

NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

CEI
IEC
193A

Première édition
First edition
1972

Premier complément à la Publication 193 (1965)

**Code international concernant les essais
de réception sur modèle des turbines
hydrauliques**

First supplement to Publication 193 (1965)

**International code for model acceptance tests
of hydraulic turbines**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 193A: 1972

Numéros des publications

Depuis le 1er 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 ces révisions, à l'établissement des éditions révisées et aux amendements peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et dans les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
Accès en ligne*
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement (Accès en ligne)*

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*.

Publications de la CEI établies par le même comité d'études

L'attention du lecteur est attirée sur les listes figurant à la fin de cette publication, qui énumèrent les publications de la CEI préparées par le comité d'études qui a établi la présente publication.

* 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 revision work, the issue of revised editions and amendments may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
On-line access*
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates (On-line access)*

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*.

IEC publications prepared by the same technical committee

The attention of readers is drawn to the end pages of this publication which list the IEC publications issued by the technical committee which has prepared the present publication.

* See web site address on title page.

NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

CEI
IEC
193A

Première édition
First edition
1972

Premier complément à la Publication 193 (1965)

**Code international concernant les essais
de réception sur modèle des turbines
hydrauliques**

First supplement to Publication 193 (1965)

**International code for model acceptance tests
of hydraulic turbines**

© CEI 1972 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.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembe Genève, Suisse



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

P

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

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4

CHAPITRE XI: ESSAIS DE CAVITATION

INTRODUCTION	6
------------------------	---

Articles

1. Objet et domaine d'application	6
2. Garanties concernant l'influence de la cavitation	6
3. Installation d'essai	8
4. Caractéristiques de l'eau	10
5. Conditions d'essai	12
6. Exécution des essais de cavitation	22
7. Interprétation des essais	24

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5

CHAPTER XI: CAVITATION TESTS

INTRODUCTION	7
------------------------	---

Clause

1. Object and scope	7
2. Guarantees for the influence of cavitation	7
3. Test installations	9
4. Conditions of the water	11
5. Test conditions	13
6. Execution of the cavitation tests	23
7. Interpretation of tests	25

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

PREMIER COMPLÉMENT A LA PUBLICATION 193 (1965)
CODE INTERNATIONAL CONCERNANT LES ESSAIS DE RÉCEPTION
SUR MODÈLE DES TURBINES HYDRAULIQUES

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 cette unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux ne possédant pas encore de règles nationales, lorsqu'ils préparent ces règles, prennent comme base fondamentale de ces règles les recommandations de la CEI dans la mesure où les conditions nationales le permettent.
- 4) On reconnaît qu'il est désirable que l'accord international sur ces questions soit suivi d'un effort pour harmoniser les règles nationales de normalisation avec ces recommandations dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Les Comités nationaux s'engagent à user de leur influence dans ce but.

PRÉFACE

La présente recommandation a été établie par le Comité d'Etudes N° 4 de la CEI : Turbines hydrauliques.

Un Groupe de Travail fut constitué en 1961 à Interlaken en vue de « définir le coefficient de cavitation et les méthodes pour le mesurer ». Au fur et à mesure de l'avancement des travaux, la nécessité d'élargir leur domaine d'application est apparue. Cette évolution conduisit à la présente recommandation qui a la forme d'un chapitre additionnel de la Publication 193 de la CEI, intitulée « Code international concernant les essais de réception sur modèle des turbines hydrauliques ». Cette dernière publication ayant déjà paru, la présente recommandation a été établie sous forme de complément séparé à la Publication 193 * de la CEI. Lors de la révision de celle-ci, le Chapitre XI y sera inséré pour former une recommandation.

A la suite de plusieurs révisions, ce projet définitif fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en juin 1969.

Les pays suivants se sont prononcés explicitement en faveur de la publication :

Allemagne	Italie
Australie	Japon
Autriche	Norvège
Belgique	Pologne
Canada	Royaume-Uni
Etats-Unis	Suède
d'Amérique	Suisse
Finlande	Tchécoslovaquie
France	Turquie
Hongrie	Union des Républiques
Israël	Socialistes Soviétiques

* Les numéros du tableau et des figures de la présente publication suivent l'ordre de la Publication 193 de la CEI.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

FIRST SUPPLEMENT TO PUBLICATION 193 (1965)
INTERNATIONAL CODE FOR MODEL ACCEPTANCE TESTS
OF HYDRAULIC TURBINES

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 this international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees having as yet no national rules, when preparing such rules, should use the IEC recommendations as the fundamental basis for these rules in so far as national conditions will permit.
- 4) The desirability is recognized of extending international agreement on these matters through an endeavour to harmonize national standardization rules with these recommendations in so far as national conditions will permit. The National Committees pledge their influence towards that end.

PREFACE

This Recommendation has been prepared by IEC Technical Committee No. 4, Hydraulic Turbines.

A Working Group was established in 1961 at Interlaken to "Define the cavitation factor and the methods of measuring it". As the work progressed, the need for expanding the scope of the work became apparent. This development led to the present Recommendation which is in the form of an added Chapter to IEC Publication 193, International Code for Model Acceptance Tests of Hydraulic Turbines. Since the latter document has already been published, the present Recommendation has been prepared as a separate supplement to IEC Publication 193 *. When Publication 193 is revised, Chapter XI will be incorporated with it as one Recommendation.

After several revisions, this final draft was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in June 1969.

The following countries voted explicitly in favour of publication :

Australia	Italy
Austria	Japan
Belgium	Norway
Canada	Poland
Czechoslovakia	Sweden
Finland	Switzerland
France	Turkey
Germany	Union of Soviet Socialist Republics
Hungary	United Kingdom
Israel	United States of America

* The numbering of the Table and Figures in this publication follows the sequence in IEC Publication 193.

PREMIER COMPLÉMENT A LA PUBLICATION 193 (1965)
CODE INTERNATIONAL CONCERNANT LES ESSAIS DE RÉCEPTION
SUR MODÈLE DES TURBINES HYDRAULIQUES

CHAPITRE XI : ESSAIS DE CAVITATION

INTRODUCTION

Pour être vraiment complet et représentatif, un essai de réception sur modèle réduit devrait aussi comporter un essai de cavitation sur le même modèle ou un modèle semblable. L'objet de ce chapitre est de donner les recommandations appropriées, basées sur une théorie et une expérience bien établies.

Les principes et méthodes faisant encore l'objet de recherches ou n'étant pas encore généralement acceptés ont été omis ou ont été traités d'une façon générale en évitant les prises de position trop strictes ou trop formelles.

1. Objet et domaine d'application

1.1 L'objet de ce chapitre est :

- de définir les principes permettant d'établir des garanties concernant l'influence de la cavitation sur les caractéristiques de fonctionnement et essentiellement sur le rendement (paragraphe III.2.2.1) d'une turbine hydraulique dans des conditions de marche déterminées. Le contrôle de telles garanties doit être possible par des essais sur modèle ;
- de décrire les méthodes et les procédures d'essais de cavitation ;
- de définir les méthodes d'interprétation de tels essais de cavitation sur modèle et les procédés pour leur comparaison finale aux garanties.

1.2 Ce chapitre s'applique, d'une manière générale, à toutes les turbines hydrauliques à réaction pour lesquelles des essais de cavitation sur modèle doivent être exécutés.

1.3 Bien que l'objet primaire des essais de cavitation décrits ici soit la vérification de certaines garanties de fonctionnement, il est recommandé que les mêmes principes et les mêmes méthodes soient appliqués pour les essais comparatifs et les essais de recherche.

1.4 Les problèmes d'instabilité, même lorsqu'ils résultent des effets de la cavitation, sont exclus de ce chapitre. Ils ne peuvent en effet être traités valablement dans les conditions de similitude prises en considération dans ce chapitre.

2. Garanties concernant l'influence de la cavitation

2.1 Généralités

Dans tous les cas où les essais de réception sont faits sur modèle, il est nécessaire de contrôler l'influence de la cavitation sur les rendements du modèle, mesurés conformément aux recommandations énoncées dans les chapitres précédents. Il est nécessaire de spécifier clairement dans le contrat si les rendements garantis du modèle sont donnés, en ce qui concerne les niveaux d'eau, dans les conditions hydrauliques particulières prévalant à l'usine, communément exprimées sous la forme des valeurs du coefficient de cavitation d'installation (paragraphe XI.5.1.1), ou pour des valeurs suffisamment élevées de ce coefficient, éliminant l'influence de la cavitation sur les caractéristiques (voir paragraphe III.2.2.1).

FIRST SUPPLEMENT TO PUBLICATION 193 (1965)
INTERNATIONAL TEST CODE FOR CAVITATION ACCEPTANCE TESTS
FOR MODEL HYDRAULIC TURBINES

CHAPTER XI: CAVITATION TESTS

INTRODUCTION

To be truly complete and representative, an acceptance model test should include a cavitation model test with the same or a similar model turbine. The purpose of this chapter is to provide suitable recommendations for such a test, based on well established theory and practice.

Principles and methods, which are still subject to research or not yet generally accepted, have been omitted or have been dealt with in a general way, avoiding too strict or formal statements.

1. Object and scope

1.1 The object of this chapter is:

- to lay down the principles enabling guarantees to be given relating to the influence of cavitation on the performance characteristics and essentially on efficiency (Sub-clause III.2.2.1) of hydraulic turbines under specified running conditions. The checking of such guarantees shall be possible by means of model tests;
- to describe the methods and procedures of cavitation model tests;
- to define the methods of interpretation for cavitation model tests and the procedure for their final comparison with guarantees.

1.2 This chapter applies generally to all hydraulic turbines of the reaction type on which cavitation model tests are to be carried out.

1.3 Whilst primarily the scope of cavitation tests here described will be the verification of certain performance guarantees, it is recommended that the same principles and methods be applied for comparative tests and research tests.

1.4 Problems of behaviour and stability even when these are the result of cavitation effects are excluded from this chapter. They cannot in effect, be treated validly with the conditions of similitude taken into consideration in this chapter.

2. Guarantees for the influence of cavitation

2.1 General

In cases where the efficiency acceptance tests are made on a model, it is necessary to check the influence of cavitation on the model efficiencies as obtained by tests performed in accordance with the previous chapters. It is necessary to state clearly in the contract whether model guaranteed efficiencies are given under specified hydraulic conditions with respect to prevailing water levels at site, usually expressed in the form of plant cavitation factor values (See Sub-clause XI.5.1.1) or for sufficiently high cavitation factor values to exclude cavitation influence on performance. (See Sub-clause III.2.2.1)

There is not yet a commonly accepted theory for the transposition of cavitation model test results to prototype conditions ; therefore, guarantees applicable to cavitation model tests must be given for a model turbine of a given size to be treated under a head within a given head range.

2.2 *Guarantees concerning alteration of efficiency*

A guarantee is generally given concerning model efficiency under hydraulic conditions corresponding to water levels at site.

2.3 *Guarantees concerning runaway speed and/or discharge*

A separate guarantee for runaway speed and/or discharge may be given. As cavitation very often has a decisive influence on runaway characteristics, the guarantee should refer to a given range of cavitation factor σ (See Sub-clause XI.5.1.1) prevailing in the prototype installation.

The maximum runaway speed and maximum runaway discharge are the highest speed and discharge the turbine could ever reach when rotating at zero torque under the above-mentioned conditions.

In the case of adjustable blade turbines, additional guarantees may be given for the runaway speed and/or discharge for the condition in which correct combination between runner blades and guide vanes is maintained.

2.4 *Limitation of guarantees for cavitation*

Cavitation may effect the behaviour of a hydraulic turbine in several ways. It may cause noise, vibrations, material damage (pitting) and alteration of performance, as defined by changes of efficiency, output, discharge, runaway speed and runaway discharge.

When separate guarantees are made with respect to pitting, noise or vibrations, they shall always be referred to the full scale machine. Such guarantees are subject to separate checking by field investigation.

2.5 *Additional information not subject to guarantee*

In addition, the contract may stipulate, to establish during acceptance tests, a certain number of curves of efficiency against cavitation factor corresponding to predetermined operating conditions. These would generally be near the limits of the contractual range of operation for the turbine.

Depending on the type of turbine and the range of operation, these curves may have very different shapes. But for low cavitation factor, they generally show a characteristic drop in efficiency corresponding to developed cavitation. It may therefore be possible to define from these curves the characteristic values of a cavitation factor as described in Sub-clause XI.7.3.1.4, which may then be compared with the value of the plant cavitation factor.

3. **Test installations**

3.1 *General characteristics of the circuit*

The circuit shall be such that when cavitation appears in the model turbine it shall not occur elsewhere to an extent where it affects the stability or the satisfactory operation of the installation or the measurement of the model performance.

It must be ensured that cavitation and the bubbles and degassing produced by cavitation in the model do not affect the functioning of instrumentation particularly the flow measuring device.

Il n'existe pas encore de théorie communément acceptée pour une transposition des essais de cavitation du modèle aux conditions du prototype ; c'est pourquoi les garanties applicables aux essais de cavitation sur modèle doivent être données pour un modèle de turbines de dimensions données essayé dans une gamme de chute bien définie.

2.2 *Garanties concernant l'altération des rendements*

Il existe généralement une garantie concernant les rendements du modèle dans les conditions hydrauliques correspondant aux niveaux d'eau à l'usine.

2.3 *Garanties concernant la vitesse d'emballement et/ou le débit d'emballement*

Il peut exister une garantie séparée pour la vitesse d'emballement et/ou le débit d'emballement. Comme la cavitation a une influence décisive sur les caractéristiques d'emballement, la garantie doit se rapporter à un domaine déterminé de coefficient de cavitation σ (voir paragraphe XI.5.1.1) prévalant dans l'installation prototype.

La vitesse maximale d'emballement et le débit maximal d'emballement sont la plus grande vitesse ou le plus grand débit que la turbine peut atteindre en tournant à couple nul dans les conditions précisées ci-dessus.

Dans le cas des turbines à pales mobiles, une garantie supplémentaire peut être donnée pour la vitesse et/ou le débit d'emballement dans les conditions pour lesquelles une conjugaison correcte est maintenue, entre les pales de la roue et les aubes du distributeur.

2.4 *Limitation des garanties concernant la cavitation*

La cavitation peut affecter le comportement d'une turbine hydraulique de différentes façons. Elle peut être la cause de bruit, de vibrations, de dommages matériels (érosion) et d'altération des caractéristiques, c'est-à-dire plus précisément du rendement, de la puissance, du débit, de la vitesse et du débit d'emballement.

Quand des garanties séparées seront données respectivement pour l'érosion, le bruit ou les vibrations, elles concerneront toujours le prototype. De telles garanties feront l'objet de contrôles séparés sur place.

2.5 *Informations additionnelles n'étant pas sujettes à garantie*

En complément, le contrat peut prévoir que quelques courbes de rendement en fonction du coefficient de cavitation soient relevées durant les essais de réception. Ces courbes correspondront à des conditions de fonctionnement prédéterminées de la turbine et généralement voisines des limites de la zone de fonctionnement contractuelle de la turbine.

Ces courbes peuvent présenter des allures diverses, selon le type de turbine de la zone de fonctionnement. Cependant, elles indiquent généralement une chute de rendement significative correspondant à un développement de cavitation prononcé lorsque le coefficient de cavitation atteint des valeurs basses. Il peut de ce fait être possible de définir sur ces courbes des valeurs caractéristiques d'un coefficient de cavitation, telles que celles décrites au paragraphe XI.7.3.1.4, qui pourront être comparées à la valeur de ce même coefficient de cavitation particulier à l'usine.

3. **Installation d'essai**

3.1 *Caractéristiques générales du circuit*

Le circuit doit être tel que lorsque la cavitation apparaît dans le modèle de turbine, elle ne doit pas se développer ailleurs dans une proportion telle qu'elle affecterait la stabilité ou le fonctionnement satisfaisant de l'installation d'essai ou la mesure des performances du modèle.

On devra s'assurer que la cavitation, les bulles et le dégazage produits par la cavitation dans le modèle n'affectent pas le fonctionnement des instruments, particulièrement celui de l'appareil de mesure du débit.

Les conditions de mesure sur la plate-forme d'essais de cavitation, que celle-ci soit la même ou non que celle utilisée pour la détermination des courbes de rendement, seront compatibles avec les conditions spécifiées dans les autres chapitres de ce code d'essais sur modèle. Mais des considérations pratiques (paragraphe XI.4.1) dues aux basses pressions absolues peuvent demander des chutes plus hautes que les valeurs minimales (paragraphe IV.2.1.)

3.2 *Dimensions du modèle*

L'expérience a montré que les dimensions du modèle sont de première importance pour les essais de cavitation. Il est donc essentiel de satisfaire aux valeurs minimales prescrites pour D_s (pas moins de 250 mm) et R_e au paragraphe IV.2.1 et elles devraient d'ailleurs être dépassées dans la mesure où les installations d'essai disponibles le permettent.

Des recommandations complémentaires concernant l'échelle du modèle, compte tenu de la similitude de cavitation, seront données aux paragraphes XI.5.1 et XI.5.2.

3.3 *Conditions d'observation*

3.3.1 *Observation de l'eau dans le circuit*

Quel que soit le type du circuit utilisé, on devra prévoir des moyens d'observation visuelle de l'état de l'eau, particulièrement en ce qui concerne les bulles en suspension qui entrent dans le modèle et la propreté de l'eau, aussi bien à l'entrée de la turbine qu'à l'amont de l'appareil de mesure du débit.

3.3.2 *Observation de la roue de turbine*

Le manteau de la roue et/ou l'aspirateur devront être étudiés de manière à permettre l'observation du développement de la cavitation pour autant que les possibilités de déformation des matériaux transparents n'aillent pas à l'encontre de l'obtention de jeux convenables (paragraphe IV.2.4) comme on le précise au paragraphe XI.5.3.5.

3.4 *Conditions d'écoulement avant et après le modèle*

Les conditions spécifiées au paragraphe IV.1.2 doivent être respectées.

4. **Caractéristiques de l'eau**

4.1 *Propriétés physiques de l'eau*

Les conditions spécifiées au paragraphe IV.1.1 doivent être respectées, particulièrement à l'entrée de la turbine et de l'appareil de mesure de débit. Grâce aux moyens d'observation visuelle prévus (paragraphe XI.3.3.2), on contrôlera périodiquement qu'il n'y a aucune entrée d'air dans le modèle.

4.2 *Teneur en air*

4.2.1 *Généralités*

La teneur totale en air (air dissous et air occlus) de l'eau utilisée sur la plate-forme doit être connue pour l'essai. L'expérience présente dans les circuits fermés montre que l'influence de la teneur en air sur les essais de réception de cavitation peut être négligée dans la mesure où la teneur totale en air n'est pas inférieure à 2 ‰ en volume dans des conditions de pression et de température standard. *

Inversement, l'eau du circuit ne doit pas être sursaturée, de manière à éviter tout dégazage dans le modèle.

Il est possible d'examiner l'influence de la teneur en air en répétant le même essai dans les conditions de teneur en air aussi différentes que le permet l'installation d'essais.

* Les conditions standard sont définies par :

— température 20 °C ;
— pression 1 bar.

The measuring conditions on the cavitation test rig, whether this be the same as that used for the determination of the efficiency curve or not, shall conform with the conditions specified in the other chapters of this model test code. But practical considerations (Sub-clause XI.4.1) due to low absolute pressures may require test heads higher than the minima (Sub-clause IV.2.1).

3.2 *Model dimensions*

Experience has shown that model dimensions are of great importance for cavitation tests. It is therefore essential to satisfy the minimum values required for D_s (not less than 250 mm) and R_e described in Sub-clause IV.2.1 and they should be exceeded as far as the available test installation permits.

Further recommendations governing model scale with respect to cavitation similitude are presented in Sub-clauses XI.5.1 and XI.5.2.

3.3 *Viewing conditions*

3.3.1 *Observation of the water in the circuit*

Whatever the type of circuit used, provision should be made for visual observation of the condition of the water with particular reference to the bubble content coming into the model and the cleanliness both at the inlet of the turbine and upstream of the flow measuring device.

3.3.2 *Viewing the turbine runner*

The runner chamber and/or draft tube should be designed so as to allow observation of cavitation development in so far as the dimensional instability of transparent materials does not interfere with proper clearances (Sub-clause IV.2.4), particularly with respect to the requirements of Sub-clause XI.5.3.5.

3.4 *Flow conditions in the model*

The conditions specified in Sub-clause IV.1.2 shall be fulfilled.

4. **Conditions of the water**

4.1 *Properties of the water*

The conditions specified in Sub-clause IV.1.1 shall be fulfilled, particularly at the inlet of the turbine and at the flow measuring device. By means of the viewing possibilities provided (Sub-clause XI.3.3.2) a periodic check shall be made to ensure that no air leakage exists.

4.2 *Air content*

4.2.1 *General*

The total air content of the water including both entrained and dissolved air used in the test rig should be known for the test. Present experience in closed circuits indicates that the influence of air content on a cavitation acceptance test may be neglected if the total air content, at standard conditions of pressure and temperature * is not less than 2 parts in 1 000 (volume).

Inversely, in order to avoid degassing in any part of the model, the water of the circuit should not be supersaturated.

It is possible to examine this influence by repetition of the same test run under air content conditions as different as permitted by the test installation.

* Standard conditions are defined by :

— temperature 20 °C ;
— pressure 1 bar.

Afin d'éviter tout dégazage dans les circuits ouverts ou fermés, une augmentation de la hauteur de chute et du niveau général de pression peut être demandée.

4.2.2 Mesure de la teneur en air ^{1), 2)}

Les méthodes suivantes sont données à titre d'exemples :

a) Méthode de Winkler

Cette méthode permet de déterminer par iodométrie la quantité d'oxygène dissous dans l'eau. Elle est précise, mais nécessite des solutions titrées difficiles à conserver et une prise de prélèvements sans réaération de l'échantillon. Elle permet seulement d'obtenir la quantité d'air dissous par calcul.

b) Méthode de Van Slyke par séparation physique

Cette méthode a l'avantage de permettre l'extraction de la quantité totale d'air contenu dans l'eau sous forme d'air dissous ou occlus en faisant cascader sous vide le prélèvement sur des colonnes à plateau. La méthode est rapide, mais nécessite de travailler sur des échantillons de petit volume.

c) Enregistreurs de la teneur en air, utilisés en centrale thermique

Ils permettent l'enregistrement continu de la teneur totale en air, mais ils doivent être adaptés au domaine d'utilisation en laboratoire où l'eau est normalement saturée, alors qu'elle est presque complètement désaérée dans une centrale thermique.

4.3 Température

La température de l'eau du circuit sera mesurée près du modèle pour chaque essai, à l'entrée ou dans l'aspirateur.

5. Conditions d'essai

5.1 Similitude hydraulique — définitions générales

5.1.1 Coefficient de cavitation

En plus des conditions de similitude normalement respectées dans les essais de rendement ou de puissance, un paramètre supplémentaire, le coefficient de cavitation, doit être pris en considération pour les essais de cavitation.

Le coefficient de cavitation σ (coefficient de Thoma) caractérise la position d'une turbine hydraulique par rapport à l'altitude du niveau aval. Il doit être utilisé comme base de comparaison pour les conditions de cavitation sur le modèle et sur le prototype.

Le coefficient σ est un nombre sans dimension qui exprime la différence entre la charge de pression à la sortie de la turbine (mesurée par rapport à un point de référence dans la roue) et la hauteur d'eau équivalente à la tension de vapeur. Cette différence est rapportée à la chute nette :

$$\sigma = \frac{h_a - h'_s - h_{va}}{H_n}$$

h_{va} = hauteur d'eau équivalente à la tension de vapeur de l'eau à la température de l'essai (voir paragraphe II.2.6.10 et tableau VI, page 14).

H_n = chute nette (voir paragraphe II.2.6.5).

h_a = hauteur d'eau équivalente à la pression absolue à la sortie de la turbine par rapport à un niveau de référence quelconque.

h'_s = hauteur d'aspiration égale à l'élévation du point de référence choisi dans la roue au-dessus de l'altitude correspondant au niveau de référence choisi pour la mesure de h_a (voir figure 20, page 14).

¹⁾ P. CORMAULT: Méthode de mesures des teneurs en gaz de l'eau et appareillages — E.D.F. — Bulletin du Centre de Recherches et d'Essais de Chatou — Supplément au N° 2, Deuxième partie — Décembre 1962.

²⁾ E. KANELLOPOULOS: « A critical Survey of Methods for Measuring the Total Gas Content of Water » — N.E.L. Fluids Note N° 77 — East Kilbride, Glasgow, 1959.

In order to avoid any degassing in open or closed circuits, an increase of test head and general pressure level may be required.

4.2.2 Air content measurement ^{1), 2)}

The following are examples of methods which may be used.

a) Winkler method

This method enables determining, by iodometry, the dissolved oxygen content of the water. It is accurate, but necessitates titrated solutions which are difficult to keep and it requires sampling without re-aeration of the specimen. It only yields the value of dissolved air content by a calculation.

b) Physical separation : Van Slyke method

This method has the advantage of permitting the extraction of the quantity of air contained, whether in dissolved or occluded form, by cascading the sampling under vacuum on plate-posts. The method is speedy, but necessitates working on small volume samplings.

c) Gas content recorders, used in thermal power plant

They permit a continuous recording of the total gas content, but they must be adapted to the utilization range in the laboratory where the water is usually saturated, whereas it is nearly without gas in a thermal power plant.

4.3 Temperature

The temperature of the circuit water shall be measured for each test point close to the model at the inlet or in the draft tube.

5. Test conditions

5.1 Hydraulic similitude — General definitions

5.1.1 Cavitation factor

In addition to the similitude requirements normally involved in the performance tests, a supplementary parameter, the cavitation factor, must be taken into account during cavitation tests.

The cavitation factor σ (Thoma's coefficient) characterizes the setting of a hydraulic turbine referred to the tailwater level. It shall be used as a basis of comparison for model and prototype cavitation conditions. The coefficient σ is a dimensionless number which expresses the difference between the absolute tailwater or outlet pressure head (referred to the elevation of a reference point on the runner), and the water vapour pressure head. This difference is expressed in relation to the net head.

$$\sigma = \frac{h_a - h'_s - h_{va}}{H_n}$$

h_{va} = vapour pressure head at the actual water temperature (see Sub-clause II.2.6.10 and Table VI, page 15).

H_n = net head (see Sub-clause II.2.6.5)

h_a = absolute pressure head in the turbine outlet section referred to any convenient level

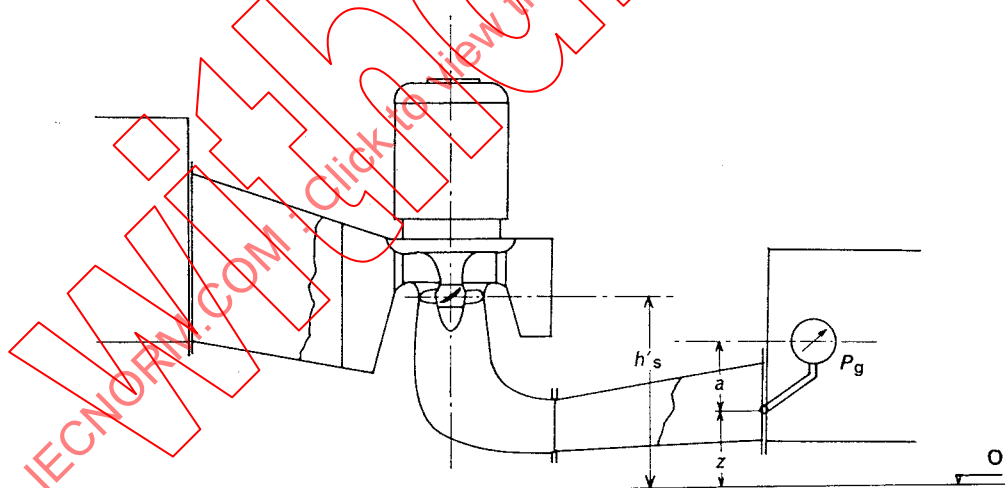
h'_s = suction head equal to the height of the reference point of the runner above the reference level of h_a (see Figure 20, page 15.)

¹⁾ P. CORMAULT : "Méthode de mesures des teneurs en gaz de l'eau et appareillages" E.D.F. — Bulletin du Centre de Recherches et d'Essais de Chatou — Supplément au No. 2, Deuxième partie — Décembre 1962.

²⁾ E. KANELLOPOULOS : "A critical Survey of Methods for Measuring the Total Gas Content of Water" — N.E.L. Fluids Note No. 76 — East Kilbride, Glasgow, 1959.

TABLEAU VI
Pression de vapeur

Tempé- rature °C	Pression de vapeur			Tempé- rature °C	Pression de vapeur		
	bar	mètre d'eau	feet d'eau		bar	mètre d'eau	feet d'eau
0	0,006 11	0,0623	0,205	19	0,021 96	0,2239	0,736
1	0,006 56	0,0669	0,220	20	0,023 37	0,2383	0,783
2	0,007 05	0,0719	0,236	21	0,024 86	0,2535	0,833
3	0,007 57	0,0772	0,254	22	0,026 43	0,2695	0,886
4	0,008 13	0,0829	0,272	23	0,028 08	0,2863	0,941
5	0,008 72	0,0889	0,292	24	0,029 82	0,3041	0,999
6	0,009 35	0,0953	0,313	25	0,031 67	0,3229	1,061
7	0,010 01	0,1021	0,335	26	0,033 60	0,3426	1,126
8	0,010 72	0,1093	0,359	27	0,035 64	0,3634	1,195
9	0,011 47	0,1170	0,384	28	0,037 79	0,3853	1,267
10	0,012 27	0,1251	0,411	29	0,040 04	0,4083	1,342
11	0,013 12	0,1337	0,440	30	0,042 41	0,4325	1,421
12	0,014 02	0,1429	0,470	31	0,044 91	0,4579	1,505
13	0,014 97	0,1526	0,502	32	0,047 53	0,4847	1,593
14	0,015 97	0,1629	0,535	33	0,050 29	0,5128	1,685
15	0,017 04	0,1737	0,571	34	0,053 18	0,5423	1,782
16	0,018 17	0,1853	0,609	35	0,056 22	0,5733	1,884
17	0,019 36	0,1975	0,650				
18	0,020 62	0,2103	0,691				



$$\sigma = \frac{h_a - h'_s - h_{va}}{H_n} \quad \text{avec} \quad h_a = P_g / \gamma + h_b + z + a$$

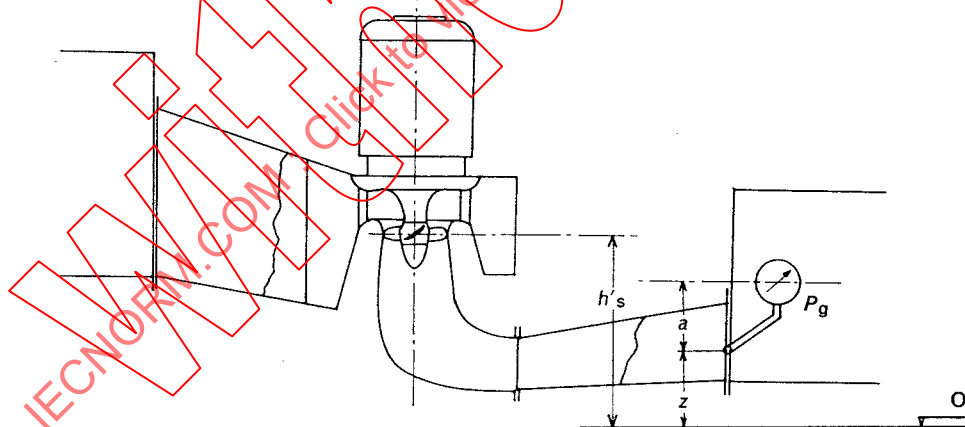
h_b = hauteur barométrique (voir paragraphe II.2.6.9)

Si le niveau de référence est le plan d'eau aval, alors : $h'_s = h_s$ (voir figure 5, paragraphe II.2.6.11)

FIGURE 20

TABLE VI
Vapour pressure

Temper- ature °C	Vapour pressure			Temper- ature °C	Vapour pressure		
	bar	metre of water	feet of water		bar	metre of water	feet of water
0	0.006 11	0.0623	0.205	19	0.021 96	0.2239	0.736
1	0.006 56	0.0669	0.220	20	0.023 37	0.2383	0.783
2	0.007 05	0.0719	0.236	21	0.024 86	0.2535	0.833
3	0.007 57	0.0772	0.254	22	0.026 43	0.2695	0.886
4	0.008 13	0.0829	0.272	23	0.028 08	0.2863	0.941
5	0.008 72	0.0889	0.292	24	0.029 82	0.3041	0.999
6	0.009 35	0.0953	0.313	25	0.031 67	0.3229	1.061
7	0.010 01	0.1021	0.335	26	0.033 60	0.3426	1.126
8	0.010 72	0.1093	0.359	27	0.035 64	0.3634	1.195
9	0.011 47	0.1170	0.384	28	0.037 79	0.3853	1.267
10	0.012 27	0.1251	0.411	29	0.040 04	0.4083	1.342
11	0.013 12	0.1337	0.440	30	0.042 41	0.4325	1.421
12	0.014 02	0.1429	0.470	31	0.044 91	0.4579	1.505
13	0.014 97	0.1526	0.502	32	0.047 53	0.4847	1.593
14	0.015 97	0.1629	0.535	33	0.050 29	0.5128	1.685
15	0.017 04	0.1737	0.571	34	0.053 18	0.5423	1.782
16	0.018 17	0.1853	0.609	35	0.056 22	0.5733	1.884
17	0.019 36	0.1975	0.650				
18	0.020 62	0.2103	0.691				



$$\sigma = \frac{h_a - h'_s - h_{va}}{H_n} \quad \text{with} \quad h_a = P_g / \gamma + h_b + z + a$$

h_b = barometric head (See Sub-clause II.2.6.9)

If the reference level is the tailwater level, then: $h'_s = h_s$ (See Figure 5, Sub-clause II.2.6.11)

FIGURE 20

5.1.1.1 Tout coefficient de cavitation différent de σ peut être utilisé après accord mutuel. En particulier, il peut être intéressant, dans le cas des pompes turbines réversibles, de définir un coefficient de cavitation (C) qui caractérise la position de la machine par rapport à l'altitude de la ligne de charge énergétique totale absolue à la sortie de l'aspirateur. Dans ce cas, le coefficient (C) est un nombre sans dimension qui exprime la différence entre la hauteur équivalente à la charge énergétique totale absolue à la sortie et la hauteur équivalente à la tension de vapeur. Cette différence est exprimée en fonction de la chute nette. Toute méthode, pourvu qu'elle soit appliquée correctement, fournira des résultats équivalents en ce qui concerne la position de la machine, seules les valeurs numériques obtenues pourront être sensiblement différentes. Dans de tels cas, la définition du coefficient de cavitation à utiliser doit faire l'objet d'un accord mutuel écrit entre les parties avant les essais.

5.1.2 *Méthode de mesure*

5.1.2.1 *Détermination de h_a et h'_s*

h_a hauteur d'eau équivalente à la pression absolue

La mesure d'une pression absolue est traitée dans le chapitre IX. La pression absolue aval à mesurer sera généralement au-dessous de la pression atmosphérique et on prendra grand soin d'éviter toute entrée d'air dans les canalisations ou appareils de mesure (voir article IX.8).

On peut remarquer que presque tous les appareils de mesure de pression utilisent la pression atmosphérique comme référence. De ce fait, on tiendra compte de la valeur exacte de la pression atmosphérique (paragraphe II.2.6.9) au moment des essais.

Ceci s'applique en particulier aux manomètres à tube, manomètres différentiels, manomètres à poids morts, manomètres à ressorts, balances de pression etc.

h'_s hauteur d'aspiration

La mesure de h'_s est une mesure géométrique et peut être effectuée au moyen de tout appareil de mesure de hauteurs approprié.

5.1.2.2 *Situation du point de référence dans la roue*

Sauf accord contraire prévu au contrat, le point de référence dans la roue sera pris comme indiqué sur la figure 5, chapitre II.

5.1.3 *Condition de Froude*

Pour respecter la similitude du coefficient de cavitation en tout point de la machine où il pourrait être calculé, il serait nécessaire que le rapport des dimensions et le rapport des chutes soient les mêmes. C'est la condition de Froude : elle relie la chute d'essai aux dimensions du modèle (voir paragraphe XI.5.2).

5.1.4 *Autres conditions de similitude*

D'autres lois de similitude ont été développées, basées par exemple sur la tension superficielle, les processus thermodynamiques associés à la croissance des bulles, les conditions d'équilibre de l'air contenu et la chute du prototype. Les conclusions sont diverses, les critères de similitude contradictoires et il n'est pas possible de satisfaire tous les critères simultanément.

5.1.5 Il ne peut être définitivement établi qu'un quelconque des critères, définis aux paragraphes XI.5.1.3 et XI.5.1.4, soit nécessaire et suffisant pour obtenir la similitude de cavitation.

5.2 *Similitude hydraulique — conditions à respecter*

5.2.1 Le respect additionnel de la condition de Froude doit être pris en considération quand la distance verticale entre le point le plus haut et le point le plus bas des pales de la roue prototype devient important par rapport à la chute réelle (environ $0,25 H_n$ ou plus) (grandes turbines Kaplan de basse chute et particulièrement turbines tubulaires). L'essai de réception en

- 5.1.1.1 Any cavitation factor different from σ may be used by mutual agreement. Particularly, it may be interesting, in the case of reversible pump turbines, to define a cavitation factor (C) characterizing the setting of the machine referred to the total head at the draft tube outlet. In this case, the factor (C) is a dimensionless number which expresses the difference between absolute total head at the outlet and vapour pressure head. This difference is expressed in relation to the net head.

Any method, provided correctly applied, will give equivalent results for the machine setting, but numerical values obtained may differ somewhat.

In such cases, the cavitation factor definition to be used must be agreed upon in writing between both parties before the tests.

5.1.2 *Method of measurement*

5.1.2.1 *Determination of h_a and h'_s*

h_a absolute pressure head

The measurement of pressure head is dealt with in Chapter IX. The downstream absolute pressure head to be measured will generally be below atmospheric pressure and great care must be taken to ensure that air is not drawn into the leads or measuring device (See Clause IX.8).

Note that nearly all pressure measuring devices use atmospheric pressure as a datum and allowance must therefore be made for the true value of atmospheric pressure (Sub-clause II.2.6.9) at the time of the tests.

This is true for single limb and U-tube manometers, dead weight gauges, spring gauges, pressure weighbeams, etc.

h'_s suction head

The measurement of h'_s is a geometric measurement and can be made with a suitable height gauge.

5.1.2.2 *Location of the reference point of runner*

Unless otherwise agreed in the contract, the reference point of the runner should be taken as defined in Figure 5, Chapter II.

5.1.3 *Froude condition*

To observe the similitude of cavitation factor for every point of the machine where it might be calculated, it would be necessary that the ratio of dimensions and the ratio of heads be the same. This is the Froude condition. It links the testing head with the dimension of the model (Sub-clause XI.5.2).

5.1.4 *Other similitude conditions*

Other similitude laws have been developed based on, for example, surface tension, thermodynamic processes associated with bubble growth, air content equilibrium and prototype head. The conclusions are diverse and the similitude criteria are contradictory and it is not possible to satisfy all criteria simultaneously.

- 5.1.5 It cannot be definitely stated that any of the criteria in Sub-clauses XI.5.1.3 and XI.5.1.4 is necessary and sufficient to provide cavitation similitude.

5.2 *Hydraulic similitude — Conditions to be fulfilled*

- 5.2.1 The additional application of the Froude condition should be considered when the vertical distance between the highest and lowest points of the full size runner blades becomes significant in relation to the plant head (approx. $0.25 H_n$ or more) (large low head Kaplan turbines and, particularly, tubular turbines). The cavitation acceptance test is then to be performed, unless

cavitation, sauf accord contraire prévu au contrat, doit alors être conduit sur un modèle de grande dimension, installé avec l'axe de rotation dans la position comparable à celui du prototype (par exemple horizontale ou verticale) et essayé sous une chute d'essais voisine de la chute correspondant à la similitude de Froude.

Il est également souhaitable de satisfaire aussi précisément que possible à la condition de Froude dans les essais sur modèle réduit, chaque fois qu'apparaissent des cavités d'extension importante, telles qu'un vortex dans l'aspirateur, au coefficient de cavitation de l'installation. De cette manière, on s'assure que l'écoulement est semblable entre le modèle et le prototype dans la roue de l'aspirateur.

5.2.2 Le respect de la condition de Froude peut être abandonné :

a) Lorsque les dimensions verticales de la roue rapportées à la chute sont nettement plus faibles que celles indiquées au paragraphe XI.5.2.1. C'est ainsi que pour les turbines Kaplan de haute chute et les turbines Francis, la condition de Froude est de peu d'importance dans les essais de réception de cavitation sur modèle.

b) Si on est conduit à faire fonctionner le circuit d'essais hors des limitations dues à sa conception ou à travailler sur des modèles de taille excessive et/ou sur des chutes d'essais très faibles (voir paragraphe XI.4.2.1).

Il n'est généralement pas souhaitable d'essayer le modèle sous des chutes d'essais trop faibles par suite de la diminution de précision des mesures et du danger de dégazage de l'eau (voir paragraphe XI.4.2.1).

5.2.3 Lorsque la condition de Froude devrait être observée, mais lorsque ceci est abandonné pour une des raisons exprimées au paragraphe XI.5.2.2, l'égalité des coefficients de cavitation σ ne peut plus être respectée simultanément à tous les niveaux homologues du modèle et du prototype.

Afin d'assurer de la manière la plus satisfaisante possible la similitude d'influence de la cavitation entre modèle et prototype, il est recommandé de choisir d'un commun accord, avant les essais, les niveaux de référence R_p et R_m dans la roue prototype et dans la roue modèle pour lesquels l'égalité des coefficients σ doit être respectée. Lorsque cette égalité est réalisée pour les niveaux de référence choisis R_p et R_m sur le prototype et sur le modèle ($\sigma_p = \sigma_m$), elle implique une différence entre les coefficients de cavitation σ'_p et σ'_m pour tous les autres niveaux homologues comme le fait ressortir la figure 21.

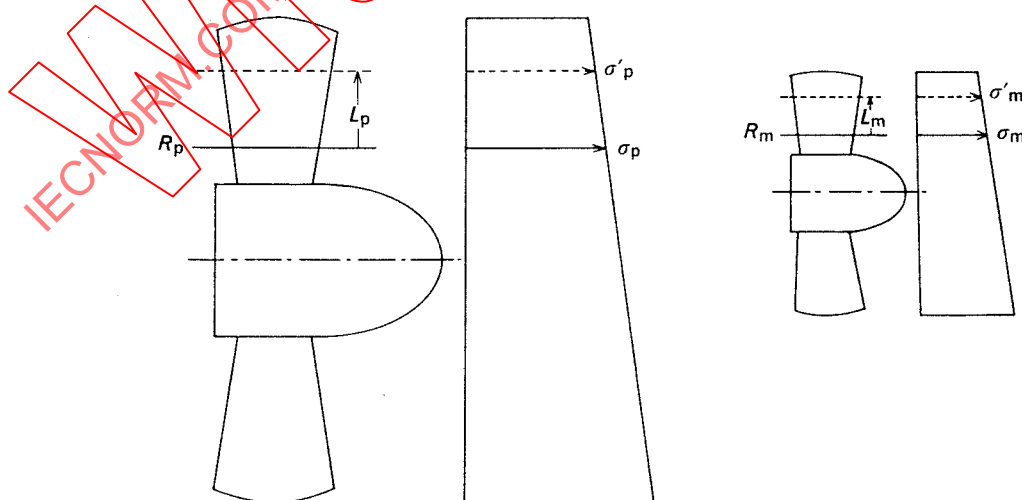


FIGURE 21

otherwise agreed in the contract, on a large size model, installed with the axis in a position comparable with that of the prototype (e.g. horizontal or vertical) and tested under a test head close to that corresponding to the Froude similitude.

It is also advisable during model tests to observe the Froude similitude as closely as possible wherever extended cavities appear such as a vortex cavity in the draft tube at plant cavitation factor. This ensures that the flow in the model and in the prototype runner and draft tube is similar.

5.2.2 The application of the Froude condition should be waived when :

- a) The vertical dimensions of the runner are, in relation to the head, much smaller than indicated in Sub-clause XI.5.2.1 (for instance, for high head Kaplan and Francis turbines): in such cases, the Froude condition is of little importance in acceptance cavitation model tests.
- b) It would require operation of the rig outside its design limits or result in excessively large models and/or very low testing heads (Sub-clause XI.4.2.1).

It is generally not desirable to test the model under too low test heads because of the reduced measuring accuracy and the danger of degassing (see Sub-clause XI.4.2.1).

5.2.3 When the Froude condition should be observed but when its application is deferred for some of the reasons expressed in Sub-clause XI.5.2.2, the equality of cavitation coefficient σ cannot be attained simultaneously for all homologous levels between model and prototype. In order to ensure in the most satisfactory way, the similitude between model and prototype cavitation influence, it is recommended to select by mutual agreement before the test, the homologous reference levels R_p and R_m in the prototype and model runner, for which the equality of coefficient σ shall be observed. When this equality is realized for the selected reference levels R_p and R_m on the prototype and on the model ($\sigma_p = \sigma_m$), it involves a difference between cavitation coefficient σ'_p and σ'_m at all other homologous levels as demonstrated by Figure 21.

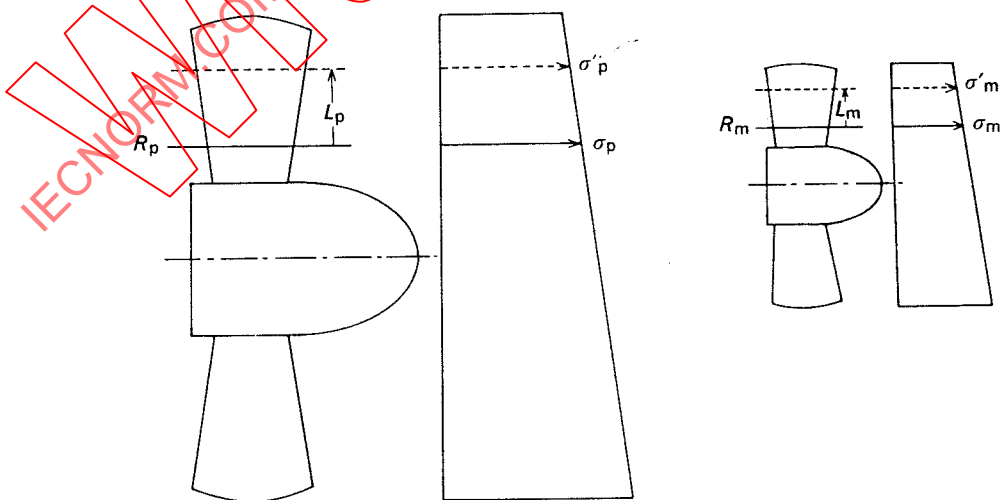


FIGURE 21

où :

m et p se rapportent au modèle et au prototype

L_m = l'élévation du point en observation sur le modèle, comptée positivement au-dessus du niveau de référence R_m

L_p = l'élévation du point homologue sur le prototype, comptée positivement au-dessus du niveau de référence R_p

D_m et D_p = respectivement les diamètres de roue du modèle et du prototype

H_m et H_p = respectivement la chute d'essais du modèle et la chute de fonctionnement du prototype

D'après la figure 21, page 18 :

$$\sigma'_p = \sigma_p - \frac{L_p}{H_p} \quad \text{et} \quad \sigma'_m = \sigma_m - \frac{L_m}{H_m}$$

D'après le choix fait précédemment :

$$\sigma_p = \sigma_m$$

Donc :

$$\sigma'_p - \sigma'_m = \frac{L_m}{H_m} - \frac{L_p}{H_p} = \frac{L_m}{H_m} \left(1 - \frac{H_m/H_p}{D_m/D_p} \right)$$

Il est à remarquer que, dans les cas où la similitude de Froude devrait être respectée, mais lorsque son application est abandonnée, la chute d'essais H_m sera généralement plus élevée que celle exigée par le respect de la condition de Froude qui entraîne $L_m/H_m = L_p/H_p$. Dans ce cas, $\sigma'_p - \sigma'_m$ sera négatif pour tous les niveaux homologues situés au-dessus des niveaux de référence R_p et R_m (conditions de cavitation plus mauvaises pour le prototype que pour le modèle). L'inverse se produira pour tous les niveaux homologues situés au-dessous des niveaux de référence choisis.

Lors du choix des niveaux de référence R_p et R_m , l'aspect de la cavitation pourra être pris en considération. Il peut de ce fait s'avérer utile d'utiliser un plan de référence s'écartant de ceux recommandés à la figure 20, page 14.

5.2.4 Il n'est pas nécessaire d'exiger des essais sous la hauteur réelle.

5.3 Similitude géométrique — Etat du modèle

5.3.1 Quand les essais de cavitation et les essais de rendement sont conduits sur des modèles différents, le modèle utilisé pour les essais de cavitation doit satisfaire, sauf spécification contraire, aux mêmes exigences de similitude que celles prescrites pour le modèle utilisé pour les essais de rendement.

5.3.2 En plus des conditions d'état de surface exigées en général, un soin particulier sera apporté à l'exécution correcte des joints entre parties assemblées, afin d'éviter tout décrochement local pouvant être le siège d'un début de cavitation particulière au modèle.

5.3.3 Les défauts locaux sur les pales ou les impuretés accrochées au bord d'attaque seront soigneusement éliminés, afin qu'ils ne constituent pas de points faibles par où la cavitation peut s'amorcer.

5.3.4 L'angle d'attaque de la vitesse relative au bord d'attaque d'une pale a une influence décisive sur la distribution des pressions et, par conséquent, sur la cavitation qui en résulte dans la roue. Il est donc important que les modèles de turbines Kaplan soient essayés avec une conjugaison correcte entre la position des pales et l'ouverture du distributeur.

where :

m and p relate to the model and prototype

L_m = the height of the observed point on the model measured positively upwards from reference level R_m

L_p = the height of the homologous point on the prototype measured positively upwards from reference level R_p

D_m and D_p = respectively model and prototype runner diameters

H_m and H_p = respectively model testing head and prototype operating head.

According to Figure 21, page 19 :

$$\sigma'_p = \sigma_p - \frac{L_p}{H_p} \quad \text{and} \quad \sigma'_m = \sigma_m - \frac{L_m}{H_m}$$

Also, as stated above :

$$\sigma_p = \sigma_m$$

Therefore

$$\sigma'_p - \sigma'_m = \frac{L_m}{H_m} - \frac{L_p}{H_p} = \frac{L_m}{H_m} \left(1 - \frac{H_m/H_p}{D_m/D_p} \right)$$

Note that in those cases when Froude similitude should be observed but when its application has been deferred, the test head H_m will generally be greater than the one required by the Froude condition (which means $L_m/H_m = L_p/H_p$) and $\sigma'_p - \sigma'_m$ will be negative for all homologous levels above the reference planes R_p and R_m (worse cavitation conditions for the prototype than for the model). The opposite will occur for all homologous levels below the selected reference levels.

When deciding the location of the reference level R_p , R_m , the cavitation pattern can be taken into account. It may thereby prove suitable to use a reference level deviating from those recommended in Figure 20, page 15.

5.2.4 It is unnecessary to require tests under prototype head.

5.3 *Geometric similitude — State of the model*

5.3.1 Unless otherwise stated, when the cavitation tests and the efficiency tests are conducted on different models, the model used for cavitation tests shall meet the same geometric requirements as prescribed for the model used in efficiency tests.

5.3.2 In addition to general requirements for surface conditions, great care should be given to the proper matching of joints between parts in order to avoid any local separation which may be the cause of incipient cavitation peculiar to the model.

5.3.3 Local faults on the blades or impurities adhering to the leading edge should be carefully removed so that they do not constitute weak spots at which cavitation might be started.

5.3.4 The angle of attack of the relative flow at the leading edge of a runner blade has a decisive influence on the pressure distribution and thus the resulting cavitation on the runner. It is therefore important that model turbines of the Kaplan type be tested with the correct relationship between model runner blade and guide vane settings.

- 5.3.5 Dans tous les types de turbines à réaction, l'écoulement à travers les jeux entre parties fixes et mobiles contribue à la cavitation dans son ensemble. Ceci est particulièrement vrai pour les jeux à la périphérie des roues. C'est pourquoi il est important que les jeux adoptés selon le paragraphe XI.3.3.2 soient maintenus constants pendant la période des essais. Tous les jeux doivent être mesurés et consignés.
- 5.3.6 Au commencement des mesures, on contrôlera par un essai préliminaire que toutes les pales ou toutes les aubes de la roue présentent les mêmes figures de cavitation. Si ce n'est pas le cas et si aucune amélioration ne peut être apportée avant le début des essais, les différences de figure de cavitation seront consignées dans le rapport.

6. Exécution des essais de cavitation

6.1 Programme d'essai

Au moment où le programme d'essai sera défini (voir article V. 4, paragraphes V.4.1 et V.4.2), des dispositions pour les essais de cavitation éventuels devront être incluses. Le client fournira toutes les données nécessaires pour le calcul du coefficient de cavitation pour toutes les combinaisons chute/débit de l'installation.

6.2 Procédure d'essai

6.2.1 Essais de rendement et de cavitation sur le même modèle

- 6.2.1.1 Les mesures de rendement destinées à établir si les garanties de rendement ont été satisfaites peuvent être effectuées au coefficient de cavitation d'installation quand ce procédé est aisément réalisable. Cette méthode d'essai fournit seulement les caractéristiques mesurées pour une valeur correspondant au coefficient de cavitation d'installation.

La perte de rendement causée par la cavitation est supposée indépendante du nombre de Reynolds et les formules habituelles d'effet d'échelle sont seulement applicables aux résultats obtenus sans influence de la cavitation. C'est pourquoi quand les garanties de rendement sont basées sur des essais de modèles réduits, majorés de l'effet d'échelle, la perte de rendement devra être déterminée et l'effet d'échelle calculé à partir d'essais complémentaires effectués à des valeurs élevées de σ pour lesquelles le rendement n'est pas affecté par la cavitation.

- 6.2.1.2 Lorsque les mesures de rendement et les essais de cavitation d'un même essai de réception sont faits séparément, une correction sur les résultats des essais de rendement sera appliquée ultérieurement pour prendre en considération éventuellement l'influence possible du σ de l'installation. De telles mesures entraînent la détermination des courbes de rendement de puissance et de débit en fonction du σ pour une série de vitesses d'essais et d'ouvertures du distributeur. L'influence du σ d'installation sur η , P , Q sera déduite de ces courbes et appliquée aux mesures faites aux grandes valeurs de σ . Les valeurs particulières d'un σ défini au paragraphe XI.7.3.1.4 peuvent également être obtenues par ces courbes.

6.2.2 Essais de rendement et de cavitation effectués sur des modèles différents

Quand les essais de rendement et les essais de cavitation sont menés sur des modèles séparés, il est nécessaire d'effectuer les essais de cavitation selon le paragraphe XI.6.2.1.2. L'influence du coefficient de cavitation d'installation sur η , P et Q est déterminée d'après le modèle de turbine essayé en cavitation.

Si les deux modèles donnent des résultats différents en rendement aux grandes valeurs de σ , les corrections des résultats dues à la cavitation seront déduites du modèle utilisé pour les essais de cavitation et appliquées aux mesures faites sur le modèle essayé en rendement qui, en principe, doit fournir des résultats plus précis en ce qui concerne le rendement. (Voir paragraphe XI.7.2.)

- 5.3.5 For all types of reaction turbines, the flow in clearances between movable and fixed parts will contribute to the general cavitation picture. In particular, this is true for the seal clearances at the runner periphery. It is important therefore that the clearances adopted as described in Sub-clause XI. 3.3.2, must be maintained constant as far as possible during the period of the tests. All clearances shall be measured and recorded.
- 5.3.6 At the beginning of the measurements, a preliminary test shall be carried out to check that all the runner blades or vanes show a similar pattern of cavitation formation. If this is not the case, and if it cannot be corrected before the tests begin, the differences of cavitation appearances shall be recorded in the report.

6. Execution of the cavitation tests

6.1 Testing programme

When the testing programme is set up (See Clause V.4, Sub-clauses V.4.1 and V.4.2) arrangements for possible cavitation tests should be included. The purchaser shall have provided all the necessary data for the calculation of the plant values of the cavitation factor for each head-flow combination of the plant.

6.2 Testing procedure

6.2.1 Efficiency and cavitation tests on the same model

- 6.2.1.1 Model efficiency tests for the purpose of establishing whether efficiency guarantees have been met may be carried out at the plant cavitation factor values when this procedure is easily possible. This testing method only yields the performance characteristics at the plant cavitation factor.

The loss caused by cavitation is assumed to be independent of Reynolds number and the usual step-up formulae are only applicable to cavitation-free performance. Therefore, when efficiency guarantees are based on model test results with allowance for scale effect, the loss caused by cavitation shall be ascertained and the step-up calculated from additional tests performed at high σ values for which efficiency is not affected by cavitation.

- 6.2.1.2 When efficiency and cavitation measurement within the same acceptance test are made separately, a correction on the results of efficiency tests will be subsequently applied to take into account the possible influence of plant σ .

Such measurements involve the determination of the efficiency-cavitation, output-cavitation and discharge-cavitation curves, for a series of test speeds and guide vane settings. The influence of plant σ on η , P , Q , will be deduced from these curves and applied to the measurements made at high σ values. Values of a characteristic σ as defined in Sub-clause XI.7.3.1.4 can also be derived from these curves.

6.2.2 Efficiency and cavitation tests on different models

When efficiency tests and cavitation tests are made on separate models, it is necessary to perform the cavitation tests, according to Sub-clause XI.6.2.1.2. The influence of plant cavitation factor on η , P , Q , will be determined from the cavitation model turbine.

If the models give different efficiency results at high σ values, the corrections on results due to cavitation will be deduced from the model used for cavitation tests and applied to the measurements made on the efficiency model turbine, which is expected to yield more accurate efficiency measurements. (See Sub-clause XI.7.2.)

- 6.2.3 La chute et la vitesse du modèle de turbine doivent être maintenues constantes pendant l'essai. Les écarts autorisés au paragraphe IV.1.3 restent applicables aux essais de cavitation.

6.3 Essais d'emballlement

Les essais d'emballlement devront être conduits en faisant varier la position des directrices (particulièrement importantes dans les turbines Kaplan) et le σ , de façon à couvrir les conditions garanties. Chaque fois que ce sera possible, le fonctionnement du dynamomètre devra être prévu de façon à pouvoir amener le couple sur l'arbre jusqu'à la valeur zéro. Si cela n'est pas possible, il faudra faire varier le couple de torsion pendant l'essai de façon à permettre l'extrapolation à couple nul de la vitesse ou du débit mesuré. (Voir article VI.7.)

6.4 Courbes de cavitation

L'évolution du rendement de la puissance ou du débit en fonction du σ peut être tracée pour quelques conditions de fonctionnement ayant fait l'objet d'un accord préalable.

Il est recommandé d'accompagner chaque essai de cavitation par des croquis et/ou, si possible, des photographies du développement de la cavitation à différentes conditions de fonctionnement de la turbine et, éventuellement, prises de différents points de vue. Il serait bon d'indiquer le temps d'exposition de ces photos.

Le développement de la cavitation peut être défini en détail par les précisions suivantes :

- étendue (les pales de la roue peuvent porter des repères faciles à identifier) ;
- nature (par exemple, poche transparente ou laiteuse) ;
- stabilité (constante ou intermittente).

Les courbes de cavitation peuvent être assorties d'annotations indiquant des manifestations associées à la cavitation, tels le bruit, l'apparition des premières bulles, etc.

7. Interprétation des essais

- 7.1 L'interprétation des essais de réception en cavitation sur modèle réduit doit seulement être faite dans le but d'une comparaison avec les caractéristiques garanties et, essentiellement, avec le rendement (paragraphe XI.2.1) et les débit et vitesse d'emballlement. Aucune conclusion concernant le respect de garanties d'érosion sur le prototype ne peut être tirée des résultats d'essais sur modèle réduit concernant l'influence de la cavitation sur les caractéristiques.

7.2 Incertitude de mesure

- 7.2.1 Dans le cas où les essais sont effectués au σ d'installation (voir paragraphe XI. 6.2.1.1), l'incertitude sur le rendement f_η sera calculée selon les articles VI.2 et VI.4.

- 7.2.2 Pour les essais effectués à d'autres valeurs de σ (paragraphe XI.6.2.1.2 et XI.6.2.2) les essais de cavitation ne fournissent qu'une différence de rendement, les erreurs systématiques f_η peuvent donc être oubliées et les erreurs accidentelles réduites en effectuant un nombre suffisant d'essais de façon statistique normale (article VI.5).

Les incertitudes f_σ sur la détermination de σ auquel les essais ont été effectués seront calculées selon les erreurs de mesure individuelle sur les pressions et, en général, sur tous les paramètres intervenant dans le calcul du σ (voir articles VI.2 et VI.3).

- 7.2.3 Lorsque des modèles différents (voir paragraphe XI.6.2.2) ou des installations d'essais différentes sont utilisés pour les essais de rendement et de cavitation, il peut arriver que les rendements obtenus soient différents.

De telles différences entre les résultats des deux modèles peuvent se produire pour les raisons suivantes : effets d'échelle dus aux dimensions ou à la chute d'essais, différence de précision entre les deux installations d'essais, différences dans les conditions de chaque essai.

- 6.2.3 The model turbine head and speed must be kept constant during the test. Deviations permitted in Sub-clause IV.1.3 are also applicable to cavitation tests.

6.3 *Runaway tests*

The runaway tests should be carried out with such a variation of guide vane positions (of particular importance with Kaplan turbine) and σ as to cover the guaranteed conditions. Whenever possible, the dynamometer should be arranged for driving so as to bring shaft torque down to zero. If this is not possible, the dynamometer torque must be varied during the test so as to allow extrapolation of measured speed or discharge to zero torque (See Clause VI.7.)

6.4 *Cavitation curves*

The variation of efficiency output or discharge as a function of σ may be plotted for some operating condition agreed upon in advance. It is recommended that any cavitation test be accompanied by sketches and/or photographs of cavitation development if possible at various operating conditions of the turbine and, if possible, from different angles of views. The time of exposure of photographs should be indicated.

The character of cavitation development is more exactly defined by the statement of:

- extent (the runner blades may be fitted with well distinguishable marks);
- nature (transparent or milky screen of cavitation);
- stability (constant or intermittent).

The cavitation curves may be annotated to indicate other phenomena associated with cavitation such as noise, initial bubble appearance, etc.

7. **Interpretation of tests**

- 7.1 The interpretation of cavitation acceptance model tests shall be made only for the purpose of a comparison with guaranteed values on performance and essentially on efficiency (Sub-clause XI.2.1) and runaway speed and discharge. No conclusions concerning the fulfilment of prototype pitting guarantees can be drawn from the influence which cavitation has on performance as revealed by the model tests.

7.2 *Inaccuracies in measurements*

- 7.2.1 In case tests are made at plant σ (See Sub-clause XI.6.2.1.1) the inaccuracy of efficiency f_η will be computed according to Clauses VI.2 and VI.4.
- 7.2.2 For tests at other σ values (Sub-clauses XI.6.2.1.2 and XI.6.2.2) cavitation tests indicate efficiency difference only. systematic errors f_η can then be disregarded and random errors reduced by performing a minimum number of tests in a normal statistical manner (Clause VI.5).

The inaccuracies f_σ on the determination of σ at which tests have been performed will be computed according to individual measurement inaccuracies on pressures heads and on each parameter involved in σ computation (See Clauses VI.2 and VI.3).

- 7.2.3 When different models (Sub-clause XI.6.2.2) or different test installations are used for efficiency and cavitation tests, it may happen that they give different efficiency results.

Such efficiency differences between the two models may result from several causes : scale effects on dimension or testing head, differences in accuracy between the two testing installations used, differences in testing conditions.