

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60695-8-1

Première édition
First edition
2001-01

PUBLICATION FONDAMENTALE DE SÉCURITÉ
BASIC SAFETY PUBLICATION

Essais relatifs aux risques du feu –

**Partie 8-1:
Dégagement de chaleur – Guide général**

Fire hazard testing –

**Part 8-1:
Heat release – General guidance**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60695-8-1:2001

Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

Editions 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.

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

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 cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de:

- **Site web de la CEI (www.iec.ch)**
- **Catalogue des publications de la CEI**

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI (www.iec.ch/catlg-f.htm) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplacées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.

- **IEC Just Published**

Ce résumé des dernières publications parues (www.iec.ch/JP.htm) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.

- **Service clients**

Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:

Email: custserv@iec.ch
Tél: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. 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.

Further information on IEC publications

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 this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. 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 also available from the following:

- **IEC Web Site (www.iec.ch)**
- **Catalogue of IEC publications**

The on-line catalogue on the IEC web site (www.iec.ch/catlg-e.htm) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. On-line information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

- **IEC Just Published**

This summary of recently issued publications (www.iec.ch/JP.htm) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

- **Customer Service Centre**

If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

Email: custserv@iec.ch
Tel: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

CEI
IEC

60695-8-1

Première édition
First edition
2001-01

PUBLICATION FONDAMENTALE DE SÉCURITÉ
BASIC SAFETY PUBLICATION

Essais relatifs aux risques du feu –

**Partie 8-1:
Dégagement de chaleur – Guide général**

Fire hazard testing –

**Part 8-1:
Heat release – General guidance**

© IEC 2001 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

e-mail: inmail@iec.ch

3, rue de Varembe Geneva, Switzerland
IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

M

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION	6
 Articles	
1 Domaine d'application	8
2 Références normatives.....	8
3 Définitions.....	8
4 Principes de détermination du dégagement de chaleur	12
4.1 Dégagement de chaleur par consommation d'oxygène.....	12
4.2 Dégagement de chaleur par production de dioxyde de carbone.....	16
4.3 Dégagement de chaleur par augmentation de la température des gaz.....	16
5 Considérations pour la sélection des méthodes d'essai.....	18
5.1 Sources d'allumage.....	18
5.2 Types d'éprouvette.....	18
5.3 Choix des conditions d'essai.....	18
5.4 Appareillage d'essai.....	20
5.4.1 Appareillage d'essai à petite échelle.....	20
5.4.2 Appareillage d'essai à grande échelle.....	20
5.4.3 Comparaison entre les méthodes d'essai à petite échelle et à grande échelle.....	20
6 Pertinence des résultats de dégagement de chaleur	22
6.1 Evaluation avec la propagation maximale de la flamme	22
6.2 Détermination des seuils d'autopropagation du feu	22
6.3 Probabilité pour atteindre l'embrasement éclair	22
6.4 Valeur de l'essai de dégagement de chaleur.....	22
 Bibliographie	 24
 Tableau 1a – La relation entre la chaleur de combustion explicité par MJ/kg et MJ/kg d'oxygène consommé, pour différents combustibles.....	 14
Tableau 1b – La relation entre la chaleur de combustion explicité par MJ/kg et MJ/kg d'oxygène consommé, pour différents liquides isolants.....	16

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
INTRODUCTION	7
Clause	
1 Scope	9
2 Normative references	9
3 Definitions	9
4 Principles of determining heat release	13
4.1 Heat release by oxygen consumption	13
4.2 Heat release by carbon dioxide generation	17
4.3 Heat release by gas temperature increase	17
5 Considerations for the selection of test methods	19
5.1 Ignition sources	19
5.2 Type of test specimen	19
5.3 Choice of conditions	19
5.4 Test apparatus	21
5.4.1 Small-scale test apparatus	21
5.4.2 Large-scale test apparatus	21
5.4.3 Comparison between small-scale and large-scale methods	21
6 Relevance of heat release data	23
6.1 Estimates of maximum flame spread	23
6.2 Determination of self-propagating fire thresholds	23
6.3 Probability of reaching flash-over	23
6.4 Value of heat release testing	23
Bibliography	25
Table 1a – The relationship between heat of combustion expressed in units of MJ/kg and MJ/kg of oxygen consumed, for a variety of fuels	15
Table 1b – The relationship between heat of combustion expressed in units of MJ/kg and MJ/kg of oxygen consumed, for a variety of insulating liquids	17

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

ESSAIS RELATIFS AUX RISQUES DU FEU –

Partie 8-1: Dégagement de chaleur – Guide général

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Électrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes Internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, spécifications techniques, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes Internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent rapport technique peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60695-8-1 a été établie par le comité d'études 89 de la CEI: Essais relatifs aux risques du feu.

Elle a le statut d'une publication fondamentale de sécurité conformément au Guide 104 de la CEI.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
89/426/FDIS	89/448/RVD

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

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 3.

La présente norme doit être utilisée conjointement avec la CEI 60695-8-2.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2005. A cette date, la publication sera

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

FIRE HAZARD TESTING –

Part 8-1: Heat release – General guidance

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical specifications, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this technical report may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60695-8-1 has been prepared by IEC technical committee 89: Fire hazard testing.

It has the status of a basic safety publication in accordance with IEC Guide 104.

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

FDIS	Report on voting
89/426/FDIS	89/448/RVD

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

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 3.

This standard is to be used in conjunction with IEC 60695-8-2.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2005. At this date, the publication will be

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

INTRODUCTION

Les incendies sont responsables de la création de risques pour la vie et les biens par suite de la génération de chaleur (risque thermique), de composés toxiques et/ou corrosifs et de l'obscurcissement de la vision dû à la fumée. Le risque d'incendie augmente avec l'accroissement du dégagement de chaleur conduisant éventuellement à un embrasement éclair.

Une des mesures les plus importantes dans les essais au feu est la mesure du dégagement de chaleur, elle est utilisée comme facteur important dans la détermination du risque dû au feu et est utilisée comme l'un des paramètres dans les calculs de sécurité vis-à-vis du feu.

La mesure et l'utilisation des données de chaleur de combustion peuvent être utilisées avec d'autres données d'essai pour réduire la probabilité (ou les effets) de l'incendie, même dans le cas d'une utilisation anormale prévisible, d'un mauvais fonctionnement ou d'un défaut des produits électrotechniques.

Lorsqu'un matériel est chauffé par une source externe, des effluents du feu sont susceptibles d'être générés par cette chaleur et peuvent former un mélange avec l'air qui risque d'allumer ou d'initier un incendie. La chaleur dégagée au cours de la réaction est transportée par le mélange air-effluents du feu, il y a perte de chaleur ou transfert vers la matière solide pour générer d'autres produits de pyrolyse, continuant ainsi le processus.

La chaleur peut aussi être transférée à d'autres produits situés à proximité qui peuvent brûler en apportant une chaleur et un dégagement supplémentaires et des effluents du feu.

La vitesse à laquelle l'énergie thermique est dégagée dans un incendie est définie comme étant le débit calorifique. Le débit calorifique est important par son influence sur la propagation de la flamme et sur l'initiation des feux secondaires. D'autres caractéristiques sont également importantes, comme l'allumabilité, la propagation de flammes et les effets secondaires de l'incendie (voir la série des normes CEI 60695).

IECNORM.COM: Click to buy IEC 60695-8-1

INTRODUCTION

Fires are responsible for creating hazards to life and property as a result of the generation of heat (thermal hazard), toxic and/or corrosive compounds and obscuration of vision due to smoke. Fire risk increases as the heat released increases, possibly leading to a flash-over fire.

One of the most important measurements in fire testing is the measurement of heat release, and it is used as an important factor in the determination of fire hazard; it is also used as one of the parameters in fire safety engineering calculations.

The measurement and use of heat release data, together with other fire test data, can be used to reduce the likelihood of (or the effects of) fire, even in the event of foreseeable abnormal use, malfunction or failure of electrotechnical products.

When a material is heated by some external source, fire effluent can be generated and can form a mixture with air which can ignite and initiate a fire. The heat released in the process is carried away by the fire effluent-air mixture, radiatively lost or transferred back to the solid material, to generate further pyrolysis products, thus continuing the process.

Heat may also be transferred to other nearby products, which may burn, and then release additional heat and fire effluent.

The rate at which calorific (thermal) energy is released in a fire is defined as the heat release rate. Heat release rate is important because of its influence on flame spread and on the initiation of secondary fires. Other characteristics are also important, such as ignitability, flame spread and the side-effects of the fire (see the IEC 60695 series of standards).

IECNORM.COM: Click to view the full text of IEC 60695-8-1:2001

ESSAIS RELATIFS AUX RISQUES DU FEU –

Partie 8-1: Dégagement de chaleur – Guide général

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60695 fournit un guide pour l'évaluation du dégagement de chaleur des produits électrotechniques et des matériaux à partir desquels ils sont fabriqués.

Il est possible d'utiliser les résultats de dégagement de chaleur pour évaluer les risques dus au feu et pour la mise au point technique de la sécurité vis-à-vis du feu, voir la CEI 60695-1-1.

L'une des responsabilités d'un comité d'études consiste, le cas échéant, à utiliser les publications fondamentales de sécurité dans le cadre de l'élaboration de ses publications.

2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui en est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de la CEI 60695. Pour les références datées, les amendements ultérieurs ou les révisions de ces publications ne s'appliquent pas. Toutefois, les parties prenantes aux accords fondés sur la présente partie de la CEI 60695 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des normes indiquées ci-après. Pour les références non datées, la dernière édition du document normatif en référence s'applique. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 60695 (toutes les parties), *Essais relatifs aux risques du feu*

CEI 60695-1-1:1999, *Essais relatifs aux risques du feu – Partie 1-1: Guide pour l'évaluation des risques du feu des produits électrotechniques – Directives générales*

CEI 60695-8-2:2000, *Essais relatifs aux risques du feu – Partie 8-2: Dégagement de chaleur – Résumé et pertinence des méthodes d'essais*

ISO/IEC 13943:2000, *Sécurité au feu – Vocabulaire*

3 Définitions

Pour les besoins de la présente partie de la CEI 60965, des définitions issues de l'ISO/CEI 13943 ainsi que les définitions suivantes s'appliquent.

3.1

dégagement de chaleur

énergie thermique dégagée par la combustion d'un matériau ou d'un produit dans des conditions spécifiées

NOTE Il est exprimé en joules.

(ISO/IEC 13943, définition 87)

FIRE HAZARD TESTING –

Part 8-1: Heat release – General guidance

1 Scope

This part of IEC 60695 provides guidance in the assessment of heat release from electrotechnical products and materials from which they are constructed.

Heat release data can be used as part of fire hazard assessment and in fire safety engineering, as described in IEC 60695-1-1.

One of the responsibilities of a technical committee is, wherever applicable, to make use of basic safety publications in the preparation of its publications.

2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this part of IEC 60695. For dated references, subsequent amendments to, or revisions of, any of these publications do not apply. However, parties to agreements based on this part of IEC 60695 are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. For undated references, the latest edition of the normative document referred to applies. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 60695 (all parts), *Fire hazard testing*

IEC 60695-1-1:1999, *Fire hazard testing – Part 1-1: Guidance for assessing the fire hazard of electrotechnical products – General guidelines*

IEC 60695-8-2:2000, *Fire hazard testing – Part 8-2: Heat release – Summary and relevance of test methods*

ISO/IEC 13943:2000, *Fire safety – Vocabulary*

3 Definitions

For the purpose of this part of IEC 60695, definitions taken from ISO/IEC 13943, together with the following definitions, apply.

3.1

heat release

thermal energy which is released by the combustion of an item under specified conditions

NOTE It is expressed in joules.

(ISO/IEC 13943, definition 87)

3.2

débit thermique

énergie thermique dégagée par unité de temps par la combustion d'un matériau ou d'un produit, dans des conditions spécifiées

NOTE Il est exprimé en watts.

(ISO/IEC 13943, définition 88)

3.3

chaleur de combustion

énergie thermique dégagée par la combustion d'une unité de masse d'une substance donnée

NOTE Elle est exprimée en joules par kilogramme.

(ISO/IEC 13943, définition 86)

3.4

chaleur de combustion supérieure

chaleur dégagée par unité de masse lorsqu'un produit ou un matériau brûle complètement et que les produits de combustion sont dans des états normaux

NOTE La chaleur normale de combustion d'une substance est définie en termes thermochimiques comme le changement d'enthalpie qui se produit lors d'une combustion complète d'une mole de substance, dans des conditions normales. Dans le domaine du feu, la chaleur de combustion est aussi rattachée au « pouvoir calorifique supérieur » ou au « pouvoir de combustion supérieur », et l'unité utilisée est l'énergie par unité de masse au lieu d'une énergie par mole. L'eau formée comme produit de combustion est considérée être à l'état liquide. Pour un composé contenant du carbone et de l'hydrogène, par exemple, la combustion complète veut dire que tout le carbone est transformé en dioxyde de carbone et que tout l'hydrogène est transformé en eau à l'état liquide.

La chaleur de combustion supérieure est mesurée dans une bombe calorimétrique en présence d'oxygène. Une petite quantité de matériau réduit en poudre est introduit dans la bombe sous une pression d'oxygène pur, un arc électrique produit l'allumage. De cette façon tout l'échantillon est complètement transformé en produits totalement oxydés. Notons que dans des feux réels, c'est rarement le cas. Quelques matériaux potentiellement combustibles laissent des résidus charbonneux et les produits de combustion sont souvent partiellement oxydés comme par exemple des particules de suie dans les fumées et monoxyde de carbone.

3.5

chaleur de combustion inférieure

chaleur dégagée par unité de masse lorsqu'une substance brûle complètement et les produits de combustion sont à leur état normal excepté pour l'eau qui est considéré être à l'état de vapeur

NOTE La valeur de la chaleur de combustion inférieure est toujours plus petite que la valeur de la chaleur de combustion supérieure, car la chaleur dégagée par la condensation de la vapeur d'eau n'est pas comprise.

3.6

chaleur de combustion utile

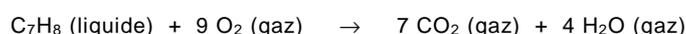
chaleur calculée en divisant la valeur de la chaleur dégagée, dans un intervalle de temps donné, par la masse perdue de l'échantillon brûlé dans le même intervalle de temps

NOTE Dans la plupart des cas, la valeur n'est pas la même que la valeur de la chaleur de combustion inférieure de l'échantillon. Le seul cas où la valeur est identique est lorsque l'échantillon est entièrement brûlé (c'est-à-dire que tout est transformé en fuel volatil) et quand tous les produits de combustion sont entièrement oxydés.

Les exemples suivants illustrent la différence entre le pouvoir calorifique inférieur et le potentiel calorifique.

EXEMPLE 1: Toluène

Le pouvoir calorifique inférieur du toluène est de 40,99 MJ/kgg, c'est une mesure d'énergie dégagée au cours de la réaction chimique



Si le toluène est brûlé dans un cône calorimètre, il ne brûle pas complètement, il y a formation de suie, de monoxyde de carbone et d'autres produits partiellement oxydés. Une valeur type de la chaleur de combustion utile du toluène (sans un flux énergétique extérieur) est d'environ 36 MJ/kg, reflétant la combustion incomplète. Dans ce cas, tout l'échantillon se volatilise et de ce fait la chaleur utile de combustion du fuel volatil est la même que la chaleur utile de combustion de l'échantillon. Cela ne sera pas le cas si un échantillon laisse des résidus (voir exemple 2).

3.2

heat release rate

thermal energy released per unit time by an item during combustion under specified conditions

NOTE It is expressed in watts.

(ISO/IEC 13943, definition 88)

3.3

heat of combustion

thermal energy produced by combustion of unit mass of a given substance

NOTE It is expressed in joules per kilogram.

(ISO/IEC 13943, definition 86)

3.4

gross heat of combustion

heat released per unit mass when a material or product burns completely and the combustion products are in their standard states

NOTE The standard heat of combustion of a substance is defined in thermochemical terms as the enthalpy change that occurs when one mole of a substance undergoes complete combustion under standard conditions. In the fire science community, heat of combustion is also referred to as "gross calorific value" or as "gross heat of combustion", and the units used are energy per unit mass rather than energy per mole. The water formed as a product of combustion is considered to be in the liquid state. For a compound containing carbon and hydrogen, for example, complete combustion means the conversion of all the carbon to carbon dioxide gas, and conversion of all the hydrogen to liquid water.

Gross heat of combustion is measured by oxygen bomb calorimetry. A small quantity of powdered material is sealed under pressure in pure oxygen and ignited by an electric spark. In this way all the sample is completely converted to fully oxidized products. Note that in real fires this is rarely the case. Some potentially combustible material is often left as char and products of combustion are often only partly oxidized, for example, soot particles in smoke and carbon monoxide.

3.5

net heat of combustion

heat released per unit mass when a substance burns completely and the combustion products are in their standard states with the exception of water which is considered to be in the vapour state

NOTE The net heat of combustion is always smaller than the gross heat of combustion because the heat released by the condensation of the water vapour is not included.

3.6

effective heat of combustion

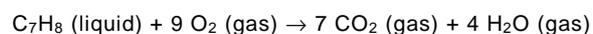
calculated by dividing the heat released in a given time interval by the mass lost from the burning test specimen in the same time period

NOTE In most cases, it is not the same as the net heat of combustion of the test specimen. The only case where it is the same is when all the test specimen is consumed (i.e. all converted to volatile fuel) and when all the combustion products are fully oxidized.

The following examples illustrate the difference between net heat of combustion and effective heat of combustion.

EXAMPLE 1: Toluene

The net heat of combustion of toluene is 40,99 MJ/kg and is a measure of the thermal energy released by the chemical reaction



If toluene is burned in a cone calorimeter it burns inefficiently with the production of soot, carbon monoxide and other partially oxidized products. A typical value for the effective heat of combustion of toluene (without external heat flux) is about 36 MJ/kg reflecting the incomplete combustion. In this case, all of the test specimen volatilizes and, as a result, the effective heat of combustion of the volatile fuel is also the same as the effective heat of combustion of the test specimen. This would not be so if some of the test specimen remained as a residue (see example 2).

EXEMPLE 2: Bois

Considérons un échantillon de 100 g de bois qui brûle en laissant 20 g de résidus charbonneux et en dégageant une chaleur de 960 kJ. La chaleur de combustion utile sera de 12 MJ/kg (c'est-à-dire 960 kJ/80 g), c'est la mesure du dégagement de chaleur par kilogramme lorsqu'une masse de 80 g de produits de dégradation volatils est brûlée. Cette mesure n'est pas identique à celle du dégagement de chaleur par kilogramme de échantillon qui sera de 9,6 kJ/g (c'est-à-dire 960 kJ/100 g). Notons que le pouvoir calorifique inférieur du bois est plus élevé, la valeur typique se situe entre 16 MJ/kg et 19 MJ/kg, et que c'est une mesure de la combustion complète du bois avec des produits complètement oxydés.

4 Principes de détermination du dégagement de chaleur

Le dégagement de chaleur peut être déterminé en utilisant l'une des techniques suivantes:

- a) consommation d'oxygène;
- b) formation de dioxyde de carbone;
- c) augmentation de la température des gaz.

Ces trois techniques sont basées sur le fait que la quantité de chaleur dégagée dans un incendie peut être différente du pouvoir calorifique inférieur d'un matériau mesuré par exemple avec la bombe calorimétrique. La chaleur dégagée dans la bombe calorimétrique est le produit de la chaleur de combustion théorique du matériau en relation avec la masse du matériau impliqué. Dans un incendie, la combustion est rarement complète, ainsi les matériaux ou produits peuvent présenter une chaleur de combustion utile généralement inférieure à la chaleur de combustion théorique.

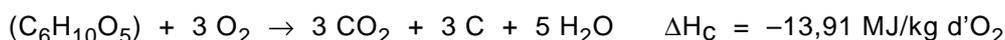
4.1 Dégagement de chaleur par consommation d'oxygène

Pour un grand nombre de fuels organiques, une plus ou moins grande quantité de chaleur est dégagée par unité d'oxygène consommée pour obtenir une combustion complète [1]¹. La valeur moyenne de cette constante est 13,1 MJ/kg d'oxygène et cette valeur est largement utilisée pour les applications pratiques aussi bien pour les essais à petite qu'à grande échelle. Si une valeur plus précise est connue pour le matériau, il est recommandé de l'utiliser pour calculer la chaleur dégagée. Cette relation implique de mesurer la quantité d'oxygène consommée lors d'une combustion et le débit massique entre le conduit, afin de déterminer la chaleur dégagée.

Le tableau 1 énumère quelques valeurs de chaleur de combustion (valeurs de combustion inférieure) [2]: à l'exception de trois produits: éthylène, acétylène et le polyoxyde de méthyle, toutes les chaleurs de combustion calculées par kilogramme d'oxygène consommé sont comprises entre 12,51 MJ et 13,6 MJ. Les valeurs du tableau 1 sont calculées en supposant une combustion complète. Cependant, comme énoncé ci-dessus, Huggett a étudié les effets d'une éventuelle combustion incomplète et a calculé les valeurs de ΔH_c pour plusieurs de ces cas. Par exemple, dans le cas de la cellulose brûlant en donnant un rapport CO₂ sur CO de 9:1;



ou brûlant en donnant une quantité appréciable de résidus charbonneux;



comparé avec une combustion complète;



¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie.

EXAMPLE 2: Wood

Consider a 100 g sample of wood that burns to leave a carbonaceous char of mass 20 g and that releases 960 kJ of heat. The effective heat of combustion will be 12 MJ/g (i.e. 960 kJ/80 g) and is a measure of the heat released per kilogram when the 80 g of volatile degradation products is burned. This is not the same as the heat released per kilogram of test specimen which will be 9,6 MJ/kg. (i.e. 960 kJ/100 g). Note that the net heat of combustion of wood is a significantly higher figure, typically between 16 MJ/kg and 19 MJ/kg, and is a measure of the complete combustion of the wood to fully oxidized products.

4 Principles of determining heat release

Heat release can be determined using one of the following techniques:

- a) oxygen consumption;
- b) carbon dioxide generation;
- c) gas temperature increase.

All three of these techniques are based on the concept that the quantity of heat released in a fire may differ from the net calorific value of a material, for example, as measured in a bomb calorimeter. The heat released in a bomb calorimeter reaction is the product of the theoretical heat of combustion of the material and the mass of the material involved. In a fire, combustion is rarely complete, so that the materials or products may exhibit an effective heat of combustion which is usually lower than the theoretical heat of combustion.

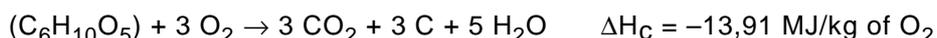
4.1 Heat release by oxygen consumption

For a large number of organic fuels, a more or less constant amount of heat is released per unit of oxygen consumed for complete combustion [1]. The average value for this constant is 13,1 MJ/kg of oxygen and this value is widely used for practical applications both in small- and large-scale testing. If a more accurate value is known for the material, it should be used for calculating heat release. This relationship implies that it is sufficient to measure the oxygen consumed in a combustion system, and the mass flow rate in the exhaust duct, in order to determine heat release.

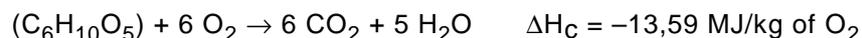
Table 1 lists some heats of combustion values (net calorific values) [2]; with the exception of three materials: ethylene, acetylene and polyoxymethylene, all the calculated heats of combustion per kilogram of oxygen consumed lie between 12,51 MJ and 13,61 MJ. The values in table 1 are calculated assuming complete combustion. However, as stated above, Huggett does discuss the effects of possible incomplete combustion and calculates values of ΔH_c for several such cases. For example, in the case of cellulose burning to give a 9:1 ratio of CO_2 to CO;



or burning to give an appreciable amount of carbonaceous char;



compared with complete combustion;



¹ Figures in square brackets refer to the bibliography.

Huggett présente plusieurs autres exemples et conclut que l'estimation d'une constante de dégagement de chaleur par unité d'oxygène consommé sera suffisamment précise pour la plupart des applications.

Bien sûr, si la valeur correcte de ΔH_c par kilogramme d'O₂ est connue pour un matériau particulier, alors il convient de l'utiliser à la place de la valeur approximative [3].

Tableau 1a – Relation entre la chaleur de combustion explicitée par MJ/kg et MJ/kg d'oxygène consommé, pour différents combustibles

Combustible	Formule	ΔH_c *	
		MJ/kg	MJ/kg d'O ₂
Méthane (g)	CH ₄	50	13
Ethane (g)	C ₂ H ₆	47	13
Butane (g)	C ₄ H ₁₀	46	13
Octane (l)	C ₈ H ₁₈	44	13
Ethylène (g)	C ₂ H ₄	47	14
Acétylène (g)	C ₂ H ₂	48	16
Benzène (l)	C ₆ H ₆	40	13
Polyéthylène	$-(C_2H_4)_n-$	43	13
Polypropylène	$-(C_3H_6)_n-$	43	13
Polyisobutylène	$-(C_4H_8)_n-$	44	13
Polybutadiène	$-(C_4H_6)_n-$	43	13
Polystyrène	$-(C_8H_8)_n-$	40	13
PVC	$-(CH_2CHCl)_n-$	16	13
PMMA	$-(C_5H_8O_2)_n-$	25	13
PAN	$-(C_3H_3N)_n-$	31	14
Polyoxyméthylène	$-(CH_2O)_n-$	15	15
PET	$-(C_{10}H_8O_4)_n-$	22	13
Polycarbonate	$-(C_{16}H_{14}O_3)_n-$	30	13
Triacétate de cellulose	$-(C_{12}H_{16}O_8)_n-$	18	13
Nylon 66	$-(C_6H_{11}NO)_n-$	30	13
Cellulose	$-(C_6H_{10}O_5)_n-$	16	14
Coton	-	16	14
Papier (journaux)	-	18	13
Bois (érable)	-	19	13
Lignite	-	25	13
Charbon (bitume)	-	35	14

* Corps réagissants et produits à l'état gazeux à 25 °C.

NOTE 1 (g) = gaz, (l) = liquide

NOTE 2 La plupart des valeurs de la colonne 3 ont été calculées à partir d'éléments thermodynamiques. Les valeurs de la colonne 4, calculées à partir de celles de la colonne 3, supposent une combustion complète.

Huggett discusses several other examples and concludes that the assumption of a constant heat release per unit of oxygen consumed will be sufficiently accurate for most applications.

Of course, if the correct value of ΔH_C per kilogram of O_2 is known for a particular material then this should be used instead of the approximate value [3].

Table 1a – The relationship between heat of combustion expressed in units of MJ/kg and MJ/kg of oxygen consumed, for a variety of fuels

Fuel	Formula	ΔH_c *	
		MJ/kg	MJ/kg of O_2
Methane (g)	CH_4	50	13
Ethane (g)	C_2H_6	47	13
Butane (g)	C_4H_{10}	46	13
Octane (l)	C_8H_{18}	44	13
Ethylene (g)	C_2H_4	47	14
Acetylene (g)	C_2H_2	48	16
Benzene (l)	C_6H_6	40	13
Polyethylene	$-(C_2H_4)_n-$	43	13
Polypropylene	$-(C_3H_6)_n-$	43	13
Polyisobutylene	$-(C_4H_8)_n-$	44	13
Polybutadiene	$-(C_4H_6)_n-$	43	13
Polystyrene	$-(C_6H_8)_n-$	40	13
PVC	$-(CH_2CHCl)_n-$	16	13
PMMA	$-(C_5H_8O_2)_n-$	25	13
PAN	$-(C_3H_3N)_n-$	31	14
Polyoxymethylene	$-(CH_2O)_n-$	15	15
PET	$-(C_{10}H_8O_4)_n-$	22	13
Polycarbonate	$-(C_{16}H_{14}O_3)_n-$	30	13
Cellulose triacetate	$-(C_{12}H_{16}O_8)_n-$	18	13
Nylon 66	$-(C_6H_{11}NO)_n-$	30	13
Cellulose	$-(C_6H_{10}O_5)_n-$	16	14
Cotton	-	16	14
Paper (newsprint)	-	18	13
Wood (maple)	-	19	13
Lignite	-	25	13
Coal (bituminous)	-	35	14

* Reactants and products at 25 °C, all products gaseous.

NOTE 1 (g) = gas, (l) = liquid

NOTE 2 Most of the values in column 3 are calculated from thermodynamic data. The values in column 4 are calculated from those in column 3 assuming complete combustion.

Tableau 1b – Relation entre la chaleur de combustion explicitée par MJ/kg et MJ/kg d'oxygène consommé, pour différents liquides isolants

Liquide isolant	Formule	ΔH_c *	
		MJ/kg	MJ/kg d'O ₂
Huile silicone (1)	-	25	14,5
Ester de pentaérythritol (2)	-	36,8	**
Mélange de mono et dibenzyl toluène (3)	-	39,5	**
Huile paraffinique minérale (4)	-	46,1	**

* Corps réagissants et produits à l'état gazeux à 25 °C.
 ** Aucune donnée n'est disponible actuellement.

(1) Huile silicone pour transformateur, type T1, CEI 60836 [4]
 NOTE Le comité d'études 10 a noté un intervalle des valeurs par différentes sources de chaleurs de combustion de 25 MJ/kg à 27 MJ/kg.
 (2) Esters pour transformateurs, Type T1, CEI 61099 [5]
 (3) Liquide isolant pour condensateurs, CEI 60867 [6]
 (4) Huiles minérales pour transformateurs et appareillage de connexion, CEI 60296 [7].

4.2 Dégagement de chaleur par production de dioxyde de carbone

Cette technique est basée sur le fait que l'énergie dégagée par molécule d'oxygène consommé est approximativement égale à l'énergie dégagée par molécule de dioxyde de carbone produit, en raison de la réaction stœchiométrique de combustion. Ainsi, par convention, la vitesse de production du dioxyde de carbone, produit de la réaction, est égale à la vitesse de consommation d'oxygène, réactif, si la combustion est complète (par exemple, le rapport CO/CO₂ est très petit). Il convient que tous les deux représentent la quantité de chaleur dégagée. La valeur moyenne de cette constante est 13,3 MJ/kg de dioxyde de carbone dégagé. Si une valeur plus précise est connue pour le matériau ou le produit, il est recommandé de l'utiliser pour calculer la chaleur dégagée.

En général, la valeur de la quantité de chaleur dégagée, déterminée par la production de dioxyde de carbone correspond bien à la valeur déterminée par consommation d'oxygène.

4.3 Dégagement de chaleur par augmentation de la température des gaz

La technique de la température des gaz est basée sur le concept qu'il n'y a pas de perte de chaleur et que toute la chaleur produite lors d'un incendie est utilisée pour augmenter la température du flux chaud d'air et des effluents du feu, ainsi leurs températures peuvent être déterminées en aval de la zone de combustion vive. Si les pertes de chaleur, venant principalement de la radiation thermique, sont négligeables, la technique d'augmentation de température des gaz (appelée aussi thermopile technique) représentera la même quantité de chaleur dégagée que celle obtenue par la méthode de consommation d'oxygène ou de formation de dioxyde de carbone. Le dégagement de chaleur est déterminé en mesurant l'augmentation de température des gaz, au thermopile par rapport à la température de référence (généralement à la température ambiante). Celle-ci est convertie en chaleur dégagée au moyen des mesures du flux total d'air et du mélange des effluents du feu en utilisant la chaleur spécifique du mélange à la température de l'air appropriée, ou simplement par étalonnage à flux constant d'un matériau dont le dégagement de chaleur est bien connu, comme le méthane.

Table 1b – The relationship between heat of combustion expressed in units of MJ/kg and MJ/kg of oxygen consumed, for a variety of insulating liquids

Insulating liquids	Formula	ΔH_c *	
		MJ/kg	MJ/kg d'O ₂
Silicone oil (1)	–	25	14,5
Pentaerythritol ester (2)	–	36,8	**
Mixture of mono- and dibenzyl toluene (3)	–	39,5	**
Paraffinic mineral (4)	–	46,1	**
* Reactants and products at 25 °C, all products gaseous.			
** No data are currently available.			
(1) Silicone transformer liquid, type T1, IEC 60836 [4]			
NOTE Technical Committee 10 has noted a range of values from different sources for heat of combustion of 25 MJ/kg to 27 MJ/kg.			
(2) Transformer esters, Type T1, IEC 61099 [5]			
(3) Capacitor insulating liquid, IEC 60867 [6]			
(4) Transformer and switchgear mineral oil, IEC 60296 [7].			

4.2 Heat release by carbon dioxide generation

This technique is based on the concept that the energy released per molecule of oxygen consumed is approximately equal to the energy released per molecule of carbon dioxide generated, in view of the stoichiometry of the combustion reaction. Thus, the consumption rate of oxygen, the reactant, should be equal to the generation rate of carbon dioxide, the product, if combustion is complete (for example, very small CO/CO₂ ratios). They should both represent the amount of heat released. The average value for this constant is 13,3 MJ/kg of carbon dioxide generated. If a more accurate value is known for the material or product, it should be used in calculating heat release.

In general, heat release values determined by carbon dioxide generation agree well with heat release rate determined by oxygen consumption.

4.3 Heat release by gas temperature increase

The gas temperature technique is based on the concept that there are no heat losses and that all the heat generated by the fire is used to increase the temperature of the hot flowing mixture of air and fire effluent, so that their temperatures can be determined downstream from the flaming zone. If the heat losses, mainly from thermal radiation, are negligible, then the gas temperature rise technique (also called thermopile technique) would represent the same heat release value as the oxygen consumption or the carbon dioxide generation method. The heat release is determined by measuring the increase in the temperature of the gases, at the thermopile, with respect to a reference temperature, generally the ambient temperature. This is converted to heat release by means of measurements of the total flow of the air and fire effluent mixture using the specific heat of the mixture at the appropriate air temperature, or simply by calibration with a constant flow of a material of well-known heat release, such as methane.

En général, les dégagements de chaleur déterminés par mesure de température sont inférieurs à ceux déterminés par consommation d'oxygène ou par formation de dioxyde de carbone, utilisant des méthodes calorimétriques, parce que les pertes de chaleur ne sont généralement pas négligeables. Dans un essai à petite échelle, ces pertes de chaleur peuvent être minimisées, avec soin, en s'efforçant de construire un système aussi proche que possible d'un système adiabatique.

5 Considérations pour la sélection des méthodes d'essai

5.1 Sources d'allumage

Ces sources d'allumage doivent être choisies pour être aussi reproductibles et aussi bien représentatives que possible du modèle de feu intéressé, cela veut dire que la source d'allumage doit représenter l'un des cas suivants:

- a) sources d'énergie interne, localisées anormalement dans l'équipement électrotechnique ou dans l'appareillage, ou
- b) sources externes de chaleur ou de flamme, localisées à l'extérieur de l'équipement électrotechnique ou de l'appareillage.

5.2 Types d'éprouvette

Il est souhaitable de limiter les variations de forme, de dimension et de disposition de l'éprouvette d'essai. Il y a trois types d'éprouvettes, limités à la capacité de l'équipement (certains types d'éprouvettes peuvent seulement s'adapter à certaines méthodes d'essais):

a) Essai sur produit

Les éprouvettes doivent être des produits manufacturés.

b) Essai sur produit simulé

Les éprouvettes doivent être un constituant du produit ou une simulation représentative du produit.

c) Essai sur matériaux ou composites

Les éprouvettes d'essai doivent être des matériaux de base (solide, liquide ou gazeux), ou de simples composites de plusieurs matériaux).

5.3 Choix des conditions d'essai

Dans les essais à grande échelle, il convient d'étudier plusieurs possibilités avant de définir les conditions d'essais de dégagement de chaleur des produits. En plus du choix adéquat des sources d'allumage, la géométrie de l'endroit (dimensions, localisation de l'éprouvette d'essai, la source d'allumage et les possibilités d'évacuation), les autres instruments ou produits présents (par exemple pour mesurer d'autres propriétés intéressantes du feu) et le niveau de ventilation du feu doivent être considérés.

On peut faire varier la ventilation du feu pour représenter des incendies ayant plusieurs degrés de ventilation, par exemple, feux bien ventilés ou feux sous-ventilés (avec ventilation contrôlée) [8]. Pour les essais à petite échelle, il y a, occasionnellement, aussi intérêt à déterminer le dégagement de chaleur dans des conditions différentes de celles obtenues sous atmosphère normale, (par exemple en étudiant les effets de l'air vicié, ou de l'atmosphère où la concentration en oxygène est élevée comme dans un astronef ou en simulant les effets de radiation en augmentant la quantité d'oxygène).

In general, heat release values determined by temperature measurement are lower than heat release values determined by oxygen consumption or carbon dioxide generation calorimetry techniques, because heat losses are generally not negligible. In a small-scale test, these heat losses can, with care, be minimized by attempting to make the system as adiabatic as possible.

5 Considerations for the selection of test methods

5.1 Ignition sources

Ignition sources shall be chosen to be as reproducible as possible as well as representative of the fire scenario of interest. This means that the ignition source shall represent exposure to either:

- a) unusual localized, internal sources of energy within the electrotechnical equipment or system; or
- b) external sources of heat or flame, outside the electrotechnical equipment or system.

5.2 Type of test specimen

It is desirable to limit the variations in shape, size and arrangement of the test specimen. There are three types of test specimens limited to equipment capabilities (certain test methods can only accommodate certain categories of sample):

a) *Product testing*

The test specimens shall be manufactured products.

b) *Simulated product testing*

The test specimens shall be a component or representative simulation of a product.

c) *Materials or composite testing*

The test specimens shall be a basic material (solid, liquid or gas), or simple composites of materials.

5.3 Choice of conditions

In large-scale fires, there are several possibilities which should be investigated before designing the conditions for heat release testing of products. In addition to the correct choice of ignition sources, the compartment geometry (size and location of test specimen and of ignition source and exhaust capabilities), other instruments or products present (for example, for measurement of other relevant fire properties), and the level of fire ventilation, shall be considered.

The ventilation of the fire may be varied to represent fires with different degrees of ventilation, for example, well-ventilated fires or under-ventilated (ventilation-controlled) fires [8]. In small-scale tests there is, occasionally, also interest in determining heat release under conditions different from those in normal atmospheres (for example, to investigate the effects of vitiated atmospheres, or of very high oxygen atmospheres, such as in a spacecraft, or by simulating the effect of radiation with increased oxygen).

5.4 Appareillage d'essai

L'appareillage d'essai doit avoir la capacité de tester l'un des types des éprouvettes décrits en 5.2, l'éprouvette d'essai étant orientée horizontalement ou verticalement. Il est recommandé d'orienter le choix sur l'appareillage qui a fourni les données les plus appropriées pour des calculs de conception de sécurité vis-à-vis du feu se rapportant aux produits en grandeur nature et à leur installation.

5.4.1 Appareillage d'essai à petite échelle

L'appareillage d'essai doit avoir les dispositifs nécessaires pour émettre un flux de chaleur radiant uniforme sur les surfaces exposées des éprouvettes. Les panneaux radiants électriques à base d'éléments en carbure de silicium, en quartz-tungstène ou des bobinages métalliques, sont capables d'émettre des flux uniformes sur l'éprouvette d'essai. L'appareillage d'essai doit avoir les dispositifs pour allumer ou provoquer un allumage des effluents du feu émis à partir du flux de chaleur appliqué sur la surface de l'éprouvette d'essai. Les sources typiques d'allumage donnant satisfaction sont des allume-gaz électriques ou de petites flammes de brûleur à gaz prémélangés.

L'appareillage d'essai doit avoir une cheminée d'évacuation pour capturer la totalité du mélange des effluents du feu et d'air. Différents instruments de mesure sont exigés, ils doivent permettre de mesurer la vitesse de perte de masse et la température. Les instruments spécifiques nécessaires sont: un analyseur d'oxygène de sensibilité appropriée pour la technique de consommation d'oxygène, ou des analyseurs de dioxyde et de monoxyde de carbone de sensibilité appropriée pour la technique de formation de dioxyde de carbone ou un thermocouple ou thermopile de sensibilité adaptée pour la mesure de l'augmentation de température des gaz.

NOTE L'appareillage comprend souvent des moyens de mesures simultanés tels qu'une cellule de mesure de perte de masse pour déterminer les pertes de masse des échantillons, un système optique situé dans la cheminée d'évacuation pour les mesures d'obscurcissement par la fumée, des analyseurs de gaz pour les mesures de concentration des produits de combustion dans le conduit d'évacuation, un système collectant les suies (pour mesurer la quantité de particules) et des appareils de mesure de température et de pression à différents endroits. Il faut aussi prévoir un calibrage adéquat des instruments d'essai.

5.4.2 Appareillage d'essai à grande échelle

L'appareillage d'essai à grande échelle doit avoir, au minimum, son propre conduit d'évacuation équipé d'instruments de mesure appropriés pour les déterminations des dégagements de chaleur. Tout autre instrument dépendra des besoins spécifiques de l'essai. Il est souhaitable que des instruments du même type que ceux décrits ci-dessus pour les essais à petite échelle soient ajoutés aux instruments de l'essai à grande échelle.

5.4.3 Comparaison entre les méthodes d'essai à petite échelle et à grande échelle

Il est maintenant bien établi que la chaleur dégagée est une donnée essentielle dans l'évaluation des risques du feu dans des incendies réels. Cette donnée pour de telles évaluations peut être obtenue à partir d'appareillages à grande échelle ou à petite échelle. Par le choix approprié du flux externe de chaleur et d'autres conditions, il a été déterminé que les mesures de dégagement de chaleur et de vitesse de perte de masse à petite échelle, à différentes valeurs de flux thermique externe, peuvent être corrélées, dans certains cas, avec des mesures faites à grande échelle [9], [10] et [11].