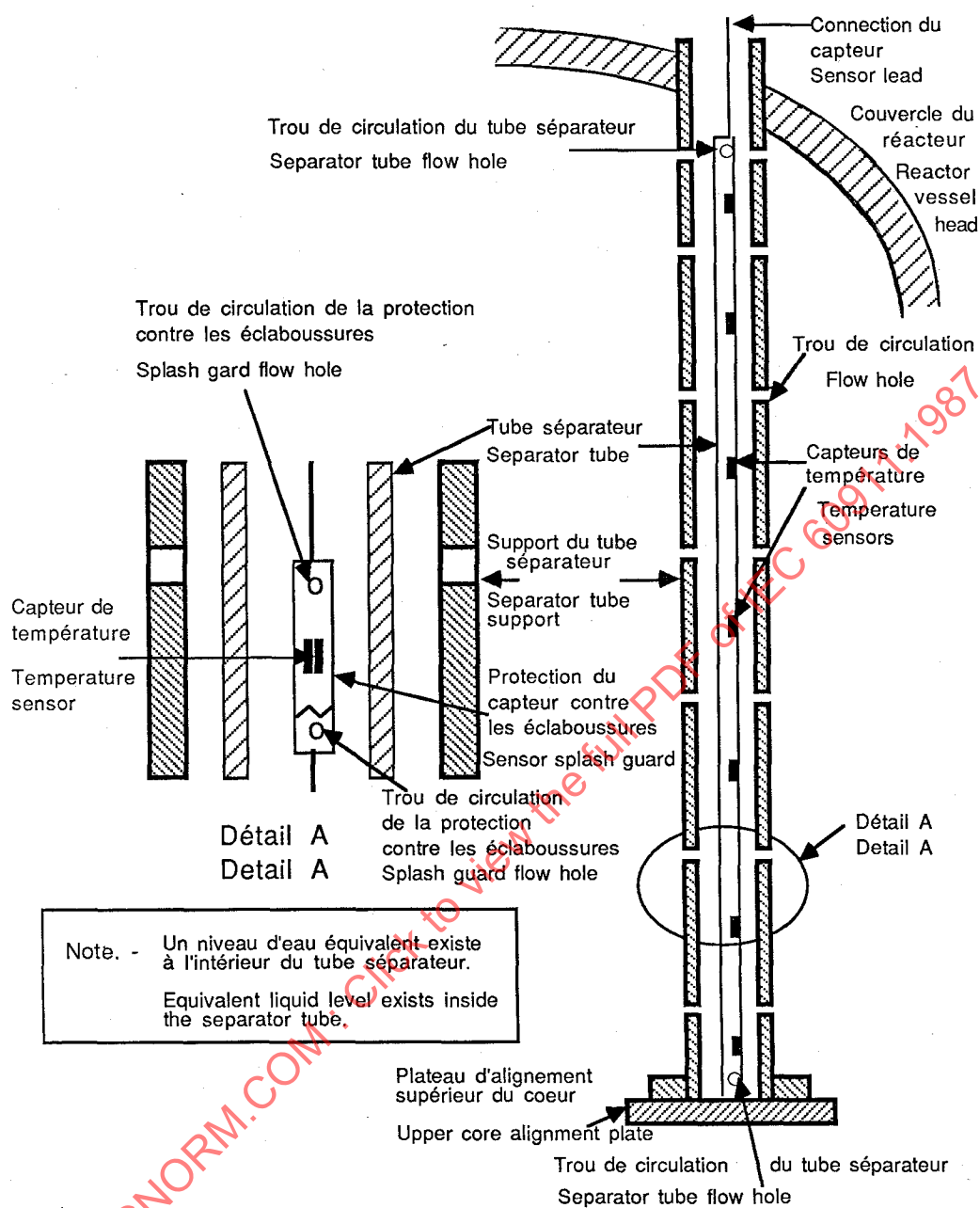


Fig. 3. - Mesure par capteur de température chauffé.
Heated temperature sensor measurement.

4.3 Mesures pour les conditions de surchauffe

Pour surveiller la sévérité des conditions de surchauffe, une instrumentation doit être prévue pour indiquer la température de sortie du cœur et le niveau de surchauffe. La pression du fluide de refroidissement et la température de sortie du cœur doivent être mesurées et enregistrées. Les mêmes instruments utilisés pour la mesure du sous-refroidissement peuvent l'être pour mesurer le niveau de surchauffe. A partir de ces informations, il est possible de déterminer le niveau de surchauffe, c'est-à-dire la différence entre la température de la vapeur et la température de saturation.

Le système d'instrumentation doit calculer et afficher la température de la vapeur et le niveau de surchauffe d'une façon continue ou à une fréquence en rapport avec le temps de réponse de la mesure. L'étendue de mesure de l'instrumentation doit être appropriée à l'étendue de mesure estimée pour la température de surchauffe qui pourrait survenir pendant un accident.

5. Présentation de l'information

Les prescriptions de la CEI sur la visualisation des informations en salle de commande sont applicables. La conception de l'instrumentation doit prendre en compte les facteurs suivants:

- a) Etendue de mesure et sensibilité suffisantes et adaptées.
- b) Analyse des besoins et des procédures demandant des étendues de mesures élargies pour des conditions spéciales de fonctionnement.
- c) Repérage; par exemple par un code de couleurs.
- d) Temps de réponse.

La prise en compte des facteurs humains est indispensable pour assurer la compatibilité entre l'information présentée et la tâche à accomplir par l'opérateur. Il convient de tenir compte de considérations ergonomiques lors de la conception de la visualisation de l'information pour l'opérateur en salle de commande.

6. Classe de sûreté de l'instrumentation

Le matériel exigé pour remplir les fonctions définies par cette norme est classé de sûreté. Cependant, ce matériel peut être partiellement utilisé dans d'autres systèmes d'une classe de sûreté supérieure. Dans ce cas, la classe de sûreté la plus élevée doit être adaptée pour la partie commune et le reste du matériel ne doit pas diminuer la fiabilité des autres systèmes.

7. Qualification

Les prescriptions relatives à la qualification de l'instrumentation sont définies dans la Publication 780 de la CEI.

4.3 Measurements for superheated condition

To monitor the severity of the superheated condition, instrumentation shall be provided to indicate the core exit temperature and the amount of superheat. The coolant pressure and the core exit temperature shall be measured and recorded. The same instrument used to measure subcooling can be used to measure the amount of superheat. From this information it is possible to derive the amount of superheat, i.e. the difference between steam temperature and saturation temperature.

The instrumentation system shall calculate and display the steam temperature and the amount of superheat continuously or at a frequency consistent with the response time for the measurement. The range of the measurement shall be appropriate for the estimated range of superheat temperature that could occur during an accident.

5. Presentation of information

IEC requirements on "Design standard of control room" are applicable. The design of the instrumentation display shall include consideration of the following factors:

- a) Adequacy and sufficiency of the measuring range and of the sensitivity.
- b) Recognition of the needs and procedures requiring an extension of the range of display under special operational situations.
- c) Identification; for example colour coding.
- d) Response time.

Human factor principles shall be applied to ensure that the information to be presented is consistent with the task to be performed by the operator. The design of the display for presenting the information to the operator in the control room should take into account ergonomic considerations.

6. Safety classification of the equipment

The hardware required to perform the functions defined by this standard is classified as a safety-related system. However, this hardware may be partially shared with other systems of a higher safety class. In this case, the highest safety class shall be implemented for the common part and the remaining hardware shall not decrease the reliability of the other systems.

7. Qualification

Applicable qualification requirements are described in IEC Publication 780.

ANNEXE A

ANALYSE THERMODYNAMIQUE DU CIRCUIT PRIMAIRE

A1. Généralités

Il est important que l'opérateur puisse comprendre le comportement thermodynamique du circuit primaire pour être en mesure de prendre les décisions nécessaires, en particulier pendant les conditions anormales. L'exposé suivant aidera à fournir une visualisation appropriée pour permettre à l'opérateur de faire face aux situations qui se présentent à lui. Les propositions d'affichage ne sont pas considérées comme obligatoires, ni exclusives, mais peuvent constituer des recommandations pour le concepteur.

A2. Evaluation des conditions thermodynamiques

Les états possibles du fluide de refroidissement du réacteur peuvent être évalués en étudiant le comportement en masse, en énergie et en quantité de mouvement.

A2.1 Comportement en quantité de mouvement et en masse

Le comportement en quantité de mouvement définit le mode de circulation du fluide de refroidissement du réacteur.

Les modes fondamentaux de circulation du fluide sont les suivants:

- 1) Circulation forcée de liquide.
- 2) Circulation forcée diphasique (liquide, vapeur).
- 3) Circulation naturelle de liquide.
- 4) Circulation naturelle diphasique.
- 5) Pas de circulation, mais évacuation de l'énergie par:
 - a) ébullition et condensation;
 - b) alimentation (par exemple par injection de sécurité) et purge (par exemple par vanne de décharge de pression).

Pour les deux premiers modes, la circulation se fait par les pompes primaires de refroidissement. Pour les modes 3) et 4), la circulation naturelle est obtenue par la différence de densité du fluide, due à l'existence d'une source chaude située plus bas que la source froide. Pour le mode 5), la circulation complète ne se faisant pas dans le circuit primaire, l'énergie est évacuée par circulation locale. Dans le mode 5a), le fluide est porté à ébullition par le cœur et la vapeur arrive au générateur de vapeur où elle est condensée. L'eau condensée est ensuite ramenée vers le cœur par la branche chaude. Dans le mode 5b), l'énergie est transférée hors du circuit primaire par ouverture d'une vanne de décharge et un fluide réfrigérant de plus basse énergie est introduit par le système d'injection de sécurité haute pression.

Pendant le fonctionnement normal en régime permanent, la masse de fluide dans le circuit primaire est constante et se présente sous forme liquide. La quantité de fluide pénétrant dans le circuit est égale à celle qui en sort; le circuit est donc en équilibre et peut être surveillé par le niveau du pressuriseur.

Pendant un accident, les conditions sont anormales. Un des accidents possibles est la perte de fluide consécutive à la rupture d'une conduite ou au blocage d'une vanne de sécurité en position ouverte. Pendant cet accident, le fluide peut aussi pénétrer dans le circuit primaire par le système d'injection de sécurité.

APPENDIX A

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE REACTOR COOLANT SYSTEM

A1. General

It is important for the operator to understand the thermodynamic behaviour of the reactor coolant system in order to make the proper decisions, especially during abnormal conditions. The following discussion will assist in providing the proper display to allow the operator to evaluate the situation. The proposals for the displays are not mandatory or exclusive but they may serve as recommendations to the designer.

A2. Assessment of thermodynamic conditions

The possible states of the reactor coolant can be assessed by studying the mass, energy and momentum behaviour.

A2.1 *Momentum and mass behaviour*

The momentum behaviour defines the mode of the reactor coolant circulation.

The fundamental modes of coolant circulation are:

- 1) Forced circulation of liquid.
- 2) Forced circulation of two phases (liquid, steam).
- 3) Natural circulation of liquid.
- 4) Natural circulation of two phases.
- 5) No circulation but energy removal by:
 - a) pool boiling and reflux condensing;
 - b) feed (e.g. via safety injection) and bleed (e.g. via pressure relief valve).

In the first two modes, the coolant is circulated by the reactor coolant pumps. In modes 3) and 4), natural circulation is obtained by the difference of the coolant density due to the existence of a heat source located low relative to a heat sink located high. In mode 5), while there is not complete circulation in the coolant system, energy is removed by local circulation. In mode 5a), the coolant is boiled from the core and the steam travels to the steam generator where it is condensed. The condensate is then returned to the core by flowing back through the hot leg. In mode 5b), the energy is transferred out of the coolant system by opening a relief valve and coolant of lower energy content is introduced via a high pressure safety injection system.

During normal steady-state operation, the mass of the coolant in the reactor coolant system is constant and the coolant is in the liquid state. The amount of fluid entering the system equals the amount of fluid leaving the system, i.e., the system is in equilibrium and can be monitored by the pressurizer level.

During an accident, conditions are abnormal. One possible accident is a loss of coolant from a crack in a pipe or a stuck-open relief valve. During this accident, coolant can also enter the reactor system from the injection system.

Dans cette situation, l'injection de fluide réfrigérant peut être faite au moyen des pompes d'injection haute et basse pression ou bien par le réservoir d'injection de sécurité. Dans le cas d'une rupture de tube du générateur de vapeur, le fluide réfrigérant peut être fourni au circuit secondaire, ou passer du circuit secondaire vers le circuit primaire.

A2.2 Comportement en énergie

En fonctionnement normal, la chaleur dégagée par le cœur et par d'autres sources, telles les pompes primaires de refroidissement, est transférée au circuit secondaire, ainsi que dans certains systèmes auxiliaires. Le système est alors en équilibre.

Pendant un accident, le nombre et la nature des sources de chaleur peuvent se trouver modifiés. Par exemple, après un arrêt d'urgence du réacteur, les principales sources de chaleur sont la chaleur résiduelle, le circuit secondaire (si la température du circuit primaire descend au-dessous de celle du secondaire) et les pompes primaires de refroidissement, si elles sont en fonctionnement. De plus, si le cœur passe en surchauffe, il se produit une réaction métal-réfrigérant qui engendre un dégagement important d'énergie. La chaleur peut être transférée hors du circuit primaire en utilisant un des modes décrits au paragraphe précédent.

A3. Paramètres de visualisation

Dans des conditions anormales, il n'est pas pratique d'effectuer la mesure du volume du fluide réfrigérant dans le circuit primaire. Il n'est également pas facile de mesurer l'énergie contenue dans ce circuit et d'en fournir une valeur précise pour une telle situation.

Il y a cependant deux paramètres physiques directement mesurables (pression et température) dont les variations peuvent être interprétées comme des changements du bilan de masse et d'énergie du circuit primaire. La pression dans le circuit primaire et la température du fluide réfrigérant sont des paramètres physiques clairement définis et mesurables. Il est toutefois important de noter l'endroit où ces paramètres sont mesurés (spécialement la température). La température du fluide réfrigérant peut, par exemple, être mesurée à l'entrée ou à la sortie du réacteur et à la sortie du cœur. La pression, la température et le sous-refroidissement peuvent demeurer constants, augmenter ou diminuer.

Les 13 cas envisageables physiquement pour ces paramètres figurent dans le tableau A1, et peuvent être visualisés.

Pour donner un exemple d'utilisation de ce tableau, on peut considérer l'ouverture rapide d'une vanne de décharge du pressuriseur, suivie par sa fermeture ultérieure. Le fonctionnement normal (avant l'ouverture de la vanne) correspond au cas 0. L'ouverture rapide de la vanne entraîne une baisse immédiate de la pression dans le circuit primaire, alors que la température du fluide réfrigérant ne subit aucune modification puisqu'en condition normale on était dans la zone sous-refroidie (cas 9). Puis la baisse de pression continuant, la température de saturation devient égale à celle du fluide; à partir de ce moment, toute baisse de pression réduit la température du fluide réfrigérant (cas 11). Si la vanne est alors refermée, il se produit une augmentation de la pression dans le circuit primaire et de la température du fluide réfrigérant (cas 5). Lorsque la réserve en fluide est augmentée et que le circuit revient à la normale, l'équilibre est à nouveau atteint et correspond au cas 0.

In this situation, the coolant injection can be delivered by high and low pressure injection pumps as well as the safety injection tank. In the event of a steam generator tube rupture, coolant can be supplied to the secondary system or lost from the secondary system to the reactor coolant system.

A2.2 *Energy behaviour*

During normal operation, the heat generated in the core and in other sources such as the reactor coolant pumps, is transferred to the secondary coolant as well as to some auxiliary systems. The system is in equilibrium.

During an accident, both the number and the nature of the heat sources can be changed. For example, after a reactor trip, the major heat sources are the decay heat, the secondary side coolant (when the reactor temperature drops below the secondary coolant temperature), and the reactor coolant pumps, if they are operating. In addition, if the core becomes overheated, a metal-coolant reaction occurs and generates considerable energy. Heat may be transferred out of the system by any of the modes discussed in the previous sub-clause.

A3. *Display parameters*

It is impractical to measure the total coolant volume in the reactor coolant system during abnormal conditions. It is equally impractical to measure the energy content of the reactor coolant and present a precise value during these conditions.

There are, however, two directly measurable physical parameters (pressure and temperature) whose changes can be interpreted as changes in the mass and energy balance of the reactor coolant system. The pressure and the temperature of the coolant are clearly defined and measurable physical parameters. However, it is important to note where these parameters (especially temperature) are measured. For example, coolant temperature is measured at the reactor inlet, at the reactor outlet and at the core exit. Pressure, temperature and subcooling can remain constant, increase or decrease.

The 13 cases which are physically possible for these parameters are shown in Table A1, and can be displayed.

To provide an example of the use of this table, consider a quick opening of a pressurizer relief valve followed by closure of the valve at a later time. Normal operation (prior to the valve opening) corresponds to case 0. The quick opening of the valve will result in an immediate drop of coolant pressure while the coolant temperature does not change, since the normal condition was in the subcooled region (case 9). Later the continuing pressure decrease will cause the saturation temperature to be equal to the coolant temperature and further decreases in pressure will cause the coolant temperature to decrease also (case 11). If the valve is then closed, pressure and coolant temperature will increase (case 5). As the coolant inventory is increased and the system returns to normal, equilibrium will be reached again corresponding to case 0.

Tableau A1

Treize différents cas de changement de pression, température et sous-refroidissement

Cas	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Pression	→	→	↗	↗	↗	↗	↗	→	↘	↘	↘	↘	↘
Température	→	↘	↘	→	↗	↗	↗	↗	↗	→	↘	↘	↘
Sous-refroidissement	→	↗	↗	↗	↗	→	↘	↘	↘	↘	↘	→	↗

A4. Exemples de visualisations

Il existe plusieurs méthodes d'affichage. Elles ne sont pas redondantes mais plutôt complémentaires, du point de vue de la perception humaine. La plupart des salles de commande sont actuellement équipées de calculateurs et d'écrans de visualisation. Cette information peut donc être présentée à l'opérateur et lui être très utile pour le choix de l'action à entreprendre. Des exemples de visualisations d'informations sont donnés sur les figures A1 à A3. Bien que ces exemples soient de type analogique, des affichages numériques sont également acceptables.

A4.1 Affichage en fonction de l'écart pression-température

L'affichage présenté à la figure A1 est utile lorsque le circuit primaire est en situation de sous-refroidissement et permet à l'opérateur de constater directement tout écart par rapport au point de fonctionnement normal. Pour faciliter la tâche de l'opérateur, le point de fonctionnement peut être représenté dans un système de coordonnées pression-température. L'écart par rapport à la pression normale est représenté sur l'axe X et celui par rapport à la température normale sur l'axe Y. La courbe de saturation peut apparaître sur cette figure. Sa pression va être coupée à gauche de l'origine et sa température au-dessus de l'origine. Cela est indiqué sur la figure A1 en trait plus épais. Cette ligne peut également comprendre une marge pour l'erreur due à l'instrumentation. Une ligne peut être tracée sur une zone de température et de pression qui soit approximativement parallèle à la ligne plus épaisse dont la température et la pression coupent les axes à l'origine. Cela représente une ligne à sous-refroidissement constant par rapport à sa valeur normale. Le glissement de cette ligne vers la gauche indique une diminution du sous-refroidissement. Lorsque la pression et la température dans le circuit primaire atteignent la ligne plus épaisse, l'ébullition se produit. A ce stade, il faut effectuer la mesure des niveaux de réfrigérant du réacteur pour déterminer l'état du fluide réfrigérant.