

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Electrotechnical products – Determination of levels of six regulated substances (lead, mercury, cadmium, hexavalent chromium, polybrominated biphenyls, polybrominated diphenyl ethers)

Produits électrotechniques – Détermination des niveaux de six substances réglementées (plomb, mercure, cadmium, chrome hexavalent, diphényles polybromés, diphényléthers polybromés)



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2008 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: www.iec.ch

About the IEC

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

About IEC publications

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

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

The IEC on-line Catalogue enables you to search by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

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

- Electropedia: www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary online.

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

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

A propos de la CEI

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

A propos des publications CEI

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

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

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

- Electropedia: www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International en ligne.

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

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



IEC 62321

Edition 1.0 2008-12

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Electrotechnical products – Determination of levels of six regulated substances
(lead, mercury, cadmium, hexavalent chromium, polybrominated biphenyls,
polybrominated diphenyl ethers)**

**Produits électrotechniques – Détermination des niveaux de six substances
réglementées (plomb, mercure, cadmium, chrome hexavalent, diphényles
polybromés, diphényléthers polybromés)**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

XE

ICS 13.020; 43.040.10

ISBN 2-8318-1020-7

CONTENTS

FOREWORD.....	6
INTRODUCTION.....	8
1 Scope.....	9
2 Normative references	9
3 Terms, definitions and abbreviations	10
3.1 Terms and definitions	10
3.2 Abbreviations	11
4 Test methods – Overview	13
4.1 Field of application	13
4.2 Sample.....	13
4.3 Test methods – Flow chart	14
4.4 Adjustment to the matrix.....	15
4.5 Limits of detection (LOD) and limits of quantification (LOQ).....	15
4.6 Test report	16
4.7 Alternative test methods	16
5 Mechanical sample preparation	17
5.1 Overview	17
5.1.1 Field of application	17
5.1.2 Quality assurance.....	17
5.2 Apparatus, equipment and materials	17
5.3 Procedure	18
5.3.1 Manual cutting.....	18
5.3.2 Coarse grinding/milling.....	18
5.3.3 Homogenizing	18
5.3.4 Fine grinding/milling	18
5.3.5 Very fine grinding of polymers and organic materials.....	19
6 Screening by X-ray fluorescence spectrometry (XRF).....	19
6.1 Overview	19
6.1.1 Principle	21
6.1.2 Warnings.....	22
6.2 Apparatus, equipment and materials	22
6.2.1 XRF spectrometer	22
6.2.2 Materials and tools	22
6.3 Reagents.....	22
6.4 Sampling.....	22
6.4.1 Non-destructive approach.....	22
6.4.2 Destructive approach.....	23
6.5 Procedure	23
6.5.1 General	23
6.5.2 Preparation of the spectrometer	23
6.5.3 Test portion	24
6.5.4 Verification of spectrometer performance.....	24
6.5.5 Tests	25
6.5.6 Calibration.....	25
6.6 Calculations	26
6.7 Evaluation of the method.....	27

6.7.1	Lead	27
6.7.2	Mercury	27
6.7.3	Cadmium	27
6.7.4	Chromium	27
6.7.5	Bromine	28
6.8	Quality control	28
6.8.1	Accuracy of calibration	28
6.8.2	Control samples	28
6.9	Special cases	28
6.9.1	Presentation of a sample for measurement	28
6.9.2	Uniformity of the sample	29
7	Determination of mercury in polymers, metals and electronics by CV-AAS, CV-AFS, ICP-OES and ICP-MS	30
7.1	Overview	30
7.2	Apparatus, equipment and materials	31
7.3	Reagents	32
7.4	Sample preparation	33
7.4.1	Test portion	33
7.4.2	Wet digestion (digestion of electronics)	33
7.4.3	Microwave digestion	34
7.4.4	Preparation of laboratory reagent blank	34
7.5	Test procedure	34
7.5.1	Preparation of calibrant solutions	34
7.5.2	Development of the calibration curve	35
7.5.3	Measurement of the sample	36
7.5.4	Calculation	36
7.6	Evaluation of the method	36
8	Determination of lead and cadmium in polymers by ICP-OES, ICP-MS and AAS	37
8.1	Overview	37
8.2	Apparatus, equipment and materials	38
8.3	Reagents	39
8.4	Sample preparation	40
8.4.1	Test portion	40
8.4.2	Preparation of test solution	40
8.4.3	Preparation of laboratory reagent blank	42
8.5	Test procedure	42
8.5.1	Preparation of calibration solution	42
8.5.2	Development of the calibration curve	43
8.5.3	Measurement of the sample	43
8.5.4	Calculation	44
8.6	Evaluation of the method	44
9	Determination of lead and cadmium in metals by ICP-OES, ICP-MS and AAS	44
9.1	Overview	44
9.2	Apparatus, equipment and materials	45
9.3	Reagents	45
9.4	Sample preparation	46
9.4.1	Test portion	46
9.4.2	Preparation of the test sample solution	47
9.5	Preparation of laboratory reagent blank	48

9.6	Test procedure	48
9.6.1	Preparation of the calibrant	48
9.6.2	Measurement of the calibrant	49
9.6.3	Measurement of the sample.....	49
9.6.4	Calculation	50
9.7	Evaluation of the method	50
10	Determination of lead and cadmium in electronics by ICP-OES, ICP-MS and AAS.....	50
10.1	Overview	50
10.2	Apparatus, equipment and materials	51
10.3	Reagents.....	52
10.4	Sample preparation	53
10.4.1	Test portion	53
10.4.2	Digestion with aqua regia	53
10.4.3	Microwave digestion	54
10.5	Test procedure	55
10.5.1	Preparation of a calibrant solution	55
10.5.2	Standard preparation.....	55
10.5.3	Calibration.....	56
10.5.4	Development of the calibration curve.....	56
10.5.5	Measurement of the sample.....	57
10.5.6	Calculation	57
10.6	Evaluation of the method	58
Annex A	(informative) Determination of PBB and PBDE in polymers by GC-MS	59
Annex B	(informative) Test for the presence of hexavalent chromium (Cr(VI)) in colourless and coloured corrosion-protected coatings on metals	75
Annex C	(Informative) Determination of hexavalent chromium (Cr(VI)) in polymers and electronics by the colorimetric method	80
Annex D	(informative) Practical application of screening by X-ray fluorescence spectrometry (XRF).....	88
Annex E	(informative) Practical application of determination of mercury in polymers, metals and electronics by CV-AAS, CV-AFS, ICP-OES and ICP-MS	95
Annex F	(informative) Practical application of determination of lead and cadmium in polymers by ICP-OES, ICP-MS and AAS	97
Annex G	(informative) Practical application of determination of lead and cadmium in metals by ICP-OES, ICP-MS and AAS	99
Annex H	(informative) Practical application of determination of lead and cadmium in electronics by ICP-OES, ICP-MS and AAS.....	102
Bibliography	106
Figure 1	– Flow chart of the test methods	14
Figure A.1	– Total ion chromatogram of PBDE mixture, BDE-1 to BDE-206 (5 µg/ml), BDE-209 (50 µg/ml)	73
Figure A.2	– Total ion chromatogram of PBB mixture (3,5 µg/ml)	74
Figure A.3	– Total ion chromatogram of PBB and PBDE mixtures (BDE-1 to BDE-206 5 µg/ml, BDE-209 5,0 µg/ml, PBBs 3,5 µg/ml).....	74
Figure E.1	– Heating digester equipped with reaction vessel, reflux cooler and absorption vessel.....	95
Figure G.1	– Background correction.....	100
Figure H.1	– Background correction.....	104

Table 1 – Overview of the content of the verification procedure	15
Table 2 – Tested concentration ranges for lead in materials	20
Table 3 – Tested concentration ranges for mercury in materials.....	20
Table 4 – Tested concentration ranges for cadmium in materials	20
Table 5 – Tested concentration ranges for total chromium in materials	20
Table 6 – Tested concentration ranges for bromine in materials.....	20
Table 7 – Recommended X-ray lines for individual analytes.....	24
Table 8 – Mean results and recovery rates of mercury obtained in the IIS2 study.....	37
Table A.1 – Matrix spiking solution	61
Table A.2 – Calibration solutions of PBBs and PBDEs	62
Table A.3 – Reference masses for the quantification of PBBs	67
Table A.4 – Reference masses for the quantification of PBDEs.....	67
Table A.5 – Example calculation	68
Table A.6 – Example list of commercially available calibration congeners considered suitable for this analysis	71
Table A.7 – PBB and PBDE congeners in the mixture	72
Table C.1 – Method detection limit = $t \times s_{n-1}$	86
Table D.1 – Effect of matrix composition on limits of detection of some controlled elements.....	89
Table D.2 – Screening limits in mg/kg for regulated elements in various matrices	90
Table D.3 – Mean results and recovery rates for lead obtained in the IIS2 study.....	91
Table D.4 – Mean results and recovery rates for mercury obtained in the IIS2 study.....	92
Table D.5 – Mean results and recovery rates for cadmium obtained in the IIS2 study	92
Table D.6 – Mean results and recovery rates for total chromium obtained in the IIS2 study	93
Table D.7 – Mean results and recovery rates for total bromine obtained in the IIS2 study	94
Table E.1 – Program for microwave digestion of samples (power output for five vessels).....	96
Table F.1 – Spectral interferences for the wavelengths of cadmium and lead.....	97
Table F.2 – Examples of mass/charge (m/z) ratios.....	98
Table F.3 – Examples of wavelengths for AAS.....	98
Table G.1 – Spectral interferences for the wavelengths of cadmium and lead	99
Table G.2 – Examples of mass/charge (m/z) ratios	101
Table G.3 – Examples for wavelengths for AAS	101
Table H.1 – Program for microwave digestion of samples ^a	102
Table H.2 – Spectral interferences for the wavelengths of cadmium and lead	103
Table H.3 – Examples of mass/charge (m/z) ratios	105
Table H.4 – Examples of wavelengths for AAS.....	105

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**ELECTROTECHNICAL PRODUCTS –
DETERMINATION OF LEVELS OF SIX REGULATED SUBSTANCES
(LEAD, MERCURY, CADMIUM, HEXAVALENT CHROMIUM,
POLYBROMINATED BIPHENYLS, POLYBROMINATED DIPHENYL ETHERS)**

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organisation for standardisation comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardisation in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organisations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organisation for Standardisation (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organisations.
- 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 IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, the IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be held responsible for any product declared to be in conformity with an IEC Publication.
- 6) All users shall ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to the IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 62321 has been prepared by IEC technical committee 111: Environmental standardization for electrical and electronic products and systems.

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

FDIS	Report on voting
111/116/FDIS	111/125/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 ISO/IEC Directives, Part 2.

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

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

INTRODUCTION

The widespread use of electrotechnical products has drawn increased attention to their impact on the environment. In many countries all over the world this has resulted in the adaptation of regulations affecting wastes, substances and energy use of electrotechnical products.

The use of certain substances such as lead (Pb), mercury (Hg), cadmium (Cd), hexavalent chromium (Cr(VI)) contained in inorganic and organic compounds, and two types of brominated flame retardants, polybrominated biphenyls (PBB) and polybrominated diphenyl ethers (PBDE) in electrotechnical products, is regulated in current and proposed regional legislation.

The purpose of IEC 62321 is therefore to provide test methods that will allow the electrotechnical industry to determine the levels of regulated substances Pb, Hg, Cd, Cr(VI) and their compounds, as well as PBB and PBDE in electrotechnical products on a consistent global basis.

ELECTROTECHNICAL PRODUCTS – DETERMINATION OF LEVELS OF SIX REGULATED SUBSTANCES (LEAD, MERCURY, CADMIUM, HEXAVALENT CHROMIUM, POLYBROMINATED BIPHENYLS, POLYBROMINATED DIPHENYL ETHERS)

1 Scope

IEC 62321, which is an International Standard, specifies the determination of the levels of lead (Pb), mercury (Hg), cadmium (Cd), hexavalent chromium (Cr(VI)) contained in inorganic and organic compounds, and two types of brominated flame retardants, polybrominated biphenyls (PBB) and polybrominated diphenyl ethers (PBDE) contained in electrotechnical products.

This standard refers to the sample as the object to be processed and measured. The nature of the sample and the manner in which it is acquired is defined by the entity carrying out the tests and not by this standard.

NOTE 1 Further guidance on obtaining representative samples from finished electronic products to be tested for levels of regulated substances may be found in the future IEC Publicly Available Specification (PAS) for sampling disjointment¹.

It is noted that the selection of the sample may affect the interpretation of the test results.

This standard does not determine:

- the definition of a “unit” or “homogenous material” as the sample;
- the disassembly procedure employed for obtaining a sample;
- assessment procedures.

NOTE 2 Further guidance on assessment procedures may be found in the future IEC Technical Specification IEC/TS 62476^{[1]2}.

2 Normative references

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

ISO/IEC Guide 98:1995, *ISO Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*

ISO 3696, *Water for analytical laboratory use – Specification and test methods*

ISO 5961, *Water quality – Determination of cadmium by atomic absorption spectrometry*

ISO 17025, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*

¹ Under consideration, no number yet assigned.

² Figures in square brackets refer to the bibliography.

3 Terms, definitions and abbreviations

3.1 Terms and definitions

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

3.1.1

analyte

substance to be measured

3.1.2

calibrant

calibration standard

substance in solid or liquid form with known and stable concentration(s) of the analyte(s) of interest used to establish instrument response (calibration curve) with respect to analyte(s) concentration(s)

3.1.3

calibration blank

substance identical in form and matrix composition to the calibrant(s) but containing no analyte(s)

3.1.4

certified reference material

CRM

reference material, accompanied by a certificate, one or more of whose properties are certified by a procedure which establishes traceability to an accurate realization of the unit in which the property values are expressed, and for which each certified value is accompanied by an uncertainty at a stated level of confidence

[ISO Guide 30]^[2]

3.1.5

digestate

solution obtained after completion of sample digestion process

3.1.6

electronic assembly

group of components, at least one of which is an electronic device, but in which individual parts may be replaced without damage to the assembly

EXAMPLE Group of components mounted on a printed wiring board.

[IEC 60730-1:1999, definition H.2.5.9]^[3]

3.1.7

electronic components

electrical or electronic devices that are not subject to disassembly without destruction or impairment of design use. They are sometimes called electronic parts, or piece parts

EXAMPLES Resistors, capacitors, diodes, integrated circuits, hybrids, application-specific integrated circuits, wound components and relays.

[IEC/TS 62239:2003]^[4]

3.1.8

electronics

electronic assembly and/or electronic component and/or field-replaceable unit

3.1.9**field replaceable unit****FRU**

part, component or subassembly that is easily removed (mechanically disjointed) using ordinary tools

NOTE “Easily removed” means using ordinary tools to perform such functions as screwing or disconnecting, and only without irreversibly destroying the unit.

[IEC Guide 114:2005, definition 3.7]^[5]

3.1.10**matrix**

material or substance and its form or state in which analyte is embedded or to which analyte is attached

3.1.11**performance-based measurement system****PBMS**

set of processes wherein the data needs, mandates or limitations of a program or project are specified, serving as criteria for selecting appropriate methods to meet those needs in a cost-effective manner

NOTE The criteria may be published in regulations, technical guidance documents, permits, work plans or enforcement orders.

3.1.12**reference material**

material or substance, one or more of whose property values are sufficiently homogeneous and well established to be used for the calibration of an apparatus, the assessment of a measurement method or for assigning values to materials

[ISO Guide 30, modified]

3.2 Abbreviations

AAS	Atomic absorption spectrometry
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene
AFS	Atomic fluorescence spectrometry
ASTM	American Society for Testing and Materials
BCR	Community Bureau of Reference (BCR : <i>Bureau Communautaire de Référence</i>)
BL	Below limit
BSA	N,O-bis(trimethylsilyl) acetamide
BSTFA	N,O-bis(trimethylsilyl)-trifluoroacetamide
CCC	Continuing calibration check standard
CCFL	Cold cathode fluorescent lamp
CFR	Code of Federal Regulations
CRM	Certified reference material
CV-AAS	Cold vapour atomic absorption spectrometry
CV-AFS	Cold vapour atomic fluorescence spectrometry
DBOFB	4,4'-dibromooctafluorobiphenyl
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMDCS	Dimethyldichlorosilane in dichloromethane
EC	European Community

EDXRF	Energy dispersive X-ray fluorescence
EI	Electron ionization
EN	European norm
EPA	Environmental Protection Agency
EVAC	Ethylene vinyl acetate
FEP	Perfluoro(ethylene-propylene)
FP	Fundamental parameters
FRU	Field replaceable unit
GC	Gas chromatography
GC-MS	Gas chromatography – mass spectrometry
GLP	Good laboratory practice
HPLC-UV	High-performance liquid chromatography – ultraviolet
ICP-MS	Inductively coupled plasma mass spectrometry
ICP-OES	Inductively coupled plasma optical emission spectrometry
IS	Internal standard
IIS	International interlaboratory study
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
JIS	Japanese Industrial Standard
LN	Liquid nitrogen
LOD	Limit of detection
LOQ	Limit of quantification
MDL	Method detection limit
NIST	National Institute of Standards and Technology
NMIJ	National Metrology Institute of Japan
OctaBB	Octabromobiphenyl
OctaBDE	Octabromodiphenyl ether
OL	Over limit
PAS	Publicly Available Specification
PBB	Polybrominated biphenyl
PBDE	Polybrominated diphenyl ether
PBMS	Performance-based measurement system
PC	Polycarbonate
PE	Polyethylene
PE-HD	High-density polyethylene
PFA	Perfluoro alkoxyl alkane resin
PS-HI	High-impact polystyrene
PTFE	Polytetrafluoroethylene
PTV	Programmable temperature vaporization
PVC	Polyvinyl chloride
PWB	Printed wiring board
QA	Quality assurance
QC	Quality control
RH	Relative humidity

RSD	Relative standard deviation
SIM	Single (or “selected”) ion monitoring
SOP	Standard Operating Procedure
SRM	Standard reference material
TFM	Tetrafluoroethylene modified
US	United States
WC	Tungsten carbide
WDXRF	Wavelength dispersive X-ray fluorescence
XRF	X-ray fluorescence

4 Test methods – Overview

4.1 Field of application

The contents of the test methods to determine the levels of regulated substances are grouped in two important steps:

- Analytical test methods
- Laboratory implementation

Analytical test methods were developed and validated to ensure their suitability to the task. They are divided into five main parts:

- Overview
- Apparatus/equipment and materials
- Reagents
- Sample preparation
- Test method, which includes:
 - calibration;
 - instrument performance;
 - sample analysis;
 - calculation of analytical results;
 - test report;
 - quality control.

Descriptions of individual test methods follow this outline.

Laboratory implementation is not covered in this standard, as laboratories are able to implement test methods described using test methods and standards addressed in other sources. The implementation step includes suitable quality assurance measures and a validation protocol that documents the performance of the analytical method using the instruments in the laboratory. Quality assurance systems such as good laboratory practice (GLP) and/or accreditation to similar international or national systems (e.g. ISO 17025) are strongly encouraged.

4.2 Sample

This standard refers to the sample as the object to be processed and measured according to the test methods to determine the levels of the regulated substances. A sample can either be a polymer, a metal or electronics.

What the sample is or how to get to the sample shall be defined with respect to applicable normative documents by the entity carrying out the test methods.

NOTE The entity can be either the organization commissioning the work or the organization carrying out the work. In practice the requestor and the analyst will probably agree on the sample to be taken.

The entity may decide to prepare a sample that is a homogenous material. For this kind of sample, the test methods applicable to metals or polymers are especially suitable.

The entity may also decide to prepare a sample which is an electronic component, an electronic assembly or a field replaceable unit (FRU). For this kind of sample, the test methods applicable to electronics are especially suitable.

The methods to obtain the sample are outside the scope of this standard. Further guidance may be found in the future IEC Publicly Available Specification (PAS) for sample disjointment.

4.3 Test methods – Flow chart

Figure 1 gives a flow chart of the test methods to determine the levels of regulated substances in electrotechnical products.

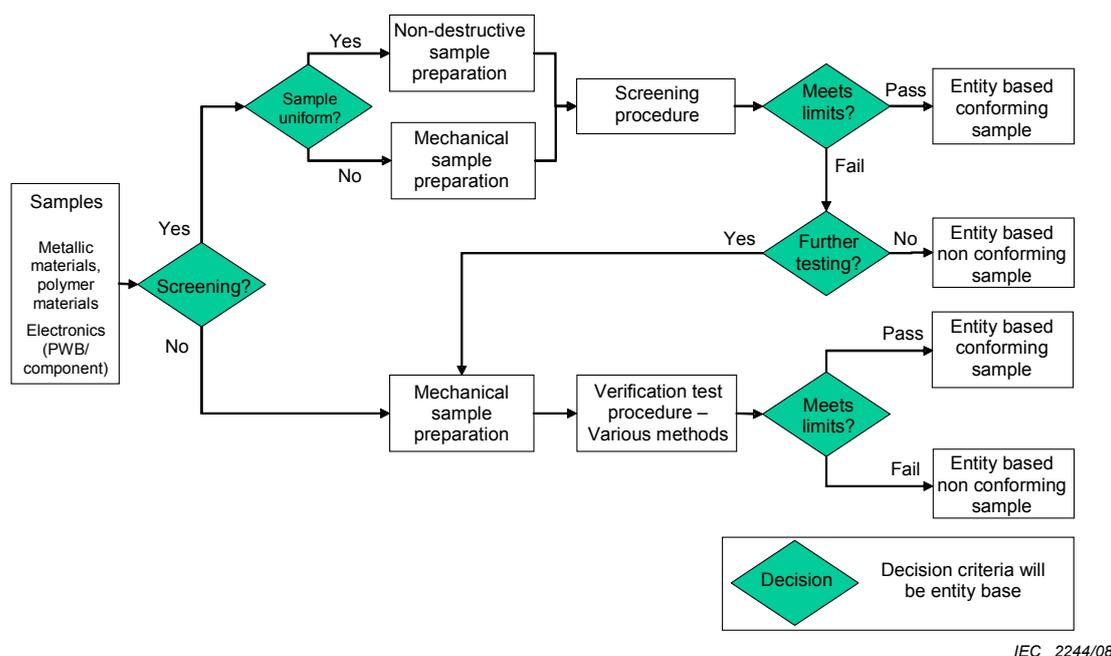


Figure 1 – Flow chart of the test methods

After obtaining the sample, which is either a polymer, a metal or electronics (e.g. in the form of electronic components, electronic assemblies or FRUs), a decision is taken as to whether the screening procedure or the verification procedure using a variety of test methods will be used.

The screening procedure may be carried out either by directly measuring the sample (non-destructive sample preparation) or by destroying the sample to make it uniform (mechanical sample preparation). This decision shall be made by judging the uniformity of the sample. A screening of representative samples of many uniform materials (such as polymers, alloys, glass) may be done non-destructively, while for other more complex samples (such as a FRU), mechanical sample preparation may be an appropriate solution. Mechanical sample preparation is the same for both the screening and the verification test procedure. The procedure for mechanical sample preparation is described in Clause 5.

A sample is screened using any XRF spectrometer (e.g. EDXRF (energy dispersive X-ray fluorescence) or WDXRF (wavelength dispersive X-ray fluorescence) spectrometer, providing it has the performance characteristics described in Clause 6. The screening procedure shall be performed under controlled conditions. There are limitations on the use of the XRF analysis technique and the applicability of the results obtained, although its speed and resource efficiency has its merits, particularly in meeting the demands of the electrotechnical industry.

The verification procedure is performed after mechanical sample preparation using a variety of test methods tailored to the regulated substances and the sample, which can be a polymer, a metal or electronics. Table 1 gives an overview of the verification methods, which are described in detail in Clauses 7 to 10 and in Annexes A, B and C. The purpose of using a particular verification test method is to ensure the most accurate results possible, although it will most likely require more resources to carry out.

Table 1 – Overview of the content of the verification procedure

Steps	Substances	Polymers	Metals	Electronics (PWBs/components)
Mechanical sample preparation (see Clause 5)		Direct measurement Grinding	Direct measurement Grinding	Grinding
Chemical sample preparation		Microwave digestion Acid digestion Dry ashing Solvent extraction	Microwave digestion Acid digestion	Microwave digestion Acid digestion Solvent extraction
Analytical technique definition (including typical margins of error)	PBB/PBDE	GC-MS (see Annex A)	NA	GC-MS (see Annex A)
	Cr(VI)	Alkaline digestion/ colorimetric method (see Annex C)	Spot-test procedure/ boiling water extraction procedure (see Annex B)	Alkaline digestion/ colorimetric method (see Annex C)
	Hg	CV-AAS, CV-AFS, ICP-OES, ICP-MS (see Clause 7)		
	Pb/Cd	ICP-OES, ICP-MS, AAS (see Clause 8)	ICP-OES, ICP-MS, AAS (see Clause 9)	ICP-OES, ICP-MS, AAS (see Clause 10)

After the verification procedure has been carried out, it shall be decided whether the sample meets the limits based on the entity's criteria for regulated substances.

4.4 Adjustment to the matrix

Test methods for regulated substances that are present at relatively low levels amongst other chemical elements or compounds at relatively high concentrations, or those that represent the major constituent of the sample, are very often material or matrix dependent. Therefore the test methods shall be adjusted to the materials to be tested, either by introducing the appropriate blanks and matrix-adjusted calibration samples, or by a preparation step that separates the analyte from the adherent materials or the main matrix. The main material types (or matrices) in electronic equipment are polymers (mostly technical polymers containing additives and sometimes having coated surfaces), metals or alloys (they may also be coated) and electronics.

4.5 Limits of detection (LOD) and limits of quantification (LOQ)

In its simplest form, a limit of detection (LOD) or method detection limit (MDL) is typically described as the lowest amount or concentration of analyte in a test sample that can be reliably differentiated from zero for a given measurement system.

Instrument detection limits represent an instrument's ability to differentiate low concentrations of analytes from "zero" in a blank or standard solution, and are commonly used by manufacturers to demonstrate the measurement capability of a system (e.g. atomic absorption spectrometer). Whilst instrument detection limits are useful, they are often considerably lower than a limit of detection representing a complete analytical method measurement process.

Complete analytical method detection limits are most appropriately determined experimentally by performing replicate, independent measurements on low-level or fortified sample matrices (e.g. plastic) carried out through the entire test procedure, including sample digestion or extraction. A minimum of six replicates and analyte concentrations of 3 to 5 times the estimated method detection limit have been suggested as suitable for this analysis. The complete method detection limit for an entire test procedure is determined by multiplying the standard deviation of the replicates by an appropriate factor. The International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) recommends a factor of 3 for a minimum of six replicates, while the United States Environmental Protection Agency (US EPA) utilizes a one-sided confidence interval with the multiplier equal to Student's *t* value chosen for the number of replicates and the level of confidence (viz. $t = 3,36$ for six replicates for 99 % confidence).

The limit of quantification (LOQ) or estimated quantitation limit for a given measurement system is typically described as the lowest concentration that can be reliably determined within specified or acceptable limits of precision during routine laboratory operating conditions. The acceptable precision limit is often defined as 10 % relative standard deviation or simply expressed as a fixed multiple (2 to 10) of the method detection limit.

4.6 Test report

The work carried out by the testing laboratory shall be covered by a report that accurately, clearly and unambiguously presents the test results and other relevant information. Each test report shall include at least the following information:

- 1) Name, address and location of any laboratory involved in the analysis and name of the operator.
- 2) Date of receipt of sample and date(s) of performance of test(s).
- 3) Unique identification of report (such as a serial number) and of each page and total number of pages of the report.
- 4) Description and identification of the sample, including a description of any product disassembly performed to acquire the test sample.
- 5) A reference to this standard, the method used or performance-based equivalent (including digestion method(s) and equipment).
- 6) The limit of detection (LOD) or limit of quantification (LOQ).
- 7) The results of the test expressed as milligrams/kilogram (mg/kg) in samples tested.
- 8) Any details not specified in this standard which are optional, and any other factors that may have affected the results. Any deviation, by agreement or otherwise, from the test procedure specified here.

The results of all quality control (QC) tests (e.g. results from method blanks, matrix spikes, etc.) and a list of reference materials used and their origin shall be available upon request.

Corrections or additions to a test report after issuance shall be made only in a further document suitably marked, e.g. "Amendment/Addendum to test report serial number XXX" (or as otherwise identified), and shall meet the relevant requirements of 4.2 to 4.6).

4.7 Alternative test methods

Alternative test methods, digestion methods or analytical techniques may be utilized once the performance effectiveness has been validated according to the performance-based measurement system (PBMS) criteria, referenced in the quality control clauses of the test

methods. Any deviation from the described test methods shall be evaluated and documented in the test report.

5 Mechanical sample preparation

5.1 Overview

5.1.1 Field of application

This clause describes common techniques for mechanical size reduction of electrotechnical products, their sub-units or portions thereof, prior to analysis for regulated substances. The test method clauses in this standard have requirements for sample handling and preparation in specific situations. This clause provides general guidance on processing selected portions of an item. The user may elect to apply one or more of the approaches described in this clause to create samples to be submitted for testing. Selection of the appropriate technique(s) depends on the required particle size for the test method to be used. Alternative methods of mechanical sample preparation can be used provided that the required particle size of the sample is achieved without contaminating or compromising the sample with regulated substances.

5.1.2 Quality assurance

Due to the risk of analytical bias resulting from contamination, evaporation of volatile components (e.g. volatilisation due to heat) or from loss of material through dust emissions, it is important to select the appropriate equipment and cleaning procedures.

Contamination can be caused by the grinding equipment and any accessories that contact the sample. For the chosen equipment, it shall be known which elements may be released that will contaminate the analysis sample, e.g. cobalt (Co) and tungsten (W) can be released from tungsten carbide (WC) equipment, and chromium (Cr), nickel (Ni), molybdenum (Mo) and vanadium (V) can be released from stainless steel equipment.

The laboratory shall demonstrate by experiment that a mechanical process does not result in contamination by or loss of detectable amounts of regulated substances. The laboratory shall demonstrate by experiment that the procedure employed for cleaning the mechanical sample preparation equipment prevents contamination of the sample with regulated substances from the previous sample.

This can be demonstrated by processing and analysing certified reference materials and blanks before or after processing a material known to contain significant levels of regulated substances. Certified reference materials are not mandatory. The materials used shall have a known regulated substance content to determine that the mechanical grinding/milling/cutting processes do not cause contamination or loss of regulated substances. The effectiveness of the mechanical sample preparation procedure can be continuously monitored by using quality control practices, including matrix spikes or control samples.

5.2 Apparatus, equipment and materials

The following apparatus, equipment and materials are required:

- a) Coarse grinding or cutting mill with 4 mm and 1 mm or similar stainless steel bottom sieve.
- b) Centrifugal mill with 25 µm tungsten carbide-coated (WC) steel sieve, and a 6-fold WC-coated rotor (for uniform plastic material a 1 mm steel sieve is appropriate). To avoid the risk of introducing impurities during milling, a 1 mm titanium sieve and a steel/titanium sieve rotor shall be used.
- c) "Freezer" bladeless cryogenic impact grinder/mill with self-contained LN₂ tub, insulated case, speed control, programmable timer and safety interlock.
- d) Homogenizing mixer (e.g. blender).

- e) Analytical balance capable of weighing accurately to 0,000 1 g.
- f) Brushes (different sizes).
- g) Paper.
- h) Scissors, heavy plate shears.
- i) Glass beaker.
- j) Liquid nitrogen (LN₂).
NOTE Liquid nitrogen is quite volatile and can cause oxygen deficiency in the area of use, especially if the area is enclosed. The laboratory is responsible for ensuring that the proper safety procedures are followed, and that protective equipment is used during cryogenic grinding.
- k) Powder funnel.
- l) Gloves.
- m) Safety glasses.
- n) Polyethylene receptacle (for use with LN₂).

5.3 Procedure

5.3.1 Manual cutting

Manual cutting is suitable for rough cutting and preparation of samples for further reduction. Recommended maximum sample sizes are listed below, but will depend on the specification of the equipment used in the subsequent preparation processes.

- a) Electronics: Samples are pre-cut to a size of 40 mm × 40 mm using heavy plate shears (5.2 h).
- b) Metal sheeting: Samples are pre-cut to a size of 40 mm × 40 mm using heavy plate shears (5.2 h).
- c) Polymers: Samples are pre-cut to a size of 5 mm × 5 mm using heavy plate shears or scissors (5.2 h). Thin polymer foil shall be cut into small pieces with shears (5.2 h).

5.3.2 Coarse grinding/milling

Coarse grinding is suitable for reducing samples to approximately 1 mm in diameter. Cool the samples if needed with the LN₂ (5.2.j). For organic samples, cryogenic milling is recommended. An example of cryogenic preparation is to put the samples in a polyethylene receptacle (5.2.n) to cool with LN₂ (5.2.j). Wait until the LN₂ (5.2) has dissipated, plus an additional 10 min thereafter. Grind the samples in the mill (5.2.c) using a 4 mm stainless steel bottom sieve. During grinding, maintain a sample temperature of <−20 °C. Carefully sweep out and collect all particles. Refit the mill (5.2.c) with a pre-weighed 1 mm stainless steel bottom sieve and reprocess the 4 mm material. Carefully sweep out the mill (5.2.c) and collect all particles. Use a 5 min cooling period between grinding cycles.

NOTE It may only be possible to mill metallic materials to a particle size of 4 mm (although 1 mm particles are preferred).

5.3.3 Homogenizing

Homogenizing is suitable for preparing the coarsely ground sample in the mixer prior to further size reduction in the centrifugal mill (5.2.b). Use a container with double the capacity of the amount of powder to be mixed. Set the mixer to its medium speed and mix the powder until it is homogeneous.

5.3.4 Fine grinding/milling

Fine grinding or milling is suitable for reducing samples to <1 mm in diameter. Cool the homogenized sample powder with LN₂ (5.2.j) if needed. For organic samples that have no metal parts, cryogenic milling is recommended. Be careful not to allow the LN₂ (5.2.j) to come into direct contact with the powder in order to prevent spattering and sample loss, e.g. by using a polyethylene receptacle (5.2.n). Mill the sample powder with the centrifugal mill

(5.2.b). Carefully sweep out the centrifugal mill (5.2.n) and collect all the powder. The collected material may be sieved to obtain a sufficiently homogeneous portion of known particle size range.

5.3.5 Very fine grinding of polymers and organic materials

This procedure is suitable for the reduction of samples as small as 500 µm in diameter or less. It is not suitable for metal, glass or similar hard and sharp materials. Approximately 3 g to 10 g of rough-cut (3 mm to 5 mm sections) is placed in the sample vial so that it is about two-thirds to three-quarters full. Add the grinding rod and secure the ends of the vial. Cool the bladeless cryogenic impact grinder (5.2.c) at room temperature for 15 min by filling the reservoir with LN₂ (5.2.j). Place the grinding vials with the samples in the mill (5.2.c) and lock the cover into place. One or more sieves may be added to ensure a sufficiently homogeneous sample.

6 Screening by X-ray fluorescence spectrometry (XRF)

6.1 Overview

This test method describes procedures for the screening analysis of five substances, specifically lead (Pb), mercury (Hg), cadmium (Cd), total chromium (Cr) and bromine (Br) in uniform materials found in electrotechnical products, using the analytical technique of X-ray fluorescence (XRF) spectrometry. It is applicable to polymers, metals and ceramic materials. The test method may be applied to raw materials, individual materials taken from products and “homogenized” mixtures of more than one material. Screening of a sample is performed using any type of XRF spectrometer, providing it has the performance characteristics specified in this test method. Not all types of XRF spectrometers are suitable for all sizes and shapes of sample. Care shall be taken to select the appropriate spectrometer design for the task concerned.

This test method is designed specifically to screen for Pb, Hg, Cd, Cr, Br in uniform materials, which occur in most electrotechnical products. Under typical circumstances, XRF spectrometry provides information on the total quantity of each element present in the sample, but does not identify compounds or valence states of the elements. Therefore, special attention shall be paid when screening for chromium and bromine, where the result will reflect only the total chromium and total bromine present. The presence of Cr(VI) or the brominated flame retardants PBB or PBDE shall be verified by another test method as per Table 1.

When applying this method to electronics “as received”, which, by the nature of their design, are not uniform, care shall be taken in interpreting the results. Similarly, the analysis of Cr in conversion coatings may be difficult due to the presence of Cr in substrate material and/or because of insufficient sensitivity for Cr in typically very thin (several hundred nm) conversion coating layers.

XRF spectrometers can be calibrated to cover a range of mass fractions from the limit of detection in a particular matrix to 100 % composition by mass. XRF spectrometry is a comparative technique; its performance depends on the quality of calibration, which in turn, depends on the quality of the calibrants and the model used to represent the response of the instrument. XRF analysis is subject to matrix effects (absorption and enhancement) as well as spectral interferences.

The performance of this test method has been tested for the following substances in various media and within the concentration ranges as specified in Tables 2 to 6.

Table 2 – Tested concentration ranges for lead in materials

Substance/element	Lead							
Parameter	Unit of measure	Medium/material tested						
		ABS	PE	Low-alloy steel	Al-Si alloy	Tin-based alloy	Glass	Ground PWB
Concentration or concentration range tested	mg/kg	109 to 184	14 to 108	30	190 to 930	174	240 000	22 000 to 23 000

Table 3 – Tested concentration ranges for mercury in materials

Substance/element	Mercury		
Parameter	Unit of measure	Medium/material tested	
		ABS	PE
Concentration or concentration range tested	mg/kg	100 to 940	4 to 25

Table 4 – Tested concentration ranges for cadmium in materials

Substance/element	Cadmium			
Parameter	Unit of measure	Medium/material tested		
		Tin-based alloy	ABS	PE
Concentration or concentration range tested	mg/kg	3	11 to 107	22 to 141

Table 5 – Tested concentration ranges for total chromium in materials

Substance/element	Chromium					
Parameter	Unit of measure	Medium/material tested				
		ABS	PE	Low-alloy steel	Al-Si alloy	Glass
Concentration or concentration range tested	mg/kg	28 to 270	18 to 115	240	130 to 1 100	94

Table 6 – Tested concentration ranges for bromine in materials

Substance/element	Bromine			
Parameter	Unit of measure	Medium/material tested		
		PS-HI, ABS	PC/ABS	PE
Concentration or concentration range tested	mg/kg	99 138 to 118 400	800 to 2 400	98 to 808

These substances in similar media outside of the specified concentration ranges may be analysed according to this test method; however, the performance has not been established for this standard.

There are two principal calibration methods in XRF spectrometry:

- A universal calibration can be performed using fundamental parameters (FP) approaches. FP approaches can be calibrated with pure elements or compounds or with a small

number of reference materials with well defined matrix compositions. As with all XRF calibrations, accuracy can be expected to improve when the calibrants are increasingly similar to the samples.

- An empirical calibration can be created using reference materials in combination with a calibration algorithm capable of correcting for the matrix and spectral interferences. In principle, an empirical calibration is valid only for the specific material matrix for which it was created, with multiple calibrations needed for analyses of multiple matrices. However, for the purposes of the screening test, it may be possible to apply the same empirical calibration for materials of similar matrices. The calibrants shall cover the entire range of each element in the matrix. If a potential interfering element is not included in the calibration model, its presence in a sample may cause a significant bias. Due to the limited availability of calibrants, i.e. reference materials, it is a complex or often impossible task to include all possible matrix and spectral interferences in a method while maintaining optimum accuracy.

For coated materials and multilayered structures, accurate results cannot be obtained without prior knowledge of the layered structure and the use of a calibration model that accounts for the structure of the sample. In the case of a coating or thin layer, special care shall be taken to ensure that the XRF spectrometer has sufficient sensitivity to detect the small quantity of substance in the layer. Shall the sensitivity of the XRF spectrometer be insufficient to measure the regulated substance directly in the coating, one may resort to physical removal of coating layer from the substrate to accumulate enough material for analysis.

Screening analysis can be carried out by one of two means:

- Non-destructively – by directly analysing the sample “as received”.
- Destructively – by applying one or more mechanical or chemical sample preparation steps prior to analysis.

In the latter case the user shall apply the procedure for sample preparation as described in Clause 5. This test method will guide the user in choosing the proper approach to sample presentation.

6.1.1 Principle

To achieve its purpose, this test method shall provide rapid, unambiguous identification of the elements of interest. The test method shall provide at least a level of accuracy that is sometimes described as semi-quantitative, i.e. the relative uncertainty of a result is typically 30 % or better at a defined level of confidence of 68 %. Some users may tolerate higher relative uncertainty, depending on their needs. This level of performance allows the user to sort materials for additional testing. The overall goal is to obtain information for risk management purposes.

This test method is designed to allow XRF spectrometers of all designs, complexity and capability to contribute screening analyses. However, the capabilities of different XRF spectrometers cover such a wide range that some will be relatively inadequate in their selectivity and sensitivity while others will be more than adequate. Some spectrometers will allow easy measurement of a wide range of sample shapes and sizes, while others, especially research-grade WDXRF units, will be very inflexible in terms of test portions.

Given the above level of required performance and the wide variety of XRF spectrometers capable of contributing useful measurements, the requirements for the specification of procedures are considerably lower than for a high-performance test method for quantitative determinations with low estimates of uncertainty.

This test method is based on the concept of performance-based methods. Apparatus, sample preparation and calibration are specified in this standard in relatively general terms. It is the responsibility of the user to document all procedures developed in the laboratory that uses the test method. The user shall establish a written procedure for all cases denoted in this method by the term “work instructions”.

This method carefully stipulates spectrometer and method performance parameters that shall be documented by the user.

6.1.2 Warnings

WARNING 1 Persons using the XRF test method shall be trained in the use of XRF spectrometers and have a working knowledge of the technique and sampling requirements.

WARNING 2 X-rays are hazardous to humans. Care shall be taken to operate the equipment in accordance with both the safety instructions provided by the manufacturer and the applicable local health and occupational safety regulations.

6.2 Apparatus, equipment and materials

6.2.1 XRF spectrometer

An XRF spectrometer consists of an X-ray excitation source, a means of reproducible sample presentation, an X-ray detector, a data processor and a control system.

- a) Source of X-ray excitation – X-ray tube or radioisotope sources are commonly used.
- b) X-ray detector (detection subsystem) – Device used to convert the energy of an X-ray photon to a corresponding electric pulse of amplitude proportional to the photon energy.

6.2.2 Materials and tools

Materials used in the preparation of samples for XRF measurements shall be shown to be free of contamination, specifically by the analytes of this test method. This means that all grinding materials, solvents, fluxes, etc. shall not contain detectable quantities of Pb, Hg, Cd, Cr and/or Br.

Tools used in the handling of samples shall be chosen to minimize contamination by the analytes of this test method as well as by any other elements. Any procedures used to clean the tools shall not introduce contaminants.

6.3 Reagents

Reagents shall not contain detectable quantities of Pb, Hg, Cd, Cr and/or Br.

6.4 Sampling

It is the responsibility of the user of this test method to define the test sample using documented work instructions. The user may choose to define the test sample in a number of ways, either via a non-destructive approach in which the portion to be measured is defined by the viewing area of the spectrometer, or by a destructive approach in which the portion to be measured is removed from the larger body of material and either measured as is or destroyed and prepared using a defined procedure.

6.4.1 Non-destructive approach

The user of this test method shall:

- a) Establish the area viewed by the spectrometer and place the test sample within that area, taking care to ascertain that no fluorescent X-rays will be detected from materials other than the defined test portion. Usually, the area viewed by spectrometer is delineated by the shape and boundary of the measuring window of the instrument.
- b) Make every effort to establish repeatable measurement geometry with a repeatable distance between the spectrometer and the test portion.

- c) Take all practical steps to identify a test portion with as regular shape as possible, taking into consideration flatness across the entire area, surface roughness and known physical structure.
- d) Document steps taken to disassemble a larger object to obtain a test portion.

6.4.2 Destructive approach

The following points shall be taken into account in the destructive approach:

- a) The user shall create and follow a documented work instruction for the means of destruction applied to obtain the test portion as this information is critical for correct interpretation of the measurement results.
- b) A procedure that results in a powder shall produce a material with a known or controlled particle size. In cases where the particles have different chemical, phase or mineralogical compositions, it is critical to reduce their sizes sufficiently to minimize differential absorption effects.
- c) In a procedure that results in a material being dissolved in a liquid matrix, the quantity and physical characteristics of the material to be dissolved shall be controlled and documented. The resulting solution shall be completely homogeneous. Instructions shall be provided to deal with undissolved portions to ensure proper interpretation of the measured results. Instructions shall be provided for presentation of the test portion of the solution to the X-ray spectrometer in a repeatable manner, i.e. in a liquid cell of specified construction and dimensions.
- d) In a procedure that results in a sample material being fused or pressed in a solid matrix, the quantity and physical characteristics of the sample material shall be controlled and documented. The resulting solid (fused or pressed pellet) shall be completely uniform. Instructions shall be provided to deal with unmixed portions to ensure proper interpretation of the measured results.

6.5 Procedure

6.5.1 General

The test procedure covers preparation of the X-ray spectrometer, preparation and mounting of test portions and calibration. Certain instructions are presented in general terms due to the wide range of XRF equipment and the even greater variety of laboratory and test samples to which this test method will be applied. However, a cardinal rule that applies without exception to all spectrometers and analytical methods must be followed; that is that the calibration and sample measurements must be performed under the same conditions and using the same sample preparation procedures.

In view of the wide range of XRF spectrometer designs and the concomitant range of detection capabilities, it is important to understand the limitation of the chosen instrument. Certain designs may be incapable of detecting or accurately determining the composition of a very small area or very thin samples. As a consequence, it is imperative that users carefully establish and clearly document the performance of the test method as implemented in their laboratories. One goal is to prevent false negative test results.

6.5.2 Preparation of the spectrometer

Prepare the spectrometer as follows:

- a) Switch on the instrument and prepare it for operation according to the manufacturer's manual. Allow the instrument to stabilize as per guidelines established by the manufacturer or laboratory work instructions.
- b) Set the measurement conditions to the optimum conditions previously established by the manufacturer or the laboratory.

NOTE Many instruments available on the market are already optimized and preset for a particular application, and therefore this step might not be necessary. Otherwise, the laboratory should establish optimum operating conditions for each calibration. Choices should be made to optimize sensitivity and minimize spectral interferences.

Excitation conditions may vary by material, analyte and X-ray line energy. A list of recommended analytical X-ray lines is given in Table 7. Detection system settings should optimize the compromise between sensitivity and resolution. Guidance can usually be found in the instrument manual and in literature on X-ray spectrometry.

Table 7 – Recommended X-ray lines for individual analytes

Analyte	Preferred line	Secondary line
Lead (Pb)	$L_2-M_4 (L\beta_1)$	$L_3-M_{4,5} (L\alpha_{1,2})$
Mercury (Hg)	$L_3-M_{4,5} (L\alpha_{1,2})$	
Cadmium (Cd)	$K-L_{2,3} (K\alpha_{1,2})$	
Chromium (Cr)	$K-L_{2,3} (K\alpha_{1,2})$	
Bromine (Br)	$K-L_{2,3} (K\alpha_{1,2})$	$K-M_{2,3} (K\beta_{1,3})$

NOTE 1 Other X-ray line choices may provide adequate performance. However, when deciding on alternative analytical lines one should be aware of possible spectral interferences from other elements present in the sample (e.g. BrK α on PbL α or AsK α on PbL α lines; see D.1b) for more typical examples).

NOTE 2 $K-L_{2,3} (K\alpha_{1,2})$ means that there are actually two transitions to the K shell, i.e. one from the L_2 shell which generates $K\alpha_2$ X-rays and another from the L_3 shell that generates $K\alpha_1$ X-rays. However, since both energies are very close, energy dispersive spectrometers cannot distinguish them and so they are analysed as one combined $K\alpha_{1,2}$ energy.

6.5.3 Test portion

The creation of a test portion is described in 6.4.

In the case of destructive sample preparation, measure the mass and dimensions of the test portion as required by the calibration method and the work instruction established by the laboratory to ensure repeatable sampling.

6.5.4 Verification of spectrometer performance

Spectrometer performance shall be verified as follows:

- a) Users shall provide objective evidence of the performance of the method as implemented in their laboratories. This is necessary to enable the users and their customers to understand the limitations of the method and to make decisions using the results of analyses. Critical aspects regarding the performance of the method are as follows:
 - spectrometer performance:
 - sensitivity for each analyte,
 - spectral resolution,
 - limit of detection,
 - demonstration of measured area,
 - repeatability of sample preparation and measurement,
 - accuracy of calibration, which will be checked according to 6.8.

Given the variety of spectrometers and the associated software operating systems, it is acceptable for the users to obtain this information in their own laboratory using their own procedures or as a service provided by the manufacturer. It is important to obtain verification of spectrometer and method performance when the method is implemented. Evidence of the maintenance of performance may be obtained through the use of control charts or by repeating the measurements and calculations made on implementation.

- b) Spectrometer sensitivity is used as a figure of merit to compare spectrometers and to ensure that a meaningful calibration is possible.
- c) Spectral resolution is important to ensure that the analyte and interfering spectral lines are handled correctly in the collection of data and in the calibration. For the purposes of this standard, the correction of line overlaps is considered as part of the spectrometer calibration.

- d) The limit of detection, LOD, shall be estimated for each set of operating conditions employed in the test method using Equation (1) below:

$$\text{LOD} = 3\sigma \quad (1)$$

where

LOD is the limit of detection (LOD) expressed in units of concentration;

σ is the standard deviation of the results of multiple determinations using a blank material. Standard deviation is usually estimated using a small (but not less than seven) number of determinations, in which case the symbol, s (the unbiased estimate of standard deviation, σ) is substituted for σ .

NOTE The limit of detection is a critical parameter that tells the user whether the spectrometer is being operated under conditions that allow the detection of an analyte at levels sufficiently below the allowed substance limits to be useful for making decisions. Limit of detection is a function of the measurement process of which the material is a significant part. If the measurement process changes when the material is changed, the limits of detection may also change. For optimum performance, the limit of detection should be equal to or less than 30 % of the laboratory's own action limits established to provide maximum acceptable risk of non-compliance.

- e) Demonstration of the measured area is important to ensure that the viewed area is known for the spectrometer equipped with any accessories that define X-ray beam size, shape and location. In many cases, the beam size, shape and location define the test portion. The laboratory or the manufacturer shall provide a means to define the beam size and shape and identify its location on the test portion.
- f) Repeatability of sample preparation and measurement is an important parameter to demonstrate that the test method has statistical control. If destructive sample preparation precedes the measurement, the repeatability shall be tested, including sample preparation, otherwise repeatability of the measurement shall be tested on the same sample. Repeatability is expressed as the standard deviation of at least seven measurements of a prepared sample using the optimum spectrometer operating conditions. Repeatability shall be measured for each analyte in a test portion containing a concentration of the analyte greater than five times the limit of detection estimated in 6.5.4.

6.5.5 Tests

Place the test portion in the correct position for measurement with the XRF spectrometer. If necessary, establish the required atmosphere in the chamber of the spectrometer and allow it to stabilize.

NOTE The measurements are typically made in an air atmosphere. However, should there be a need to measure light elements such as S, Al, etc., it may be advantageous to measure in a vacuum or helium (A.3.b) atmosphere.

Measure the test portion by collecting sufficient numbers of X-ray counts to attain a counting statistical uncertainty less than the established relative standard deviation for measurement repeatability (see 6.5.4). The settings of the XRF spectrometer for analysis of the test portion shall be identical to those used for calibration measurements.

6.5.6 Calibration

The analytical method shall be calibrated taking into account matrix effects and other effects that influence the determination of the intensity of the fluorescence radiation. A list of these effects is given in Annex D.

There are two principal calibration options in XRF spectrometry:

- Fundamental parameters approaches employing a range of calibrants:
 - pure elements and pure compounds, or
 - synthetic mixtures prepared from pure substances, or
 - individual reference materials representing each material to be analysed.
- Empirical (traditional) calibration using a model based on influence coefficients obtained

- using empirical data from a suite of calibrants similar to the unknowns, or
- using a fundamental parameters approach.

Follow the guidelines in the manufacturer's manual when selecting the calibration options available in the operating system software.

Depending on the instrument, the user may or may not be required to perform the calibration. There are commercially available instruments which are already optimized, calibrated and preset for specific applications. These instruments do not require calibration by the analyst.

The choice of calibrants depends in part on the choice of calibration model. For empirical options, the calibrants shall be similar in matrix composition to the materials to be analysed. In the set of calibrants, element concentrations shall cover the range of concentration expected in the samples and they shall vary independently of one another. If the calibration covers many elements in a wide range of concentrations, a large number of calibration samples may be necessary. The minimum number of calibrants for an empirical method is $2(n+2)$, where n = the number of analytes.

A fundamental parameters calibration approach can significantly reduce the number of calibration samples. Fundamental parameters software allows the user to calibrate the sensitivity of each element using pure elements and compounds. As an alternative to pure calibrants, the software will typically allow the use of a small number of reference materials more similar to the samples. Enhancements of the method include the use of scattered radiation to correct for certain matrix or sample morphology effects.

6.6 Calculations

The following calculations shall be performed as necessary when using this test method:

- a) In contemporary instruments the calculations are typically performed automatically by the spectrometer operating system software. If calculations are to be done by hand, the algorithms and all the parameters shall be specified in the work instructions for the test method. Calculate the result for each analyte, in per cent by mass, in each test portion using the calibration model established for the sample type.
- b) If the test portion has been prepared by dilution, calculate the result on the basis of the original test sample using the appropriate dilution factor.

Estimate the uncertainty of the results using one of the following methods and compare the result to the maximum allowed concentration of the analyte in the material.

- c) The preferred method is to create an uncertainty budget for each calibration implemented in the test method. The uncertainty budget shall be compliant with ISO/IEC Guide 98. Express the expanded uncertainty estimate at the 95 % confidence level.

NOTE 1 It is an oversimplification to assign the uncertainty as some multiple of the repeatability standard deviation of replicate determinations. Under certain circumstances, XRF measurements can be exceedingly precise, leading to an estimated uncertainty that is too small to cover all sources of error. This approach ignores important contributions from the calibrants, the mathematical model used to fit the calibration curve and the potential for the introduction of bias during sample preparation. Moreover, the definition of an uncertainty budget is beyond the scope of this standard.

- d) This method recognizes that it may be impractical or impossible to perform a proper uncertainty budget. Therefore, as an alternative, choose a safety factor greater than or equal to the expected expanded uncertainty for each analyte at the level of the maximum allowed concentration. It has been agreed, for the purpose of this test method, that it is suitable to assume a relative uncertainty of 30 % in a result obtained for a sample containing the maximum allowed value for the element in the material in question. In practice, this assumption can be used to define a confidence interval around the maximum allowed concentration value, which can be used for the purpose of making decisions regarding the need for additional testing.

NOTE 2 The use of a safety factor is an over-simplification due in part to the fact that, in most cases, relative uncertainty is a function of concentration. Typically, relative uncertainty increases rapidly as the analyte concentration decreases. The analyst is cautioned not to interpret the 30 % safety factor as a relative uncertainty

of results of determinations. The analyst is also cautioned to re-evaluate the safety factor if the detection limit is greater than 20 % relative to the maximum allowed concentration, or if the maximum allowed concentration is reduced by the regulating authority.

6.7 Evaluation of the method

The detailed summary results for each substance and material tested using XRF are listed in Tables D.3 to D.7 (see Annex D). Only these results shall be a basis for any conclusions about the method performance.

The following general conclusions can be made, based on the results summarized in the tables and the analysis of data from the IIS2. The summary conclusions of this method performance for each tested substance and material are given in the following subclauses:

- a) Evaluation of the results and method performance can only be fragmentary because of the shortage of CRMs to fully cover the required ranges of concentrations and types of materials.
- b) Due to the limited amounts of available CRMs, not all laboratories tested all samples; consequently, the results are not always directly comparable.
- c) The samples were analysed “as received”, that is no sample preparation was involved.
- d) Precisions reported by individual laboratories for individual results were typically at much less than 5 % relative standard deviation (RSD).
- e) The participating laboratories used various calibration methods, such as empirical, Compton normalization and methods based on fundamental parameters.
- f) It is imperative that the method performance be further researched and tested during interlaboratory studies.

6.7.1 Lead

The average inaccuracy of Pb determination in polymers above a level of 100 mg/kg was better than ± 13 % relative and the imprecision was better than ± 19 % relative. At a Pb concentration of 10 mg/kg, the inaccuracy and imprecision were ± 30 % relative and ± 70 % relative, respectively. In Al alloys, the inaccuracy and imprecision were less than ± 10 % relative and ± 25 % relative, respectively. A Pb concentration of 174 mg/kg in tin-based alloy produced inconclusive results ranging from 60 mg/kg to 380 mg/kg. 30 mg/kg of Pb in an alloy steel was not detected.

The results for ground PWBs point to possible non-homogeneity of the material as the source of great imprecision and inaccuracy of the results.

6.7.2 Mercury

The average inaccuracy of Hg determination in polymers at or below 1 000 mg/kg was better than ± 10 % relative, while the imprecision was better than ± 25 % relative. No alloy material was tested for Hg.

6.7.3 Cadmium

The average inaccuracy of Cd determination in polymers at or above 100 mg/kg was ± 10 % relative, and the imprecision was better than ± 15 % relative. At a level of 20 mg/kg Cd, the inaccuracy varied from ± 10 % to ± 50 % relative, and the imprecision varied from 20 % to 100 % relative. A level of 3,3 mg/kg of Cd in tin-based alloy was not detected by any instrument.

6.7.4 Chromium

The average inaccuracy of total Cr determination in polymers at or below 115 mg/kg was observed to be better than 17 % relative while the imprecision was about ± 30 % relative. For a similar concentration level in glass, the inaccuracy and imprecision for total Cr were better

than $\pm 20\%$ relative and 35% relative respectively. In aluminium alloys at $1\ 100\text{ mg/kg}$ Cr, the inaccuracy and imprecision were $\pm 10\%$ relative and better than $\pm 41\%$ relative, respectively. A Cr concentration of about 100 mg/kg in Al alloy was not detected.

6.7.5 Bromine

Based on the CRMs, the average inaccuracy of determination of total Br concentration in polymers at or below $1\ 000\text{ mg/kg}$ was better than $\pm 10\%$ relative, and the standard deviation was better than $\pm 13\%$ relative. At elevated Br concentrations of 10% , inaccuracy was better than $\pm 25\%$ relative and imprecision was about $\pm 30\%$ relative. These latter results reflect the inadequacy of empirical calibrations for high Br concentrations.

Generally, the inaccuracy and imprecision of analysis for all of the five elements were better than $\pm 20\%$ relative for concentrations above 100 mg/kg in polymers and aluminium alloys.

6.8 Quality control

6.8.1 Accuracy of calibration

The following steps shall be taken to validate the accuracy of calibration:

- a) The accuracy of each calibration shall be validated by analysing one or more reference materials representative of each material used in the implementation of this test method. Analyte concentration levels in the reference materials shall be within one order of magnitude of the maximum allowed values for the analyte in the material. Ideally, reference materials will be available to bracket the maximum allowed values.
- b) Results of measurements of the reference materials shall be calculated and expressed according to 6.6, including an estimate of uncertainty.
- c) Apply a bias test to the results and the certified or reference values assigned to the reference materials. The bias test shall take into account the uncertainty of an assigned value.

NOTE For guidance on bias tests, refer to the National Institute of Standards and Technology Special Publication 829^[6] or similar documents.

- d) If a bias is detected, correct the calibration and repeat the determinations.

6.8.2 Control samples

Control samples shall be prepared and used as follows:

- a) Designate a quantity of stable material as the control sample for each calibration. Preferably, this shall be a solid in the form of a disc (pellet).
- b) Prepare a test portion of the control sample and subject it to testing using each of the calibrations as soon as they have been validated. Do this at least four times. Calculate the average and standard deviation and use these values to establish a control chart for each analyte in each calibration. Control samples may be created by the analysts. Some instrument manufacturers provide control sample(s) with their equipment.
- c) At appropriate time intervals, prepare a test portion of the control sample and subject it to testing using each of the calibrations implemented in the test method. Compare the results to the control chart limits. If the results violate accepted rules for control, troubleshoot the test methods, correct the problem and perform a test on a new control sample.

6.9 Special cases

6.9.1 Presentation of a sample for measurement

The procedure for presentation of a sample for measurement is as follows:

- a) If the measurement is to be performed on an instrument with an analysis chamber, a section including the sample to be measured shall be placed inside the sample chamber of the X-ray fluorescence spectrometer. The total sample shall be mounted in such a way that the target sample can be properly located in the measuring position. If the sample does not fit properly in the chamber, it shall be cut to the appropriate size for measurement.
- b) If the measurement is performed with a portable hand-held XRF analyser, care shall be taken to ensure that the measuring aperture covers the section to be examined.
- c) Analysis of samples which are not flat or large enough to cover the measuring aperture of the spectrometer (such as small screws) may be handled by certain fundamental parameters methods which are designed to compensate the results for oddly shaped samples. In such a case, and following the manufacturer's recommendations, the analyst shall carefully position one or more of the items in the proper holder prior to measurement and shall obtain an estimate of the composition using the software tools provided by the method.
- d) The analysis of thin samples is complicated by the dependence of measured count rates on the analyte concentration in the sample and on sample thickness. The analyst shall be aware of the structure and composition of the item within the measured area.

6.9.2 Uniformity of the sample

Uniformity, from the point of view of XRF analysis, depends on the physical uniformity of the composition of the tested material within the volume of material irradiated by the instrument during the test. One or more of the following three categories may apply when determining the uniformity of the sample:

- a) Large surface area samples (applies to all samples):

The assessment of uniformity of the tested material for the purposes of XRF analysis is made by visual inspection and with the aid of any additional information. For example, any object that appears uniform in colour, shape and appearance is most likely uniform, and would not require mechanical destruction before analysis. Typical examples may be large, extended plastic objects such as plastic enclosures, thick tape, metal alloys, etc. Any additional information about the tested object shall be used to establish its uniformity. For example, many plastic enclosures, and even more so metal enclosures, are painted. Plastic enclosures may be metallized, often on the inside. In such cases the test shall be performed on an unpainted or a non-metallized fragment, which may require some degree of disassembly, although not the destruction, of the object. Metal parts may be plated with another metal, such as zinc on steel, Cd on steel, or Cr on steel and Al. These will be indicated by relatively very high readings of plating metals, with the possible exception of Cr, as Cr coatings are typically very thin. All coatings shall be removed when attempting to analyse the base material.

- b) Small area samples:

Small individual electronic parts or segments may be analysed in situ without the need for separation, as long as an instrument is used that has sufficient lateral and depth resolution to probe only the intended material without spill-over into adjacent areas. The sample shall appear uniform, such as plastic encapsulation, individual soldering lead or isolated areas of polymer/epoxy. Special care shall be taken to avoid the complications of interference by metal plating, polymer coating or paint when analysing the base material. Any coatings shall be physically removed.

- c) Coatings and thin samples:

Samples that are too small or very thin may easily violate the condition of minimum sample thickness or mass required for the results to be valid. In such instances, a number of small objects of the same kind (for example small screws) shall be placed in a sample cup and only then analysed. Similarly, thin samples of the same kind shall be stacked in a pile thick enough to fulfil the minimum sample thickness criterion and analysed accordingly. As a general rule, all samples shall completely cover the measuring window/area of the spectrometer. The sample shall have a minimum thickness of 5 mm in the case of polymers and light alloys such as Al, Mg or Ti, 15 mm in the case of liquids and about 1 mm for all other alloys.

These rules may not apply if the analytical software of the instrument allows effective correction of results for variable thickness, shape and size of analysed samples.

The insulation on thin wires and ribbon cables may not be treated as uniform and shall be measured by extracting the metal conductor first. On the other hand, almost all power cords of a diameter larger than 5 mm with copper wiring inside may be treated as uniform for the purpose of insulation analysis. The metal may also be analysed after separation. Some metal coatings may be analysed if the user knows the construction of the material, and the spectrometer is calibrated to analyse such a complex layer system. For example, the coating is known to be SnAgCu (tin-silver-copper alloy) (plated over) copper (plated over) epoxy. The tin alloy may be analysed, provided the instrument is calibrated for this specific sample type. It is commonly accepted that most XRF instruments will not detect, with sufficient sensitivity, Cr in conversion coatings unless they are at least a few hundred nanometres in thickness. Due to variations of the required sample size from instrument to instrument, the operator of the spectrometer is advised always to consult the instrument manual or manufacturer to know the requirements of minimum size/mass/thickness conditions of the sample.

- d) The numerical screening limits listed (see Table D.2) may not be appropriate to determine regulatory compliance of all possible samples, particularly if the sample is a composite of different product materials. This may especially be the case for samples that have been blended into a “homogenized” state, or for small amounts of homogeneous material such as thin coatings. This method refers to uniformity for the sake of accurate XRF analysis and does not attempt to make a “legal” determination of sampling requirements.
- e) Summary:
The tested object may be considered as uniform and analysed non-destructively if
- it is not painted or plated and appears to the naked eye to be the same colour and consistency throughout,
 - it is not otherwise known to be non-uniform in its construction or design,
 - the top layer of a thin coating can be analysed separately from the base material in a known matrix only, and the instrument is calibrated for this known matrix.
- f) When using any XRF instrument, it is recommended that the object be tested in more than one area if the design allows. Any statistically significant differences between the measurements may indicate possible non-uniformity. If in doubt as to the uniformity of the tested material, a destructive analysis is recommended.

7 Determination of mercury in polymers, metals and electronics by CV-AAS, CV-AFS, ICP-OES and ICP-MS

7.1 Overview

This clause describes the test method for the determination of mercury (Hg) in materials used in electrotechnical products. These materials are polymers, metals and electronics (e.g. printed wiring boards, cold cathode fluorescent lamps, Hg switches). Batteries containing Hg shall be handled as described in ^[22]. The interlaboratory study has only evaluated these test methods for plastics, other matrices have not been covered.

The clause describes the use of four methods, namely CV-AAS (cold vapour atomic absorption spectrometry), CV-AFS (cold vapour atomic fluorescence spectrometry) ICP-OES (inductively coupled plasma optical emission spectrometry), and ICP-MS (inductively coupled plasma mass spectrometry) and several procedures for preparing the sample solution from which the most appropriate method of analysis can be selected by experts. CV-AAS is the preferred method due to its sensitivity and ease of use.

Analysis by CV-AAS, CV-AFS, ICP-OES and ICP-MS allows the determination of the target element, Hg, with high precision (uncertainty in the low per cent range) and/or high sensitivity (down to the µg/kg level). The test procedures described in this clause are intended to provide the highest level of accuracy and precision for concentrations of mercury in the range from 4 mg/kg to 1 000 mg/kg. The procedures are not limited for higher concentrations.

An appropriate mass of cryogenically milled and homogenized sample is digested in a concentrated acid solution under fixed temperature or pressure conditions. After digestion, the sample solution shall be stored at 4 °C to minimize evaporation. For longer-term storage of Hg, it is recommended that the solutions be spiked with 1 to 2 drops of potassium permanganate solution.

Finally, in the digestion solution obtained, Hg is determined by CV-AAS, CV-AFS, ICP-OES or ICP-MS. For ICP-OES, and ICP-MS, the digestion solution may be analysed without any further preparation. When using CV-AAS and CV-AFS, the Hg is reduced to the elemental state before it is analysed.

The samples for analysis have to be mechanically pre-prepared before chemical digestion. In order to fulfil the minimum requirements for an accurate analysis, the maximum particle size and minimum amounts of sample shall be given in the test report. It is highly likely that after digestion, solid residues will be present. It shall be ensured that no target elements are included in these residues. This standard strongly recommends the use of a heating digester, equipped not only with vessels and reflux coolers, but also with absorption vessels or a microwave digestion system. This sophisticated equipment avoids losses of high-volatile Hg. Nevertheless, if the user can ensure the suitability of a simpler approach, it may be applied. Any deviation from the described procedures shall be evaluated and documented in the test report.

This procedure is recommended for use by laboratory assistants and/or technicians working under the close supervision of chemists experienced in the sample preparation requirements for inorganic analyses, and by chemists working independently.

The following points shall be taken into account:

- Many Hg compounds are highly toxic if swallowed, inhaled or absorbed through the skin. Extreme care shall be exercised in the handling of concentrated Hg reagents. Because of the risk of Hg in some laboratory environments, all lab ware and sample collection tools shall be stored in a clean, Hg-free environment.
- All operations prior to instrument analysis shall be carried out in the fume hood.
- A condenser shall be used to prevent volatilization under the test conditions.
- The microwave oven shall be operated strictly according to the supplier's instructions.

7.2 Apparatus, equipment and materials

In general, the collection and storage of glassware are a critical part of Hg analysis, regardless of the type of sample to be analysed. Because of the sensitivity of the Hg analysis techniques described, each individual sampling step shall be carried out with great care. All sampling, storage and manipulation apparatus shall be Hg-free. Soak all glassware in 50 % (m/m) nitric acid (7.3.c) for 24 h at room temperature, and then rinse thoroughly with water (7.3.a).

The following equipment shall be used:

- a) Analytical balance capable of measuring accurately to 0,000 1 g.

For wet digestion as described in 7.4.2:

- b) Heating digester equipped with reaction vessels, reflux coolers and absorption vessels (for the digestion of metals and electronics);
- c) Glass fibre filter 0,45 µm.

For microwave digestion as described in 7.4.3:

- d) Microwave sample preparation system equipped with a sample holder and high-pressure polytetrafluoroethylene/tetrafluoroethylene modified (PTFE/TFM) or perfluoro alkoxy

alkane resin/tetrafluoroethylene modified (PFA/TFM) or other vessels based on fluorocarbon materials (for the digestion of metals containing significant amounts of silicon (Si), zirconium (Zr), hafnium (Hf), titanium (Ti), tantalum (Ta), niobium (Nb) or tungsten (W), and for plastics);

- e) Glass microfibre filter (borosilicate glass), pore size: 0,45 µm and a suitable filter cup.
- f) Volumetric flasks such as 25 ml, 250 ml, etc. (PTFE-PFA equipment or glassware). Where appropriate, other types of volumetric equipment with acceptable precision and accuracy can be used as alternatives to volumetric flasks.
- g) Pipettes such as 1 ml, 2 ml, 5 ml, 10 ml, etc. (PTFE-PFA equipment or glassware).
- h) Micropipettes such as 200 µl, 500 µl, 1 000 µl, etc.
- i) Plastic containers for standards and digestion solutions.
- j) Cold vapour atomic absorption spectrometer (CV-AAS).
- k) Cold vapour atomic fluorescence spectrometer (CV-AFS).
- l) Inductively coupled plasma optical atomic emission spectrometer (ICP-OES).
- m) Inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS).
- n) Argon gas with a purity of at least 99,99 % (v/v).

7.3 Reagents

For the determination of elements at trace level, the reagents shall be of adequate purity. Contamination can be a major source of error when working in the 1 ng range with the instruments. Cautious handling of the apparatus and careful technique will minimize this problem. Therefore, only grade 1 water (7.3.a) shall be used. Care shall be taken that all materials in contact with the water are Hg-free.

Chemicals used for sample preparation can be a major source of contamination. Only reagents that are Hg-free shall be used. It is therefore highly recommended that the blank values of the reducing agents and the other chemicals be measured before using them for sample preparation. Beakers, pipettes volumetric flasks, etc. are all major sources of metal contamination. It is essential to use Hg-free plastic or quartz glassware for sample handling.

For measurements by ICP-OES and ICP-MS, the memory effect occurs in cases where high concentrations of Hg are introduced. Dilution of the sample solution is required for high levels of Hg. If the memory effect is not decreased by dilution, thorough washing of the equipment is required.

- a) Water: Grade 1, as specified in ISO 3696, shall be used for preparation and dilution of all sample solutions.
- b) Nitric acid (concentrated nitric acid): $\rho(\text{HNO}_3) = 1,4 \text{ g/ml}$, 65 % (m/m), “trace metal” grade.
- c) Nitric acid, 50 % (m/m), “trace metal” grade.
- d) Nitric acid, 0,5 mol/l, “trace metal” grade.
- e) Nitric acid, 1 % (m/m), “trace metal” grade.
- f) Nitric acid, 1,5 % (m/m), “trace metal” grade.
- g) Nitric acid, 5 % (m/m) “trace metal” grade.
- h) Fluoroboric acid: HBF_4 , 50 % (m/m), “trace metal” grade (for microwave digestion).
- i) Hydrogen peroxide: H_2O_2 , 30 % (m/m), “trace metal” grade (for microwave digestion).
- j) Standard solution with 1 000 mg/ml of Hg, “trace metal” grade.
- k) Potassium tetrahydridoborate (potassium borohydride): KBH_4 , “trace metal” grade.
- l) Potassium permanganate: KMnO_4 , 5 % solution (m/v), “trace metal” grade. Dissolve 5 g of potassium permanganate in 100 ml of water (7.3.a).
- m) Sodium tetrahydridoborate (sodium borohydride), NaBH_4 , “trace metal” grade.

- n) Sodium hydroxide, NaOH (“trace metal” grade).
- o) Internal standard solution, “trace metal” grade:
- Internal standard elements that do not interfere with the target element are used for ICP-OES and ICP-MS. Also, the presence of these internal standard elements in the sample solution shall be at negligible levels. Sc, In, Tb, Lu, Re, Rh, Bi and Y may be used as internal standard elements.
 - For use with ICP-OES, Sc or Y are recommended. The recommended concentration is 1 000 mg/l.
 - For use with ICP-MS, Rh is recommended. The recommended concentration is 1 000 µg/l.
- p) Reducing agent for CV-AAS: 3 % (m/v) NaBH₄ in 1 % (m/v) NaOH.
- Add approximately 800 ml of water (7.3.a) to a 1 l volumetric flask, followed by the addition of 10,0 g sodium hydroxide (7.3.n). Add 30,0 g of sodium tetrahydridoborate powder (7.3.m), stir until dissolved, fill up to the mark with water (7.3.a) and filter. Prepare daily.

NOTE 1 A reductant solution containing sodium tetrahydridoborate in a sodium hydroxide solution is recommended. If the available Hg hydride system cannot deal with this reductant, tin (II) chloride can be used instead. The instructions given in the operator’s manual for the instrument should be followed.

- q) Reducing agent for CV-AFS: 1 % (m/v) KBH₄ in 0,05 % (m/v) NaOH.
- Add approximately 800 ml of water (7.3.a) to a 1 l volumetric flask followed by the addition of 0,50 g sodium hydroxide (7.3.n). Add 10,0 g of potassium tetrahydridoborate 7.3.k), stir until dissolved, fill up to the mark with water (7.3.a) and filter. Prepare daily.

NOTE 2 A reductant solution containing potassium tetrahydridoborate in a sodium hydroxide solution is recommended. If the available Hg hydride system cannot deal with this reductant, tin (II) chloride can be used instead. The instructions given in the operator’s manual for the instrument should be followed

7.4 Sample preparation

7.4.1 Test portion

The different test methods, which can be used as alternatives according to this standard, need different amounts of sample to obtain the required quality of results.

In the case of electronics, the sample shall first be destroyed mechanically by appropriate means (e.g. grinding, milling, mill cutting) before chemical dissolution of the powder can start. To ensure representative sample taking at this stage, a certain particle size as a function of the starting amount of sample is required (see Clause 5).

Cold cathode fluorescent lamps (CCFL) and samples containing liquid Hg shall be frozen and then crushed before they can be handled as described in this clause. It is recommended that the instructions of California EPA SOP No. 914-S^[21] be followed.

For the determination of Hg in single-ended fluorescent lamps (compact fluorescent lamps), follow the instructions given in Annex E of 2002/747/EC^[20].

For (longer) double-ended fluorescent lamps, freezing of the complete lamp is almost impossible. In this case, a procedure is given in JEL303-2004, 4.1.3.1 ff^[19].

The resulting concentrated solutions may be measured directly by ICP-OES and ICP-MS, i.e. the digestion solution may be analysed without any further sample preparation. By using CV-AAS and CV-AFS, the Hg is reduced to its elemental state before it is analysed.

7.4.2 Wet digestion (digestion of electronics)

Wet digestion is recommended for the digestion of metals and electronics, with the exception of metals containing significant amounts of Si, Zr, Hf, Ti, Ta, Nb or W. For these materials and for polymers, microwave digestion, as described in 7.4.3, is recommended.

- a) A sample of approximately 1 g is weighed into the reaction vessel and 30 ml concentrated nitric acid (7.3.b) is added. (When the available sample amount is 500 mg or less, follow the instructions given in 7.4.3).

The vessel is equipped with a reflux cooler and an absorption vessel (on top of the reflux cooler - see Figure E.1 in Annex E) containing 10 ml of 0,5 mol/l nitric acid (7.3 d). Then a temperature program is started to digest the samples for 1 h at room temperature and for 2 h at 90 °C.

After cooling to room temperature, the contents of the absorption tube are placed in the reaction vessel and the solution obtained is transferred to a 250 ml volumetric flask and filled with 5 % (m/m) nitric acid (7.3.g) to the mark (if the sample is digested completely).

- b) For ICP-OES and ICP-MS measurements, the sample solution obtained may be diluted with water (7.3.a) to the appropriate concentration levels for measurements. Add 250 µl of internal standard (7.3.o) for a volume of 250 ml before filling to the mark.
- c) If the sample is not completely digested (e.g. printed wiring boards), the sample is filtered with a filter (7.2.c) and the solid residue is washed four times with 15 ml of 5 % (m/m) nitric acid (7.3.g). The solution obtained is transferred to a 250 ml volumetric flask and filled with 5 % (m/m) nitric acid (7.3.g) to the mark.
- d) Any sample residues shall be separated by a centrifuge or a filter. The residues shall be tested by appropriate measurements (e.g. XRF) to confirm the absence of target elements.

7.4.3 Microwave digestion

Microwave digestion is recommended for the following materials:

- Metals containing significant amounts of Si, Zr, Hf, Ti, Ta, Nb or W.
- Polymers.
- In cases where the available sample amount is smaller than 0,5 g.

NOTE 1 It is highly recommended that the same sample amounts and the same type of samples be weighed in one digestion run.

NOTE 2 Hg can be determined in the same solution with Pb and Cd obtained in a closed system for acid decomposition described in Clauses 8 to 10.

- a) Weigh about 100 mg of the material into a PTFE-TFM or PFA-TFM vessel. Add 5 ml of concentrated nitric acid (7.3.b), 1,5 ml 50 % (m/m) HBF_4 solution (7.3.h), 1,5 ml 30 % (m/m) H_2O_2 (7.3.i) and 1 ml water (7.3.a). Close the vessel and digest the sample in the microwave oven following a digestion program specified in advance. An example of a suitable microwave program is given in Annex E.
- b) After cooling the vessel to room temperature (approximate required time: 1 h), it is opened and the solution is filtered with filter (7.2.e) into a 25 ml flask, washed and filled to the mark with water (7.2.a).
- c) Any sample residues shall be separated by a centrifuge or filter. The residues shall be checked by appropriate measurements (e.g. XRF) to confirm the absence of target elements.

NOTE 3 If HBF_4 is not available in sufficient purity, HF may be used as an alternative.

7.4.4 Preparation of laboratory reagent blank

The procedure is identical to sample preparation and is carried out concurrently without the sample.

7.5 Test procedure

7.5.1 Preparation of calibrant solutions

All analyses require that a calibration curve be prepared to cover the appropriate concentration range. Calibrants are prepared by diluting the stock metal solution (7.3.j) with

1,5 % (m/m) nitric acid (7.3.f). When internal standard methods (ICP-OES and ICP-MS) are used, the appropriate amounts of solution for the internal standard solutions (7.3.o) are added.

Prepare a reagent blank of 1,5 % (m/m) nitric acid (7.3.f) and at least three calibrants in graduated amounts in the appropriate range of the linear part of the calibration curve.

Standards shall be stored in Hg-free plastic containers. The standard solution (7.3 j) is usually stable for at least a year, whereas standard solutions shall be prepared daily.

The stability of Hg standard solutions can be severely affected by adsorption on the walls of the storage vessel. Therefore, it is recommended that Hg standard solutions be stabilized by the addition of a few drops of 5 % (m/m) KMnO_4 (7.3.l) solution.

NOTE A 1 % (m/v) gold (Au) solution can also be used instead of potassium permanganate.

7.5.2 Development of the calibration curve

The spectrometers are prepared for quantification with a reagent blank and a minimum of three standards.

a) CV-AAS

- The readings for the absorbance of the target element Hg are determined. The calibration curve obtained shows the relationship between the absorbance of Hg and its concentration.
- The recommended wavelength and examples of workable instrument parameters are listed in Annex E.

b) CV-AFS

- The readings for the fluorescence intensity of the target element Hg are determined. The calibration curve obtained shows the relationship between the fluorescence intensity of Hg and its concentration.
- The recommended wavelength and examples of workable instrument parameters are listed in Annex E.

c) ICP-OES

- The readings for the emission intensity of the target element Hg and those of the internal standard are determined. The calibration curve obtained shows the relationship between the ratio of emission intensities of Hg and those of the internal standard to the concentration of Hg.
- The recommended wavelength for Hg and examples of workable instrument parameters are listed in Annex E.

d) ICP-MS

- The readings for the mass/charge (m/z) intensity of the target element Hg and those of the internal standard are determined. The calibration curve obtained shows the relationship between the ratio of the m/z of Hg and that of the internal standard, and the concentration of Hg.
- The recommended m/z ratios for Hg and examples of workable instrument parameters are listed in Annex E.

A straight-line regression curve with a correlation (R^2) not less than $<0,998$ shall be used for initial calibration. In the event the check standard result (e.g. standard substance, calibrant etc.) differs from the expected value by more than 20 %, the calibration and all samples in the sequence shall be re-measured.

7.5.3 Measurement of the sample

After development of the calibration curve, the laboratory reagent blank and the sample solution are measured. If the sample concentration is above the range of the concentration curve, the solution shall be diluted with 1 % (m/m) nitric acid (7.3.e) to the range of the calibration curve and measured again.

Measurement precision is checked with a standard substance, calibration solution, etc. at regular intervals (such as once every 10 samples). If necessary, a calibration curve is developed again.

NOTE If the sample is diluted to the range of calibration, it should be ensured that the internal standard concentration in the diluted sample solution is adjusted to the standard solution.

7.5.4 Calculation

The concentration measured in 7.5.3 is the concentration of Hg in the sample solution. The concentration of Hg in the sample is calculated from the following equation:

$$c = \frac{(A_1 - A_2)}{m} \times V \quad (2)$$

where

c is the concentration of Hg in the sample in $\mu\text{g/g}$;

A_1 is the concentration of Hg in the sample solution in mg/l ;

A_2 is the concentration of Hg in the laboratory reagent blank in mg/l ;

V is the total volume for the sample solution in ml which depends on

- the type of digestion carried out (250 ml for wet digestion, 25 ml for microwave digestion),
- the type of the particular series of dilutions used;

m is the measured quantity of the sample in g.

7.6 Evaluation of the method

Volunteer laboratories chosen by IEC TC111 WG3 participated in an international interlaboratory study (IIS2) to determine whether the procedures provided were yielding replicable (and reliable) results. To sum up, four certified reference materials were given to different laboratories to determine the Hg values. The ratio between the assigned (or certified) values and the determined values was between 90 % and 97 %. Detailed results are listed in Table 8. Remarks on the limits of detection and the limits of quantification are given in Clause 4.

Table 8 – Mean results and recovery rates of mercury obtained in the IIS2 study

Number	Sample description	Certified value of Hg mg/kg	Mean result of Hg mg/kg	Standard deviation mg/kg	Recovery rate %	Range of recovery rate %	Number of data sets used
IIS2-C10	EC 680 (polyethylene)	25,3	24,6	3,7	97	83 - 119	5 Three replicates each
IIS2-C11	EC 681 (polyethylene)	4,5	4,4	0,4	97	84 - 106	5 Three replicates each; one outlier eliminated
IIS2-C12	NMIJ CRM 8112-a (acrylonitrile butadiene styrene)	100	90	6	90	83 - 99	9 Three replicates each; three outliers eliminated
IIS2-C13	NMIJ CRM 8113-a (acrylonitrile butadiene styrene)	941,5	893,0	53	95	89 - 103	9 Three replicates each; three outliers eliminated

NOTE A data set was specified as an outlier when the recovery rate of the data set obtained was lower than 50 % or higher than 200 %.

8 Determination of lead and cadmium in polymers by ICP-OES, ICP-MS and AAS

8.1 Overview

This clause specifies the procedure for the determination of elemental lead (Pb) and elemental cadmium (Cd) in polymers from electrotechnical products. Three methods are described (ICP-OES, ICP-MS and AAS) as well as several procedures for preparation of the chemical sample, i.e. the sample solution from which the most appropriate method of analysis can be selected by the experts.

The test procedures described in this clause are intended to provide the highest level of accuracy and precision for concentrations of the regulated substances that range, in the case of ICP-OES and AAS, from 10 mg/kg for Pb and Cd and, in the case of ICP-MS, from 0,1 mg/kg for Pb and Cd. The procedures are not limited for higher concentrations.

The samples are pre-cut and/or milled to an appropriate size for the method selected according to the procedure described in Clause 5. Depending on the particular method of preparing the test solution, sample amounts may vary, as described in detail in this clause. The test solution may be prepared by dry ashing or by sample digestion with acids such as nitric acid or sulfuric acid. Acid digestion can be carried out in a closed system using a microwave digestion vessel. Depending on the presence of particular elements, the details of the approach to digestion varies – procedures are given in this clause. Information on the presence of these elements may have been gained from previous screening experiments (see Clause 6). Finally, in the digestion solution obtained, Pb and Cd are determined by ICP-OES, ICP-MS or by AAS.

The analysis by ICP-OES, ICP-MS or AAS generally allows determination of the target elements with high precision (uncertainty in the low per cent range) and/or high sensitivity (down to the µg/kg level). There are some limitations: the procedure does not apply to materials containing polyfluorinated polymers because of their stability. If sulfuric acid must

be used in the analytical procedure, there is a risk of losing Pb, thus resulting in erroneously low values for this analyte. The use of appropriate, sophisticated equipment, i.e. a microwave digestion system is strongly advised. However, if the experts can ensure their suitability, simpler alternatives may be used, e.g. the addition of boric acid instead of using an HF-resistant sample holder. Frequently occurring spectral interferences are given in Table F.1.

Limitations and risks occur due to the solution step of the sample, e.g. precipitation of the target or other elements may occur, in which case the residues have to be checked separately or dissolved by another method and then combined with the test sample solution.

For the results of the evaluation of the methods see 8.6.

The work according to this standard involves the use of toxic and hazardous substances. Detailed warnings are given below.

8.2 Apparatus, equipment and materials

The following items shall be used for the analysis:

- a) ICP-OES: equipment consisting of sample holder, plasma torch, spray chamber, nebulizer, optical unit, detector, system control and data output device.
- b) ICP-MS: equipment consisting of sample holder, plasma torch, spray chamber, nebulizer, interface, mass separator unit, system control and data output device.
- c) AAS: apparatus consisting of a sample holder, nebulizer/burner system with air/acetylene burner head, radiation source lamps, detector, data processor and control system.
- d) Analytical balance: capable of measuring accurately to 0,000 1 g.
- e) HF-resistant sample introduction system: system in which the sample insertion section and torch have been treated for resistance to HF.
- f) Argon gas: gas with purity of over 99,99 % (v/v).
- g) Acetylene gas: gas with purity of over 99,99 % (v/v).
- h) Glassware: all glassware shall be cleaned with 10 % (m/m) nitric acid before use:
 - 1) Kjeldahl flask: 100 ml;
 - 2) Beakers: such as 100 ml, 200 ml, etc.;
 - 3) Volumetric flasks: such as 50 ml, 100 ml, 200 ml etc.;Where appropriate, other types of volumetric equipment with acceptable precision and accuracy can be used as an alternative to volumetric flasks.
 - 4) Pipettes: such as 1 ml, 5 ml, 10 ml, 20 ml, etc.;
 - 5) Funnel;
 - 6) Watch glass;
- i) Crucibles of platinum: such as 50 ml, 150 ml, etc.
- j) Crucibles of porcelain: such as 50 ml, 150 ml, etc.
- k) PTFE/PFA equipment (polytetrafluoroethylene (PTFE)/perfluoro alkoxy alkane resin (PFA): all equipment shall be cleaned with 10 % (m/m) nitric acid (8.3 d) before use:
 - 1) Beakers: such as 100 ml, 200 ml, etc.;
 - 2) Volumetric flasks: such as 100 ml, 200 ml, 500 ml, etc.
- l) Micropipettes: such as 10 µl, 100 µl, 200 µl, etc.
- m) Containers: for storage of standard solution and calibrant.
- n) Containers made of high-density polyethylene (PE-HD) shall be used for ordinary measurement of element concentration. For determination at the ultra-trace level, containers made of perfluoro alkoxy alkane resin (PFA) or perfluoro (ethylene-propylene)

plastic (FEP) shall be used. In either case, the user shall confirm the suitability of the container selected.

- o) Electric hot plate or heated sand bath.
- p) Muffle furnace: capable of being maintained at $550\text{ °C} \pm 25\text{ °C}$.
- q) Bunsen burner or similar type of gas burner.
- r) Microwave digestion system equipped with a sample holder and high-pressure polytetrafluoroethylene/tetrafluoroethylene modified (PTFE/TFM) or perfluoro alkoxy alkane resin/tetrafluoroethylene modified (PFA/TFM) or other vessels based on fluorocarbon materials.

NOTE There are many safety and operational recommendations specific to the model and manufacturer of the microwave equipment used in individual laboratories. The analyst is required to consult the specific equipment manual, manufacturer and literature for proper and safe operation of the microwave equipment and vessels.

- s) PTFE microwave digestion vessel: such as 100 ml, etc.
- t) Heat-resistant thermal insulation board.
- u) Paper filter.

8.3 Reagents

For the determination of elements at trace level, the reagent shall be of adequate purity. The concentration of the analyte or interfering substances in the reagents and water shall be negligible compared to the lowest concentration to be determined.

All reagents for ICP-MS analysis, including acids or chemicals used shall be of high-purity: trace metals shall be less than $1 \times 10^{-6}\%$ (m/m) in total.

- a) Water: Grade 1 specified in ISO 3696 used for preparation and dilution of all sample solutions.
- b) Sulfuric acid: $\rho(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1,84\text{ g/ml}$, 95 % (m/m), “trace metal” grade.
- c) Nitric acid: $\rho(\text{HNO}_3) = 1,40\text{ g/ml}$, 65 % (m/m), “trace metal” grade.
- d) Nitric acid, 10 % (m/m) (“trace metal” grade).
- e) Hydrogen peroxide: $\rho(\text{H}_2\text{O}_2) = 1,10\text{ g/ml}$, 30 % (m/m), “trace metal” grade.
- f) Hydrochloric acid: $\rho(\text{HCl}) = 1,19\text{ g/ml}$, 37 % (m/m), “trace metal” grade.
- g) Hydrofluoric acid: $\rho(\text{HF}) = 1,18\text{ g/ml}$, 40 % (m/m), “trace metal” grade.
- h) Boric acid (HBO_3), 5 % (m/m) (50 mg/ml), “trace metal” grade.
- i) Certified standard solution with 1 000 mg/kg of Pb.
- j) Certified standard solution with 1 000 mg/kg of Cd.
- k) Certified internal standard solution.
 - Internal standard elements that do not interfere with the target element shall be used. Moreover, the presence of these internal standard elements in the sample solution shall be at negligible levels. Sc, In, Tb, Lu, Re, Rh, Bi and Y may be used as internal standard elements.
 - For use with ICP-OES, Sc or Y is recommended, for use with ICP-MS, Rh is recommended. The concentration used shall be 1 000 mg/kg.

NOTE 1 The toxicity of each reagent listed under b) to j) in this method has not been precisely defined; however, each chemical compound should be treated as a potential health hazard. From this viewpoint, exposure to these chemicals at the lowest possible level by whatever means available is recommended.

NOTE 2 Preparation methods involve the use of strong acids, which are corrosive and cause burns. Laboratory coats, gloves and safety glasses should be worn when handling acids.

NOTE 3 Nitric acid gives off toxic fumes. Always carry out digestion in a fume cupboard, and also when adding acid to samples because of the possibility of toxic gases being released.

NOTE 4 The exhaust gases from the plasma should be ducted away by an efficient fume extraction system.

NOTE 5 Special precautionary measures should be taken when hydrofluoric acid is used, i.e. HF antidote gel (2,5 % calcium gluconate in a water-soluble gel) for first aid treatment of HF burns on the skin.

8.4 Sample preparation

8.4.1 Test portion

The different analytical procedures which can be used as alternatives, according to this standard, need different amounts of sample to obtain the required quality of results. Generally it is advisable to start with the highest amount of sample suitable for the chosen procedure. Some general considerations about limitations and risks have been given in 8.1.

For acid digestion, 400 mg of sample that has been ground, milled or cut is measured accurately to the 0,1 mg level. For the dry ashing method, or for the closed system for acid decomposition, 200 mg of sample that has been ground, milled or cut is measured accurately to the 0,1 mg level.

8.4.2 Preparation of test solution

8.4.2.1 Dry ashing method

If the sample does not contain halogen compounds (information may be available from previous screening experiments), the following steps shall be carried out:

- a) Measure the sample into a crucible (8.2.j) mounted in the hole in the heat-resistant thermal insulation board (8.2.t).
- b) Heat the crucible (8.2.j) gently with the burner (8.2.q) in a hood for proper ventilation, taking care that the sample does not ignite.
- c) When the sample has decomposed to a charred mass, heating is gradually increased until the volatile decomposition products have been substantially expelled and a dry carbonaceous residue remains.
- d) Transfer the crucible and its contents to the muffle furnace (8.2.p) at $550\text{ °C} \pm 25\text{ °C}$ ^[27], with the door left slightly open to provide sufficient air to oxidize the carbon.
- e) Heating is continued until the carbon is completely oxidized and a clean ash is obtained.
- f) Remove the crucible (8.2.j) and its contents from the furnace (8.1.p) and allow to cool to ambient temperature.
- g) Add 5 ml of nitric acid (8.3.c), transfer the resulting solution to a 50 ml volumetric flask (8.2.h.3) and fill with water (8.3.a) to the mark. This is the concentrate sample solution. Dilute the concentrate sample solution with water (8.3.a) to the appropriate concentration level for each measurement apparatus. If an internal standard (8.3.k) is to be used, it shall be added before filling. For a final volume of 50 ml, add 500 µl of internal standard (8.3.k) for ICP-OES and for ICP-MS (after a 1:1 000 dilution step) before filling.

If the sample contains significant amounts of halogen compounds (information may be available from previous screening experiments), the following steps shall be carried out:

- 1) Measure the sample into a crucible (8.2.j)
- 2) Add 5 ml to 15 ml of sulfuric acid (8.3.b) and heat the crucible (8.2.j) and its contents slowly on a hot plate or sand bath (8.2.o) until the plastic melts and blackens.
- 3) After cooling, add 5 ml of nitric acid (8.3.c) and continue heating until the plastic degrades completely and white fumes are generated.
- 4) After cooling, the crucible (8.2.j) is placed in a muffle furnace (8.2.p) maintained at $550\text{ °C} \pm 25\text{ °C}$ and the sample is evaporated, dried and ashed until the carbon has been completely incinerated.
- 5) After ashing, add 5 ml of nitric acid (8.3.c) and transfer the resulting solution to a 50 ml volumetric flask (8.2.h.3) and fill with water (8.3.a) to the mark. The resulting solution is the concentrate sample solution. Dilute the concentrate sample solution with water (8.3.a)

to the appropriate concentration level for each measurement apparatus. If an internal standard is to be used, it shall be added before filling. For a final volume of 50 ml, 500 µl of internal standard (8.3.k) for ICP-OES and ICP-MS (after a 1:1 000 dilution step) shall be added before filling.

- 6) Any sample residues shall be separated by a centrifuge or a filter. The residues shall be checked by appropriate measurements (e.g. XRF) to confirm the absence of target elements.

NOTE This method does not apply to fluorocarbons (see 8.1).

8.4.2.2 Acid digestion method

This method is used to determine Cd only. It is not suitable for determining Pb, because the sulfuric acid can lead to a loss of Pb in the sample due to the formation of PbSO₄.

- a) Measure the sample into a flask (8.2.h.1). Add 5 ml of sulfuric acid (8.3.b) and 1 ml of nitric acid (8.3.c) and heat the flask until the sample ashes and white fumes are generated. After heating is stopped, nitric acid (8.3.c) is added in small quantities (approximately 0,5 ml) and heating is continued until white fumes are generated. The heating and decomposition with nitric acid (8.3.c) are repeated until the decomposed solution turns pale yellow.
- b) Allow the sample to cool down for several minutes. Add hydrogen peroxide (8.3.e) in small quantities, several millilitres at a time, and heat the sample until white fumes are generated. After cooling, transfer the solution to a 100 ml volumetric flask (8.2.h.3) and filled with water (8.3.a) to the mark. The resulting solution is the concentrate sample solution. Dilute the concentrate sample solution with water (8.3.a) to the appropriate concentration level for each measurement apparatus. If an internal standard is to be used, it shall be added before filling. For a final volume of 100 ml, add 1 000 µl of internal standard (8.2.k) for ICP-OES and ICP-MS (after a 1:1 000 dilution step) before filling.
- c) When general digestion is inadequate or when the sample contains significant amounts of Si, TI etc. (information may be available from previous screening) the following procedures shall be carried out:
 - Measure the sample into a flask. Add 5 ml of sulfuric acid and 1 ml of nitric acid and heat the flask until the sample ashes and white fumes are generated. Heating is stopped, add nitric acid (8.3.c) in small quantities (approximately 0,5 ml), and heat until white fumes are generated. The heating and decomposition with nitric acid (8.3.c) are repeated until the decomposed solution turns pale yellow.
 - Allow the sample to cool for several minutes. Hydrogen peroxide is added in small quantities, several millilitres at a time, and heat the sample until white fumes are generated. After cooling, transfer the solution to a fluorocarbon resin vessel. Add 5 ml of HF (8.3.g) and heat the vessel until white fumes are generated. Add boric acid (8.3.h) as desired to permit the complexation of fluoride for protection of the quartz plasma torch (if no acid-resistant sample introduction system is available). After cooling, transfer the solution to a 100 ml PTFE/PFA volumetric flask (8.2.k.2) and fill with water (8.3.a) to the mark. The resulting solution is the concentrate sample solution. Dilute the concentrate sample solution with water (8.3.a) to the appropriate concentration level for each measurement apparatus. If an internal standard is to be used it shall be added before filling. For a final volume of 100 ml, add 1 000 µl of internal standard (8.3.k) for ICP-OES and ICP-MS (after a 1:1 000 dilution step) before filling.
- d) Any sample residues shall be separated by a centrifuge or a filter. The residues shall be checked by appropriate measurements (e.g. XRF) to confirm the absence of target elements.

8.4.2.3 Closed system for acid decomposition

If a closed system is used, the following steps are carried out:

- a) Measure the sample into a microwave digestion vessel and add 5 ml of nitric acid (8.3.c). Add hydrogen peroxide (8.3.e) in small or catalytic quantities (such as 0,1 ml to 1 ml) as desired to support the complete oxidation of organic matter. Cover the vessel with a lid and place it in a microwave digestion apparatus (8.2.r). Digest in the microwave oven following a decomposition program specified in advance. Cool the sample and transfer the solution to a 50 ml volumetric flask (8.2.h.3), which is then filled with water (8.3.a) to the mark. The resulting solution is the concentrate sample solution. Dilute the concentrate sample solution with water (8.3.a) to the appropriate concentration level for each measurement apparatus. If an internal standard is to be used it shall be added before filling. For a final volume of 50 ml, add 500 µl of internal standard (8.3.k) for ICP-OES, and ICP-MS (after a 1:1 000 dilution step) before filling.

NOTE 1 Hydrogen peroxide should only be added when the reactive components of the sample are known. Hydrogen peroxide may react rapidly and violently with easily oxidizable materials and should not be added if the sample contains large quantities of easily oxidizable organic constituents.

- b) When decomposition is inadequate or when the sample contains significant amounts of Si, Ti etc. (information may be available from previous screening), the following procedure shall be carried out:
- Measure the sample into a microwave digestion vessel. Add 5 ml of nitric acid (8.3.c) and 1 ml of HF (8.3.g). Add hydrogen peroxide (8.3.e) in small or catalytic quantities (such as 0,1 ml to 1 ml) to support the complete oxidation of organic matter. Cover the vessel with a lid and place it in a microwave digestion apparatus (8.2.r). The sample is digested in the microwave oven following a decomposition program specified in advance. Add boric acid (8.2.h) as desired to permit the complexation of fluoride to protect the quartz plasma torch (if no acid-resistant sample introduction system is available). Cool, the sample and transfer the solution to a 50 ml PTFE/PFA volumetric flask (8.2.k.2) and fill the flask with water (8.3.a) to the mark. The resulting solution is the concentrate sample solution. Dilute the concentrate sample solution may be diluted with water (8.3.a) to the appropriate concentration level for each measurement apparatus. If an internal standard is to be used it shall be added before filling. For a final volume of 50 ml, add 500 µl of internal standard (8.3.k) for ICP-OES and ICP-MS (after a 1: 1 000 dilution step) before filling.

NOTE 2 Hydrogen peroxide should only be added when the reactive components of the sample are known. Hydrogen peroxide may react rapidly and violently with easily oxidizable materials and should not be added when the sample contains large quantities of easily oxidizable organic constituents.

- c) Any sample residues shall be separated by a centrifuge or a filter. The residues shall be checked by appropriate measurements (e.g. XRF) to confirm the absence of target elements.

8.4.3 Preparation of laboratory reagent blank

The procedure is identical to that of sample preparation and is carried out concurrently but without the sample.

8.5 Test procedure

The sample shall be assumed to be of unknown composition, in which case the internal standard method (intensity comparison method) is recommended. If necessary, a standard addition method may be used. If there are no interfering matrix elements or if the composition of the sample is known, the calibration curve method can be applied.

NOTE In all cases, the acid should also be adjusted to the concentration of the sample.

8.5.1 Preparation of calibration solution

After gradually diluting each standard element solution, the diluted standard solutions containing 0 µg to 100 µg of each element are transferred to a 100 ml volumetric flask (8.2.h.3). Next, add each reagent, and in the case of the internal standard method, the appropriate amounts of solution for the internal standard solutions (8.3.k) to achieve reagent

concentrations identical to those present in the sample solution. The resulting solution is the mixed calibrant solution.

8.5.2 Development of the calibration curve

The spectrometers are prepared for quantification. Some of the solution obtained as described in 8.5.1 is nebulized into the argon plasma or the acetylene/air flame. A HF-resistant sample introduction system shall be used when the sample solution contains HF.

a) ICP-OES

- Readings are determined for the emission intensity of the target elements (and, if required, of the internal standard element). In the calibration curve method, the curve showing the relationship between the emission intensity of the target elements and their concentrations is developed as the calibration curve. In the internal standard method, the curve showing the relationship between intensity ratio and concentration of the target elements with respect to the curve of the internal standard elements is developed as the calibration curve.
- Recommended wavelengths and interfering elements are shown in Table F.1.

b) ICP-MS

- Readings are determined for the mass/charge (m/z) of the target elements (and, if required, of the internal standard element). In the calibration curve method, the curve showing the relationship between the intensities of the m/z of the target elements and their concentration is developed as the calibration curve. In the internal standard method, the curve showing the relationship between intensity ratio and concentration of the target elements with respect to the curve of the internal standard elements is developed as the calibration curve.
- The m/z ratio may be defined on the basis of the data given in Table F.2.

c) AAS

- Readings are determined for the absorbance of the target elements. In the calibration method, the curve showing the relationship between the absorbance of the target elements and concentration is developed as the calibration curve.
- In the standard additions method, the standards are added into the sample solution and the unknown concentration is determined by extrapolation of the additions curve to zero absorbance.
- The wavelengths shall be selected with regard to typical measurement wavelengths for elements given in Table F.3. If there is interference from co-present substances, the standard additions method should be applied.

A straight-line regression curve with a correlation (R^2) not less than $<0,998$ is required for initial calibration. If the check standard result (e.g. standard substance, calibration solution, etc.) differs from the expected value by more than 20 %, the calibration and all samples in the sequence shall be re-measured.

8.5.3 Measurement of the sample

Once the calibration curve has been developed, the laboratory reagent blank and the sample solution are measured. If the sample concentration is above the range of the concentration curve, the solution shall be diluted to the range of the calibration curve, ensuring an appropriate acidification of the calibrants and measured once again.

Measurement precision is checked with a standard substance, calibration solution, etc. at regular intervals (such as once every 10 samples). If necessary, a calibration curve is developed again.

In the event that the calibrant result differs from the expected value by more than 20 %, the calibration and all samples in the sequence shall be re-measured.

NOTE If the sample is diluted to the range of calibration, it has to be ensured that the internal standard concentration in the diluted sample solution is adjusted to the standard solution.

8.5.4 Calculation

The concentration measured in 8.5.3 is the concentration of each element in the sample solution. The concentration of each element in the sample is calculated from the equation:

$$c = \frac{(A_1 - A_2)}{m} \times V \quad (3)$$

where

- c is the concentration of Pb or Cd in the sample, in $\mu\text{g/g}$;
- A_1 is the concentration of Pb or Cd in the sample solution, in mg/l ;
- A_2 is the concentration of Pb or Cd in the laboratory reagent blank in mg/l ;
- V is the total volume for the sample solution, in ml , which depends on the particular series of dilutions made;
- m is the measured quantity of the sample, in g .

8.6 Evaluation of the method

As described in detail in 4.5, the instrument detection limits are generally quite low (sometimes very low), but do not represent the true LODs of a methodology applied to the analysis of real samples. To overcome this somewhat theoretical approach (see 8.1), IEC TC111 WG3 carried out several international interlaboratory studies (IIS).

In these studies, CRMs, donated samples of known composition and actual samples were analysed according to the analytical procedures described in this clause. The results gave an overview of the practically achievable LODs and, even more importantly, the precision and accuracy of the analytical procedures in routine analytical work.

For the methods described in this clause, the IIS revealed that the precision and accuracy were always within $\pm 20\%$ for amounts of Pb and Cd above 10 mg/kg , regardless of the particular method or equipment selected.

9 Determination of lead and cadmium in metals by ICP-OES, ICP-MS and AAS

9.1 Overview

This clause specifies the procedure for the determination of lead (Pb) and cadmium (Cd) in metals from electrotechnical products. Three methods are described, namely ICP-OES, ICP-MS and AAS. The samples are digested with acids such as hydrochloric acid or nitric acid. The Pb and Cd in the solutions thus obtained are determined either by ICP-OES, ICP-MS or AAS. The detailed procedures depend on the matrix as well as on the presence of particular elements; these are also described. Procedures are given for unknown samples and for samples where screening methods have already indicated the qualitative composition.

The test procedures described in this clause are intended to provide the highest level of accuracy and precision for concentrations of the regulated substances, which range from 10 mg/kg for Pb and Cd for ICP-OES and AAS, and from $0,1 \text{ mg/kg}$ for Pb and Cd for ICP-MS. The procedures are not limited to higher concentrations.

There are limitations and risks due to the solution step of the sample. Firstly, precipitation of the target or other elements may occur (risk of co-precipitation), in which case the residues have to be checked separately or dissolved by another method and then combined with the test sample solution. Secondly, evaporation of the sample solution may occur due to vigorous

chemical reactions, especially when watch glasses are used to cover the reaction volume. The use of appropriate, sophisticated equipment, i.e. a microwave digestion system, is strongly advised. However, if the experts can ensure their suitability, simple alternatives may be used. Detailed information is given in the clause.

The results of the evaluation of the precision, accuracy and LOD of the methods are summarized in 9.7.

The work according to this standard involves the use of toxic and hazardous substances. A detailed warning is given in the clause.

9.2 Apparatus, equipment and materials

The following items shall be used for the analysis:

- a) ICP-OES: equipment consisting of sample holder, plasma torch, spray chamber, nebulizer, optical unit, detector, system control and data output device.
- b) ICP-MS: equipment consisting of sample holder, plasma torch, spray chamber, nebulizer, interface, mass separator unit, system control and data output device.
- c) AAS: apparatus consisting of a sample holder, nebulizer/burner system with air/acetylene burner head, radiation source lamps, detector, data processor and control system.
- d) Analytical balance capable of measuring accurately to 0,000 1 g.
- e) Glassware: all glassware shall be cleaned with 10 % (m/m) nitric acid before use:
 - 1) Beakers: such as 100 ml, 200 ml, 500 ml, etc.
 - 2) Volumetric flasks: such as 100 ml, 200 ml, 500 ml, etc.
 - 3) Pipettes: such as 1 ml, 5 ml, 10 ml, 20 ml, etc.
 - 4) Watch glass.
- f) Micropipettes: such as 200 µl, 500 µl, 1 000 µl, etc.
- g) Poly(tetrafluoroethylene) (PTFE)/perfluoro alkoxy alkane resin (PFA) equipment: all equipment shall be cleaned with 10 % (m/m) nitric acid before use:
 - 1) Beakers: such as 100 ml, 200 ml, 500 ml, etc.;
 - 2) Covers for beakers;
 - 3) Volumetric flasks: such as 100 ml, 200 ml, 500 ml, etc.
- h) Volumetric flasks made of high-density polyethylene: such as 100 ml, 200 ml, 500 ml, etc. Where appropriate, other types of volumetric equipment with acceptable precision and accuracy can be used as an alternative to volumetric flasks.
- i) Containers: for storage of standard solution and calibrant.
Containers to be made of high-density polyethylene (PE-HD) or PFA bottles.
- j) Electric hot plate or heated sand bath.
- k) HF-resistant sample holder: sample holder of which the sample insertion section and torch have been treated for resistance to HF.
- l) Argon gas: gas with purity of over 99,99 % (v/v).
- m) Acetylene gas: gas with purity of over 99,99 % (v/v).
- n) Paper filter.

9.3 Reagents

For the determination of elements at trace level, the reagent shall be of adequate purity. The concentration of the analyte or interfering substances in the reagents and water shall be negligible compared to the lowest concentration to be determined.

All reagents for ICP-MS analysis, including acids or chemicals used shall be of high purity total trace metals shall be less than 1×10^{-6} % (m/m).

- a) Water: Grade 1 specified in ISO 3696 used for preparation and dilution of all sample solutions.
- b) Nitric acid: $\rho(\text{HNO}_3) = 1,40$ g/ml, 65 % (m/m), "trace metal" grade.
- c) Nitric acid: dilution (1:2): dilute 1 volume of concentrated nitric acid (9.3.b) with 2 volumes of water (9.3.a).
- d) Fluoroboric acid: HBF_4 , 50 % (m/m) "trace metal" grade.
- e) Hydrogen peroxide: $\rho(\text{H}_2\text{O}_2) = 1,10$ g/ml, 30 % (m/m), "trace metal" grade.
- f) Perchloric acid: $\rho(\text{HClO}_4) = 1,67$ g/ml, 70 % (m/m), "trace metal" grade.
- g) Phosphoric acid: $\rho(\text{H}_3\text{PO}_4) = 1,69$ g/ml, more than 85 % (m/m), "trace metal" grade.
- h) Sulfuric acid: $\rho(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1,84$ g/ml, 95 % (m/m), "trace metal" grade.
- i) Sulfuric acid: dilution (1:2): dilute 1 volume of concentrated sulfuric acid (9.3.h) with 2 volumes of water (9.3.a).
- j) Hydrofluoric acid: $\rho(\text{HF}) = 1,18$ g/ml, 40 % (m/m), "trace metal" grade.
- k) Hydrochloric acid: $\rho(\text{HCl}) = 1,16$ g/ml, 37 % (m/m), "trace metal" grade.
- l) Hydrobromic acid: $\rho(\text{HBr}) = 1,48$ g/ml, 47 % to 49 % (m/m), "trace metal" grade.
- m) Boric acid (HBO_3) 50 mg/ml, 5 % (m/m), "trace metal" grade.
- n) Mixed acid 1 (two parts hydrochloric acid (9.3.k), one part nitric acid (9.3.b) and two parts water (9.3.a)).
- o) Mixed acid 2 (one part nitric acid (9.3.b) and three parts hydrofluoric acid (9.3.j)).
- p) Mixed acid 3 (three parts hydrochloric acid (9.3.k) and one part nitric acid (9.3.b)).
- q) Standard solution with 1 000 mg/l of Pb.
- r) Standard solution with 1 000 mg/l of Cd.
- s) Internal standard solution.

Internal standard elements that do not interfere with the target element are used. The presence of these internal standard elements in the sample solution shall also be at negligible levels. Sc, In, Tb, Lu, Re, Rh, Bi and Y may be used as internal standard elements.

NOTE 1 The toxicity of each reagent used in this method has not been precisely defined; however, each chemical compound should be treated as a potential health hazard. From this viewpoint, exposure to these chemicals at the lowest possible level by whatever means available is recommended.

NOTE 2 Preparation methods involve the use of strong acids, which are corrosive and cause burns. Laboratory coats, gloves and safety glasses should be worn when handling acids.

NOTE 3 Toxic fumes are released by nitric acid. Always carry out digestion in a fume cupboard and when adding acid to samples because of the possibility of toxic gases being released.

NOTE 4 The exhaust gases from the plasma should be ducted away by an efficient fume extraction system.

NOTE 5 Special precautionary measures should be taken when hydrofluoric acid or perchloric acid are used (a special hood is required due to the risk of explosion, and HF antidote gel (2,5 % calcium gluconate in a water soluble gel) for first aid treatment of HF burns of the skin).

9.4 Sample preparation

9.4.1 Test portion

1 g of sample is measured accurately to a 0,1 mg level and is placed in a glass beaker or a PTFE/PFA beaker (9.2.g.1) when using HF (9.3.j).

9.4.2 Preparation of the test sample solution

The preparation of a test sample solution as described here does not necessarily cover all metals and their compounds. Generally, the preparation of a solution with hydrochloric acid, nitric acid or a mixture thereof is recommended. For samples that are difficult to dissolve with these acids, perchloric acid, sulfuric acid, etc. shall be added as necessary. It shall be borne in mind that the use of sulfuric acid is critical in the determination of Pb due to the risk of losing some of the target element. Samples shall be dissolved completely without any residues under heating at high temperatures. A sample may also be dissolved by using phosphoric acid.

When dissolving metals or especially mixtures thereof with strong acids, there is always a risk of precipitation (e.g. Pb and Ba with sulfuric acid and Ag with hydrochloric acid. Al may form oxides/oxide-hydrates and the like). Even if these elements are not covered by legislation, there is the risk of loss of the target element due to co-precipitation. For the purposes of this clause, it has to be ensured that no target elements are lost in the test sample solution. Any residues shall be checked either by a different method to determine whether they contain target elements, or after acid dissolution the residues shall be dissolved completely by other dissolution methods (such as alkali fusion or the use of an air-tight pressurized vessel). The residues treated in this way are then combined with the acid-dissolved solution and measured.

a) Common methods of sample digestion

A glass beaker (9.2.e.1) containing the sample is covered with a watch glass (9.2.e.4). Add 20 ml of mixed acid 1 (9.3.n) and heat the beaker until the sample has been dissolved. Allow to cool to room temperature, and rinse the underside of the watch glass and inside wall of the beaker with water (9.3.a). Transfer the solution to a 100 ml volumetric flask (9.2.e.2) and fill with water (9.3.a) to the mark. The resulting solution is the concentrate sample solution. Dilute the concentrate sample solution with water (9.3.a) to the appropriate concentration level for each measurement apparatus. If necessary, an internal standard solution (9.3.s), e.g. containing Rh is added before the flask (9.2.e.2) is filled with water (9.3.a). The type of element and its amount depend on the analytical method selected. The particular paths of dilution shall be taken into account in the calculation of the results. Both the dilution and the internal standard addition shall be documented in the test report.

b) If the sample contains Zr, Hf, Ti, Ta, Nb or W

A PTFE/PFA beaker (9.2.g.1) containing the sample is covered (9.2.g.2). 20 ml of mixed acid 2 (9.3.o) is added and the beaker (9.2.g.1) is heated until the sample is dissolved. After cooling to room temperature, the underside of the cover (9.2.g.2) and the inside wall of the beaker (9.2.g.1) are rinsed with water (9.3.a), and the cover (9.2.g.2) is removed. The solution is transferred to a 100 ml volumetric flask (9.2.g.3) and filled with water to the mark. The resulting solution is the concentrate sample solution. The concentrate sample solution is diluted with water (9.3.a) to the appropriate concentration level for each measurement apparatus. If necessary, an internal standard solution (9.3.s), e.g. containing Rh, is added before the flask (9.2.g.3) is filled with water (9.3.a) to the mark. As hydrofluoric acid (9.3.j) is used, the internal standard solution (9.3.s) shall not contain rare earth elements. The element chosen and its amount depend on the analytical method selected. The particular paths of dilution shall be taken into account in the calculation of the results. Both the dilution and the internal standard addition shall be documented in the test report.

c) If the sample contains Sn

– A beaker (9.2.e.1) containing the sample is covered. 10 ml of mixed acid 3 (9.3.p) is added in small quantities. After the violent reaction ends, the beaker (9.2.e.1) is heated slowly until the sample is completely dissolved. After cooling, the underside of the cover and the inside wall of the beaker (9.2.e.1) are rinsed with water (9.3.a), and the cover is removed. 10 ml of sulfuric acid (9.3.h) is added and the beaker (9.3.e.1) is heated until white fumes of SO₃ are generated. After cooling for several minutes, 20 ml of hydrobromic acid (9.3.l) are added, and the beaker (9.2.e.1) is heated until white fumes become visible. This process is repeated three times. After cooling to room

temperature, 10 ml of nitric acid (9.3.b) is added to dissolve the salts. The solution is transferred to a 100 ml volumetric flask (9.2.e.2) which is then filled with water (9.3.a) to the mark. The resulting solution is the concentrate sample solution. The concentrate sample solution is diluted with water (9.3.a) to the appropriate concentration level for each measurement apparatus. If necessary, an internal standard solution (9.3.s), e.g. containing Rh, is added to the flask (9.2.e.2) before it is filled with water (9.3.a). The element chosen and the amount depend on the analytical method selected. The particular paths of dilution shall be taken into account in the calculation of the results. Both the dilution and the addition of the internal standard solution (9.3.s) shall be documented in the test report.

- Alternatively, 1 g of sample is dissolved by the addition of 40 ml of water (9.3.a), 12 ml of nitric acid (9.3.b) and 6 ml of freshly prepared fluoroboric acid (9.3.d) (200 ml of 40 % (m/m) hydrofluoric acid (9.3.j) with 75 g of boric acid (9.3.m)). A PTFE/PFA beaker (9.2.g.1) and a high-density polyethylene or PTFE/PFA volumetric flask (9.2.g.3) shall be used.
- d) If there are sample residues, they are separated by a centrifuge or a filter. The residues shall be checked by appropriate measurements (e.g. XRF) to confirm the absence of target elements.

NOTE If there is a large quantity of tin in the presence of silver, i.e. lead-free solder, the dissolving acid should be hydrochloric acid followed by the addition of 10 ml of hydrogen peroxide until digestion is complete.

9.5 Preparation of laboratory reagent blank

A procedure which is identical to that for the preparation of the test sample solution is carried out concurrently but without the sample.

9.6 Test procedure

The calibration curve method is used for sample measurement. If the sample composition can be identified clearly, the calibration method (matrix matching method) is used. If it is unknown, the internal standard method (intensity comparison method) is used (not suitable for AAS). If required, the standard addition method may also be used.

NOTE 1 It is recommended that the matrix matching method be used for high matrix concentration samples. In all cases, the acid should also be adjusted to the sample concentration.

NOTE 2 If the matrix effect cannot be corrected, the matrix elements should be eliminated by means of a separation method such as solvent extraction, ion exchange, etc.

9.6.1 Preparation of the calibrant

Two different methods are used for the preparation of the calibrant.

a) Calibration method (matrix matching method)

- After gradually diluting each standard element solution, the diluted standard solutions containing 0 µg to 100 µg of each element are transferred to a 100 ml volumetric flask (9.2.e.2). In the matrix matching method, a close matrix matching of the standard solution is necessary. In this case, the matrix elements shall either be known (e.g. from previously documented specifications) or have been evaluated by previous screening experiments using XRF. Each reagent and the matrix (elements) are added to prepare mixed calibrants that are equivalent to those of the sample solution.
- If hydrofluoric acid is used, a PTFE/PFA beaker (9.2.g.1) and a high-density polyethylene or PTFE/PFA volumetric flask (9.2.g.3) shall be used.

b) Internal standard method

- To achieve concentrations equivalent to the concentration of the sample solution, reagents and internal standard elements are added to prepare mixed calibrant solutions.

- If hydrofluoric acid is used, a PTFE/PFA beaker and a high-density polyethylene or PTFE/PFA volumetric flask shall be used.

9.6.2 Measurement of the calibrant

Measurement of the calibrant depends on the equipment used.

a) ICP-OES

- In ICP-OES, part of the calibration solutions prepared as described in 9.6.1 is introduced into the argon plasma under optimized conditions to measure the intensities of the atomic spectral lines of each target element. In the calibration method (matrix matching method), the curve showing the relationship between the intensities of the atomic spectral lines and concentration is developed as the calibration curve. In the internal standard method, the curve showing the relationship between the intensity ratio and the concentration of the target element with respect to the internal standard element is developed as the calibration curve.
- A hydrofluoric acid-resistant sample holder and torch shall be used if the solution contains hydrofluoric acid.
- The recommended wavelength is selected from the spectral lines for each element. The wavelength shall be selected with regard to typical measurement wavelengths for elements given in Table G.1. A thorough study of the limit of detection, measurement precision, etc. shall be made. If there is interference from co-present substances, either a wavelength that does not interfere with the calibration range shall be selected or adjustments shall be made to the intensity of interference using a suitable method.

b) ICP-MS

- The ICP-MS is prepared for quantification. Some of the solution obtained according to 9.6.1 is nebulized into the argon plasma through the sample holder. A hydrofluoric acid-resistant sample holder shall be used when the solution contains hydrofluoric acid. The readings for the m/z of the target elements and the internal standard element are determined, and the ratio of the reading for the target element to the reading for the internal standard element is calculated. The mass-charge ratios can be defined on the basis of the measured mass numbers shown in Table G.2.

c) AAS

- Portions of the calibration solutions, prepared as described in 9.6.1, are introduced into the air-acetylene flame in AAS under optimized conditions in order to measure the absorption of the wavelength of each target element. In the calibration method (matrix matching method), the curve showing the relationship between the absorption of the wavelength and the concentration is developed as the calibration curve.
- The wavelengths shall be selected with regard to typical measurement wavelengths for elements shown in Table G.3. In the case of interference from co-present substances, either a wavelength that does not interfere with the calibration range shall be used or adjustments have to be made to the intensity of interference using a suitable method.

A straight-line regression curve with a correlation (R^2) not less than $<0,998$ shall be used for initial calibration. In the event that the check standard result (e.g. standard substance, calibrant etc.) differs from the expected value by more than 20 %, the calibration and all samples in the sequence shall be re-measured.

9.6.3 Measurement of the sample

After the calibration curve is developed, the calibration blank and the sample solution are measured. If the sample concentration is above the range of the concentration curve, the solution shall be diluted to the range of the calibration curve ensuring an appropriate acidification of the calibrants and measured once again.

The measurement precision is checked with standard substances, calibration solutions, etc. at regular intervals (such as once every 10 samples). If necessary, a calibration curve shall be developed again.

NOTE If the sample is diluted to the range of calibration, it should be ensured that the internal standard concentration in the diluted sample solution is adjusted to the standard solution.

9.6.4 Calculation

The spectrometer readings of each sample obtained according to 9.6.3 and the calibration curve developed as described in 9.6.2 are employed to determine the net spectral intensity of each target element. The content rate of each element in the sample is calculated by the following equation:

$$c = \frac{(A_1 - A_2)}{m} \times V \quad (4)$$

where

- c is the concentration of Pb or Cd in the sample, in $\mu\text{g/g}$;
- A_1 is the concentration of Pb or Cd in the sample solution, in mg/l ;
- A_2 is the concentration of Pb or Cd in the laboratory reagent blank, in mg/l ;
- V is the total volume for the sample solution in ml which depends on the particular series of dilutions made;
- m is the measured quantity of the sample, in g.

9.7 Evaluation of the method

As described in detail in 4.5, instrument detection limits are generally quite low (sometimes very low), but do not represent the true LODs of a methodology applied to the analysis of real samples. In order to overcome this somewhat theoretical approach (see 9.1), IEC TC 111 WG3 carried out several international interlaboratory studies (IIS).

In these studies, CRMs, donated samples of known composition and actual samples were analysed according to the analytical procedures described in this clause. The result gave an overview of the practically achievable LODs, and even more importantly, of the precision and accuracy of the analytical procedures in routine analytical work.

For the methods described in this clause, the IIS revealed that precision and accuracy were always within $\pm 20\%$ for amounts of Pb and Cd above 10 mg/kg , regardless of the particular method or equipment chosen.

10 Determination of lead and cadmium in electronics by ICP-OES, ICP-MS and AAS

10.1 Overview

This clause specifies the procedure for the determination of lead (Pb) and cadmium (Cd) in electronics (printed wiring boards or single components from electrical and electronic equipment). Three methods (ICP-OES, ICP-MS and AAS) and several procedures for preparing the sample solution are described, from which the most appropriate method of analysis can be selected by the experts.

The samples for analysis shall be available as ground material of those electronic products described in Clause 5. The powder is either digested with aqua regia or microwave-enhanced with HNO_3 , HBF_4 , H_2O_2 , and HCl . The aqua regia digestion procedure is carried out according to ISO 5961. The elements Pb and Cd are determined either simultaneously in the digestion solution by ICP-OES or by ICP-MS or one element after the other is determined by AAS.

NOTE If HBF_4 is not available in sufficient purity, HF can be used instead.

The test procedures described in this clause are intended to provide the highest level of accuracy and precision for concentrations of the regulated substances that range from 10 mg/kg for Pb and Cd for lead for ICP-OES and AAS, and from 0,1 mg/kg for Pb and Cd for ICP-MS. The procedures are not limited to higher concentrations.

Analyses by ICP-OES, ICP-MS or AAS generally allow the determination of the target elements with high precision (uncertainty in the low percent range) and/or high sensitivity. The advantages of these methods may be limited when the samples to be analysed have a highly complex composition. Samples shall be destroyed by appropriate mechanical means prior to chemical digestion. The correct particle size as a function of the amount of starting material is essential. In order to fulfil the minimum requirements for a correct analysis, the maximum particle size and minimum amounts of sample are given in this clause. It is highly likely that after the digestion methods have been carried out that solid residues will be present. It has to be ensured (e.g. by using XRF) that there are no target elements in considerable amounts in the residues. If so, they shall be dissolved by different chemical methods and combined with the test sample solution. This standard strongly recommends the use of sophisticated equipment, e.g. a microwave digestion system for the digestion methods. Nevertheless, if the user can ensure the suitability of a simpler approach, it may be applied. Any deviation from the described procedures shall be evaluated and documented in the test report.

For the results of the evaluation of precision, accuracy and LOD of the methods described in this clause, see 10.6.

The work described in this standard involves the use of toxic and hazardous substances. A detailed warning is given.

10.2 Apparatus, equipment and materials

The following items shall be used for the analysis:

- a) ICP-OES: equipment consisting of sample holder, plasma torch, spray chamber, nebulizer, optical unit, detector, system control and data output device.
- b) ICP-MS: equipment consisting of sample holder, plasma torch, spray chamber, nebulizer, interface, mass separator unit, system control and data output device.
- c) AAS: equipment consisting of a sample holder, nebulizer/burner system with air-acetylene burner head, radiation source lamps, detector, data processor and control system.
- d) Hydrofluoric acid-resistant sample holder: sample holder into which the sample insertion section and torch are treated for resistance to hydrofluoric acid.
- e) Argon gas: gas with a purity of over 99,99 % (v/v).
- f) Acetylene gas: gas with purity of over 99,99 % (v/v).
- g) Digestion with aqua regia: digestion apparatus equipped with a time and temperature microcontroller unit, a heating block thermostat, a set of vessels, each equipped with reflux coolers and absorption vessels.
- h) Microwave digestion system: microwave sample preparation system equipped with a sample holder and high-pressure polytetrafluoroethylene/tetrafluoroethylene modified PTFE/TFM or perfluoro alkoxyl alkane resin/tetrafluoroethylene modified (PFA/TFM) or other vessels based on fluorocarbon materials with a capacity of 40 ml.

NOTE There are many safety and operational recommendations specific to the model and manufacturer of the microwave equipment used in individual laboratories. The analyst is required to consult the specific equipment manual, manufacturer and literature for proper and safe operation of the microwave equipment and vessels.

- i) Analytical balance capable of measuring accurately to 0,000 1 g.
- j) Glassware: all glassware shall be cleaned with 10 % (m/m) nitric acid (10.3.h) before use.
 - 1) Beakers: such as 100 ml, 200 ml, 500 ml, etc.

- 2) Volumetric flasks: such as 100 ml, 200 ml, 500 ml, etc.
Where appropriate, other types of volumetric equipment with acceptable precision and accuracy can be used as an alternative to volumetric flasks.
 - 3) Pipettes: such as 1 ml, 5 ml, 10 ml, 20 ml, etc.
 - 4) Graduated cylinder: such as 1 ml, 5 ml, 50 ml, etc.
 - 5) Watch glass.
- k) Micropipettes: such as 200 µl, 500 µl, 1 000 µl, etc.
- l) PTFE/PFA containers: all equipment shall be cleaned with 10 % (m/m) nitric acid (10.3.h) before use.
- 1) Beakers: such as 100 ml, 200 ml, 500 ml, etc.
 - 2) Volumetric flasks: such as 100 ml, 200 ml, etc.
- m) Containers: for storage of standard solution and calibrant.
Containers made of high-density polyethylene shall be used for ordinary measurement of element concentration. For determination at the ultra-trace level, containers made of perfluoro alkoxyl alkane resin (PFA) or perfluoro(ethylene-propylene) plastic (FEP) shall be used. In either case, the user shall confirm the suitability of the container selected.
- n) Electric hot plate or heated sand bath.
- o) Microwave digestion vessel: such as 40 ml, 100 ml, etc.
- p) Glass microfibre filter (borosilicate glass), pore size 0,45 µm and a suitable filter cup.

10.3 Reagents

For the determination of elements at trace level, the reagent shall be of adequate purity. The concentration of the analyte or interfering substances in the reagents and water shall be negligible compared to the lowest concentration to be determined.

All reagents for ICP-MS analysis including acids or chemicals used shall be of high purity: total trace metals shall be less than 1×10^{-6} % (m/m).

- a) Water: grade 1 specified in ISO 3696 shall be used for preparation and dilution of all sample solutions.
- b) Hydrochloric acid: $\rho(\text{HCl}) = 1,16$ g/ml, 37 % (m/m), “trace metal” grade.
- c) Hydrochloric acid: dilution (1:2): one part hydrochloric acid (10.3.b) diluted with 2 parts water (10.3.a), “trace metal” grade.
- d) Hydrochloric acid, 5 % (m/m), “trace metal” grade.
- e) Hydrochloric acid, 10 % (m/m), “trace metal” grade.
- f) Nitric acid: $\rho(\text{HNO}_3) = 1,40$ g/ml, 65 % (m/m), “trace metal” grade.
- g) Nitric acid, 0,5 mol/l, “trace metal” grade.
- h) Nitric acid, 10 % (m/m), “trace metal” grade.
- i) Mixed acid (3 parts hydrochloric acid (10.3.b) and 1 part nitric acid (10.3.f)).
- j) Fluoroboric acid: HBF_4 , 50 % (m/m), “trace metal” grade.
- k) Hydrogen peroxide H_2O_2 , 30 % (m/m), “trace metal” grade.
- l) Standard solution with 1 000 mg/kg of lead.
- m) Standard solution with 1 000 mg/kg of cadmium.
- n) Standard solution with 10 000 mg/kg of copper.
- o) Standard solution with 10 000 mg/kg of iron.
- p) Internal standard solution: internal standard elements that do not interfere with the target element shall be used. Furthermore, the presence of these internal standard elements in the sample solution shall be at a negligible level. Sc, In, Tb, Lu, Re, Rh, Bi and Y may be used as internal standard elements for the purpose of this specific spectrometry.

NOTE 1 The toxicity of each reagent used in this method has not been precisely defined; however, each chemical compound should be treated as a potential health hazard. From this viewpoint, exposure to these chemicals at the lowest possible level by whatever means available is recommended.

NOTE 2 Preparation methods involve the use of strong acids which are corrosive and cause burns. Laboratory coats, gloves and safety glasses should be worn when handling acids.

NOTE 3 Toxic fumes are released by nitric acid. Always carry out digestion in a fume cupboard and when adding acid to samples because of the possibility of toxic gases being released.

NOTE 4 The exhaust gases from the plasma should be ducted away by an efficient fume extraction system.

NOTE 5 Special precautionary measures should be taken when hydrofluoric acid or perchloric acid are used (a special hood is required due to the risk of explosion and HF antidote gel (2,5 % calcium gluconate in a water soluble gel) for first aid treatment of HF burns of the skin).

10.4 Sample preparation

The preparation of a test sample solution described here does not necessarily cover all electronics and their compounds. Generally, the preparation of a solution with HCl, HNO₃ or a mixture thereof is recommended. HClO₄, H₂SO₄, etc. shall be added as necessary to samples that are difficult to dissolve with HCl and HNO₃. Please keep in mind that the use of H₂SO₄ is critical in the determination of Pb due to the risk of losing some of the target element. Samples shall be completely dissolved without any residues under heating at high temperatures.

When dissolving metals or especially mixtures thereof with strong acids, there is always a risk of precipitation (e.g. Pb and Ba with H₂SO₄, Ag with HCl, and Al may form oxides/oxide-hydrates and the like). Although these elements are often not covered by legislation, there is the risk of loss of the target element due to co-precipitation. For this clause it has to be ensured that no target elements are lost in the test sample solution. Any residues must either be checked by a different method to determine whether they contain target elements, or after acid dissolution the residues must be dissolved completely by further dissolution methods (such as alkali fusion or the use of an air-tight pressurised vessel). The residues that have been treated in this way are then combined with the acid-dissolved solution and the measurement procedure is carried out.

10.4.1 Test portion

The different analytical procedures which can be used alternatively according to this clause need different amounts of sample to achieve the required quality of results. In the case of electronics, the sample shall first be destroyed mechanically by appropriate means (e.g. grinding, milling, mill-cutting) before chemical digestion of the powder can start. In order to ensure a representative sample-taking at this step, a certain particle size as a function of the starting amount of sample is required (see corresponding standard for sample preparation). The resulting concentrated solutions may be used directly in ICP-OES or AAS or can be diluted for use in ICP-MS.

10.4.2 Digestion with aqua regia

Approximately 2 g of the ground sample (maximum particle size: 250 µm) are weighed into the reaction vessel and 22,5 ml HCl (10.3.b) and 7,5 ml HNO₃ (10.3.f) are added. The vessel is equipped with a reflux cooler and an absorption vessel containing 10 ml 0,5 mol/l HNO₃ (10.3.g). A temperature program is then started to digest the samples for 12 h at room temperature and for 2 h at 120 °C. After cooling to room temperature, the contents of the absorption tube are placed in the reaction vessel, the sample is filtered over a 0,45 µm glass microfibre filter (10.2.p) and the solid residue is washed four times with 15 ml 5 % (m/m) HCl (10.3.d). The solution obtained is transferred to a 250 ml volumetric flask (10.2. j.2) and filled with 5 % (m/m) HCl (10.3.d) to the mark.

The resulting solution is the concentrate sample solution. The concentrate sample solution may be diluted with water to the appropriate concentration level for each measurement apparatus. If an internal standard is used, it must be added before filling. For a final volume of

100 ml, an internal standard of 1 000 µl for ICP-OES and for ICP-MS (after a 1:1 000 dilution step) shall be added.

If there are sample residues on the filter, they shall be checked by appropriate measurements (e.g. XRF) to confirm the absence of target elements.

If the laboratory does not have the recommended equipment described above, it may be possible to use a simpler approach if the user can ensure the suitability of his approach. Deviations from the procedure described above have to be evaluated and documented in the test report. Such a simple approach may be based on a procedure as follows: a glass beaker (10.2.j.1) containing the sample is covered with a watch glass (10.2.j.5). Mixed acid (10.3. i) is added and the beaker (10.2.j.1) is heated for 2 h at 120 °C and then allowed to stand for 12 h at room temperature. The underside of the watch glass (10.2.j.5) and inside wall of the beaker (10.2.j.1) are rinsed with water (10.3.a), and the watch glass (10.2.j.5) is removed. After cooling, the sample is filtered with a 0,45 µm glass microfibre filter (10.2.p). The residues are rinsed with 5 % (m/m) HCl (10.3.d). The solution is transferred to a volumetric flask (10.2.j.2) and filled with water (10.3.a) to the mark. The resulting solution is used for further measurements.

10.4.3 Microwave digestion

200 mg of ground sample (maximum particle size: 250 µm) is weighed into a PTFE/TFM, a PTFE/PFA or a vessel made from another fluorocarbon material (10.2.l). 4 ml of HNO₃ (10.3.f), 2 ml of HBF₄ (10.3.j), 1 ml of H₂O₂ (10.2.k) and 1 ml of water (10.3.a) are added. The vessels are agitated carefully for approximately 10 s before sealing to allow the escape of immediately formed gases. The sample is then digested in a microwave oven (10.2.h) following a digestion program specified in advance. During the first digestion step (step A), organic components such as polyvinyl chloride and also some of the metal elements are dissolved.

NOTE 1 If HBF₄ is not available in sufficient purity, HF can be used instead.

The vessel is opened after cooling to room temperature (approximate time required: 1 h), and 4 ml HCl (10.3.b) are added. After sealing the vessel again, further elements are dissolved with HCl (10.3.b) during a second microwave-enhanced digestion step (step B). An example of a suitable microwave program (steps A and B) is given in Table H.1.

After cooling the vessel to room temperature (approximate time required: 1 h), it is opened and the solution is filtered over a glass microfibre filter (10.2 p) into a 25 ml flask (10.2.j.2), washed and filled to the mark with 5 % (m/m) HCl (10.3.d). If there are sample residues on the filter, they must be checked by appropriate measurements (e.g. XRF) to confirm the absence of target elements.

The procedure described above gives the minimum requirements for the microwave digestion system. It is highly recommended that the analysis for each sample is duplicated or triplicated in one run.

NOTE 2 It is highly recommended that no more than 200 mg of ground sample be weighed into the digestion vessel. Powdered electronic products with mixtures of HNO₃, HBF₄, H₂O₂ and HCl may react rapidly and violently, and form gas (CO₂, NO_x, etc.). This causes an increase in pressure in the closed vessel. With the sudden development of pressure, the safety system of the microwave oven can react and the vessel open. Target elements might be lost and in the worst case an explosion can occur.

NOTE 3 Weigh in the same amounts of sample amounts and types of sample when duplicating or triplicating the analysis in one run.

In cases where more than 200 mg of sample is required to obtain a representative portion of the material to be tested, use the following procedure. Divide the sample into portions of approximately equal mass. Weigh each portion into a separate digestion vessel, follow the digestion procedure with each vessel, and combine the digestion solutions obtained.

EXAMPLE For the digestion of a printed wiring board, a minimum sample amount of 1,2 g is needed. Therefore 6×200 mg of ground sample should be weighed into six vessels. After cooling at the end of microwave step B, the vessels are opened, the solutions are combined by filtering over a $0,45 \mu\text{m}$ glass microfibre filter (10.2.p) into a 100 ml volumetric flask (10.2.j.2), washed and the flask is filled to the mark with 5 % (m/m) HCl (10.3.d).

If there are sample residues on the filter, they shall be checked by appropriate measurements (e.g. XRF) to confirm the absence of target elements.

10.5 Test procedure

The calibration curve method is used for sample measurement. Electronics (PWBs, single components) are samples with a complex matrix for the analytical methods in this clause, even after sample preparation. After digestion (aqua regia or microwave), the solutions have, for example, high concentrations of copper, iron and so forth. If the sample composition can be identified clearly, the calibration method (matrix matching method) is used for ICP-OES and AAS. The internal standard method (intensity comparison method) is recommended for ICP-MS.

NOTE 1 To increase the reliability of the test method, the standard-addition method may be used.

NOTE 2 If the matrix effect cannot be corrected, the matrix elements should be eliminated by means of a separation method such as solvent extraction, ion exchange, etc.

10.5.1 Preparation of a calibrant solution

Two different methods are used for the preparation of a calibrant solution.

a) Calibration method (matrix matching method)

- After gradually diluting each standard element solution, the diluted standard solutions containing $0 \mu\text{g}$ to $100 \mu\text{g}$ of each element are transferred to 100 ml volumetric flasks (10.2.j.2). For the matrix matching method, a close matrix matching of standard solution is required. The matrix elements are identified by previous XRF screening. In order to achieve an equivalent to that of the sample solution, reagent and matrix elements are added to prepare mixed calibrant solutions. The resulting solution is the mixed calibration solution.
- If HBF_4 is used, a high-density polyethylene volumetric flask or a PTFE/PFA volumetric flask (10.2.l.2) shall be used.

b) Internal standard method

- To achieve concentrations equivalent to that of the sample solution, reagents and internal standard elements are added to prepare mixed calibrant solutions.
- If HBF_4 is used, a high-density polyethylene volumetric flask or a PTFE/PFA volumetric flask (10.2.l.2) shall be used.

c) ICP-OES and AAS: The high iron and copper content requires a close matrix matching of standard solutions and an appropriate line selection. Therefore the calibration shall be carried out using matrix adjusted calibration solutions. Recommended wavelengths are listed in Table H.2.

d) ICP-MS: Here the use of an appropriate internal standard is recommended. Table H.3 gives the recommended m/z for the measurements together with potential interferences.

10.5.2 Standard preparation

Standard preparation depends on the equipment used.

a) ICP-OES and AAS

- Sample solutions obtained from aqua regia digestion have a different matrix composition to solutions obtained by microwave digestion. Therefore different matrix matching for calibration is necessary. Standards prepared for ICP-OES can also be used for AAS measurement as long as target element concentrations of Pb and Cd are

in the linear range. A calibration blank and four calibrants are prepared as calibration solutions.

- Aqua regia digestion standards
 - Calibration blank: 100 ml 10 % (m/m) HCl (10.3.e).
 - Calibrants 1 to 3 (100 ml in each case): Solutions containing 1 500 µg/ml Fe and 1 500 µg/ml Cu, 24 ml HCl (10.3.b) and target elements Pb and Cd in different concentrations. 1,0 µg/ml target element in solution corresponds to 125 µg/g target element in electronics.
- Microwave digestion standards
 - Calibration blank: Mixture of 92 ml 10 % (m/m) HCl (10.3.e) and 8 ml HBF₄ 50 % (m/m) (10.3.j).
 - Calibrants 1 to 3 (100 ml in each case): solutions containing 1 500 mg/l Fe and 1 500 mg/ml Cu, 24 ml HCl (10.3.e), 8 ml HBF₄ 50 % (m/m) (10.3.j) and Pb and Cd in different concentrations. 1,2 µg/g target element in solution corresponds to 100 µg/g target element in electronics.

NOTE If HBF₄ is not available in sufficient purity, HF can be used instead.

b) ICP-MS

- Calibration blank and three calibrants are prepared as calibration solutions.
- After gradually diluting each standard element solution, the solutions are transferred to 100 ml volumetric flasks (10.2.j.2) with 0 µg to 5 µg of each element. Next, each reagent and 1 µg of Rh are added to achieve reagent concentrations identical to that of the sample solution, and the mixed calibrant solution is prepared.

10.5.3 Calibration

Calibration depends on the equipment used.

a) ICP-OES and AAS

- The calibration blank and standard solutions are measured by ICP-OES or AAS and linear calibration plots for Pb and Cd are set up.

b) ICP-MS

- The ICP mass spectrometer is prepared for quantification. Some of the solution obtained in 10.5.1 is nebulized into the argon plasma through the sample holder. The readings for the m/z of the target elements and Rh are determined, and the ratio of the reading for the target element and the reading for the Rh is calculated.
- The hydrofluoric acid-resistant sample introduction system shall be used when the sample contains HBF₄ or HF.

10.5.4 Development of the calibration curve

Development of the curve depends on the equipment used.

a) ICP-OES

- A part of the calibration solutions prepared as described in 10.5.1 is introduced into the argon plasma in ICP-OES under optimized conditions to measure the intensities of the atomic spectra lines of each target element. In the calibration method (matrix matching method), the curve showing the relationship between the intensities of the atomic spectra lines and the concentration is developed as the calibration curve. In the internal standard method, the curve showing the relationship between the intensity ratio and the concentration of the target element with respect to the internal standard element is developed as the calibration curve.
- A hydrofluoric acid-resistant sample introduction system and torch shall be used when the solution contains hydrofluoric acid.

- The recommended wavelength is selected from the spectral lines for each element. The wavelength shall be selected with regard to typical measurement wavelengths for the elements shown in Table H.2. A thorough study of the limit of detection, measurement precision, etc. shall be conducted. In the case of interference from co-present substances, either a wavelength that does not interfere with the calibration range shall be selected or adjustments have to be made to the intensity of interference using a suitable method.

b) ICP-MS

- The ICP-MS is prepared for quantification. Some of the solution obtained in 10.5.1 is nebulized into the argon plasma through the sample holder. A hydrofluoric acid-resistant sample holder shall be used when the solution contains hydrofluoric acid. The readings for the m/z of the target elements and the internal standard element are determined, and the ratio of the reading for the target element and the reading for the internal standard element is calculated. The mass-charge ratios may be defined on the basis of the measured mass numbers listed in Annex H.

c) AAS

- Portions of the calibration solutions prepared as described in 10.5.1 are introduced into the air-acetylene flame in the AAS under optimized conditions to measure the absorption of the wavelength of each target element. In the calibration method (matrix matching method), the curve showing the relationship between the absorption of the wavelength and the concentration is developed as the calibration curve.
- The wavelengths shall be selected with regard to typical measurement wavelengths for elements shown in Table H.4. In case of interference from co-present substances, either a wavelength that does not interfere with the calibration range has to be used or adjustments have to be made to the intensity of interference using a suitable method.

10.5.5 Measurement of the sample

After the calibration curve has been plotted, the calibration blank and the sample solution are measured. If the sample concentration is higher than that of the calibration curve, the solution shall be diluted to the range of the calibration curve and measured once again.

The measurement precision is checked against the standard substance, calibration solution, etc., at regular intervals (such as once every 10 samples). If necessary, a calibration curve is developed again.

A straight-line regression curve with a correlation (R^2) not less than $<0,998$ shall be used for initial calibration. In the event that the calibrant result differs from the expected value by more than 20 %, the calibration and all samples in the sequence shall be re-measured.

10.5.6 Calculation

The spectrometer readings of each sample obtained according to 10.5.3 and the calibration curve developed as described in 10.5.4 are used to determine the net spectral intensity of each target element. The content rate of each element in the sample is calculated by the following equation:

$$c = \frac{(A_1 - A_2)}{m} \times V \quad (5)$$

where

- c is the concentration of Pb or Cd in the sample, in $\mu\text{g/g}$;
- A_1 is the concentration of Pb or Cd in the sample solution, in mg/l ;
- A_2 is the concentration of Pb or Cd in the laboratory reagent blank, in mg/l ;
- V is the total volume for the sample solution in ml which depends on the particular series of dilutions made;

m is the measured quantity of the sample, in g.

NOTE Due to the potential variation in analytical methods according to this clause, allowing individual dilutions of the starting test sample solution, Equation (5) only gives the general approach. It must be assured individually that all dilutions have been taken into account in the calculation of the result.

10.6 Evaluation of the method

As described in detail in 4.5 instrument detection limits are generally quite low (sometimes very low), but do not represent the true LODs of a methodology applied to the analysis of real samples. In order to overcome this somewhat theoretical approach (see 10.1), IEC TC111 WG3 carried out several international interlaboratory studies (IIS).

In these studies, CRMs, donated samples of known composition and real samples were analysed according to the analytical procedures described in this clause. The result gave an overview of the practically achievable LODs, and – even more important – of the precision and accuracy of the analytical procedures in routine analytical work.

For the methods described in this clause, very few samples were available. A precise statistical evaluation of accuracy, precision and LOD could not be done. The IIS revealed that, similar to Clauses 8 and 9, $\pm 20\%$ for precision and accuracy is a good estimate for amounts of Pb and Cd above 10 mg/kg, regardless of the particular method or equipment chosen.

Annex A (informative)

Determination of PBB and PBDE in polymers by GC-MS

A.1 Introductory remark

This annex specifies a gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) test method for the determination of monobrominated to decabrominated biphenyls (PBB) and monobrominated to decabrominated diphenyl ethers (PBDE) in polymers of electrotechnical products having PBB and PBDE contents in the range of 100 mg/kg to 2 000 mg/kg and as high as 100 000 mg/kg for decaBDE.

This test method has been evaluated for PS-HI (polystyrene, high-impact), (PC+ABS) (a blend of polycarbonate and acrylonitrile butadiene styrene) and ABS (acrylonitrile butadiene styrene). The use of this method for other types or concentration ranges outside those specified above has not been evaluated.

PBB and PBDE compounds are determined using Soxhlet extraction of the polymers with separation by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) qualitatively and quantitatively using single (or “selected”) ion monitoring (SIM).

A.2 Apparatus, equipment and materials

A.2.1 Apparatus

The following items shall be used for the analysis:

- a) Analytical balance capable of measuring accurately to 0,000 1 g.
- b) 1 ml, 5 ml, 10 ml, 100 ml volumetric flasks.
- c) Soxhlet extractors:
 - 30 ml Soxhlet extractors;
 - 100 ml round-bottomed flask;
 - ground-in stopper NS 29/32;
 - Dimroth condenser NS 29/32;
 - boiling stones (e.g. glass pearls or Raschig rings).
- d) Extraction thimble (cellulose, 30 ml, ID 22 mm, height 80 mm).
- e) Glass wool (for extraction thimble).
- f) Deactivated injector liner (for GC-MS).
- g) Heating jackets.
- h) Funnel.
- i) Aluminium foil.
- j) Cork rings.
- k) Microlitre syringe or automatic pipettes.
- l) Pasteur pipette.
- m) 1,5 ml sample vials with 100 µl glass insert and a screw cap with polytetrafluoroethylene (PTFE) gasket or, depending on the analytical system, a comparable sample receptacle.
- n) Mini-shaker (also known as vortexer or vortex mixer).

A.2.2 Equipment

A gas chromatograph with a capillary column coupled to a mass spectrometric detector (electron ionization, EI) is used for the analysis. The mass spectrometric detector shall be able to perform selective ion monitoring and have an upper mass range of at least 1 000 m/z. The high-range mass is required to unambiguously identify decaBDE and nonaBDE. The use of an autosampler is strongly recommended to ensure repeatability.

A column length of approximately 15 m has sufficient separation efficiency for PBB and PBDE compounds.

A.3 Reagents

All chemicals shall be tested for contamination and blank values prior to application.

- a) Toluene (GC grade or higher).
- b) Helium (purity of greater than 99,999 % (v/v)).
- c) Technical BDE-209 with BDE-209 ~ 96,9 % and BDE-206 ~ 1,5 % solution.
- d) PBB and PBDE calibrants (see Clause A.10).
- e) Surrogate and internal standards:
 - Surrogate standard used to monitor analyte recovery according to A.5.1, A.5.3, A.6.1, A.6.2 and Clause A.8, e.g. DBOFB (4, 4'-dibromooctafluorobiphenyl) (n) or ¹³C-labelled pentaBDE or octaBDE standard.
 - Internal standard used to correct for injection errors, according to A.5.1, A.5.4, A.6.2, and Clause A.8, e.g. CB209 (2,2',3,3',4,4',5,5',6,6'-decachlorobiphenyl).

NOTE 1 The standards are acceptable when using a quadrupole-type mass spectrometer. A high-resolution mass spectrometer will require the use of other suitable standard substances having a mass and elution time similar to that of the analyte. ¹³C-labelled nonaBDE and ¹³C-labelled decaBDE are recommended for the high-mass PBDEs.

NOTE 2 The standards suggested are adequate for measuring the concentrations of mono- through octaBDE. Due to their low mass and "high" volatility, these standards may be inadequate for measuring decaBDE and nonaBDE concentrations. By far the best calibration standard for these specific analytes would be ¹³C-labelled decaBDE or one of the ¹³C-labelled nonaBDEs. Some laboratories, operating on the principal of high volume/low price, may find these labelled materials too expensive for their business plan. A potential low-cost substitute is decaBB (BB 209). BB 209 has a high mass (943,1 g/mol vs. 959,1g/mol for decaBDE or 864,2 g/mol for nonaBDE), which elutes just before the three nonaBDEs on a typical DB-5 column. The presence of significant quantities of decaBB in the sample itself can readily be determined by monitoring the peak area of this standard, and comparing it to what is expected from the added quantity of decaBB. The use of the suggested labelled standards or decaBB should be limited to those analyses where the only analytes of interest are decaBDE and/or the nonaBDEs. With additional experimentation it may be possible to identify alternate standards that have the high mass and low volatility necessary for the quantification of the nonaBDEs and decaBDE.

A.4 General instructions for the analysis

The following general instructions shall be followed:

- a) In order to reduce blank values, ensure the cleanliness of all glass equipment (excluding volumetric flasks) and deactivate glass wool (A.2.1.e) at 450 °C for at least 30 min. To avoid decomposition (debromination) of PBDEs by UV light during extraction and analysis, glass equipment made from brown glass shall be used, if possible. If no brown glass is available, aluminium foil can be used for protection from light.
- b) If the amount of Br determined by XRF is considerably above the 0,1 % range, it will be necessary to carry out the analysis using an adjusted sample size or by repeating the analysis using an extract that has been appropriately diluted prior to internal standard addition.

A.5 Sample preparation

The samples shall be ground to pass through a 500 µm sieve before extraction. Cryogenic grinding with LN₂ cooling is strongly recommended.

A.5.1 Stock solutions

The following stock solutions shall be prepared:

- Surrogate standard (to monitor analyte recovery): 50 µg/ml in toluene (A.3.a) (e.g. DBOFB).
- Internal standard (to correct for injection error): 10 µg/ml in toluene (A.3.a) (e.g. CB209).
- Polybrominated biphenyl (PBB) solution: 50 µg/ml in an organic solvent.
- Polybrominated diphenyl ether (PBDE) solution: 50 µg/ml in an organic solvent.
- Matrix spiking solution: Containing a total of 4 calibration congener standards in toluene (A.3.a) or other appropriate solvent (see A.5.3) as indicated in Table A.1.

Table A.1 – Matrix spiking solution

Bromination	Number of PBDE congeners	Number of PBB congeners
Mono to penta	1	1
Hexa- to deca-	1	1

The addition of 1 ml of a matrix spiking solution containing each of the four congeners in a concentration of 10 µg/ml is suitable for delivery of the required 10 µg (see A.8.1.b) in the matrix spike sample.

A.5.2 Pre-extraction of the Soxhlet extractors

To clean the Soxhlet extractors (A.2.1.c), a 2 h pre-extraction is carried out with 70 ml of the appropriate solvent (see A.5.3). The washing solvent is discarded.

A.5.3 Sample extraction

The following steps shall be followed for sample extraction:

- Transfer 100 mg ± 10 mg of the sample into the extraction thimbles (A.2.1.d). Record the mass to the nearest 0,1 mg.
Toluene (A.3 a) shall be used as the extraction solvent.
- The sample is transferred through a funnel (A.2.1.h) into the extraction thimble (A.2.1.d). In order to ensure a quantitative transfer, the funnel (A.2.1.h) is rinsed with approximately 10 ml of solvent.
- 200 µl of the surrogate standard (A.5.1.a) (50 µg/ml) is added (in accordance with A.5.1).
- In order to prevent the sample from floating, the thimble (A.2.1.d) is closed with glass wool (A.2.1.e). Approximately 60 ml of solvent is placed in the 100 ml round-bottomed flask (A.2.1.c), the equipment is covered with aluminium foil (A.2.1.i) to exclude light and the sample is extracted for at least 2 h with each cycle being approximately 2 min to 3 min. Shorter extraction times may result in lower recoveries of the analytes, particularly the higher molecular mass PBDEs.
- The extract is placed in a 100 ml volumetric flask and the round-bottomed flask (A.2.1.c) is rinsed with approximately 5 ml of solvent.

NOTE If the solution exhibits turbidity due to the matrix, this can be reduced by adding 1 ml of methanol. The difference between the density of methanol and toluene (A.3.a) can be disregarded in this case in the calculation.

- The volumetric flask is filled with 100 ml of solvent.

For a soluble polymer sample, the alternative extraction procedure may be applied as described in Clause A.11.

A.5.4 Addition of the internal standard (IS)

Prepare a 1 ml aliquot of each sample and standard to be analysed and place it in a 1 ml auto sampler vial. Add 20 µl of internal standard solution (A.5.1.b) to the vial and cap the vial. Invert the vial two times to mix.

Inject 1 µl of the sample solution into the GC-MS and analyse it according to the parameters described in Clause A.7.

A.6 Calibration

A calibration curve shall be developed for quantitative analysis. At least five calibration solutions shall be prepared in equidistant concentration steps. Quantification is made on the basis of the measurement of the peak areas. The linear regression fit of each calibration curve is required to have a relative standard deviation (RSD) of less than or equal to 15 % of the linear calibration function.

NOTE If the limiting value of the RSD of 15 % is exceeded, from the point of view of quality assurance, 2nd order curve fitting does not guarantee any significantly better adjustment. Only statistical tests such as the F-test fulfil these requirements by comparing linear/2nd order. That means that although the RSD value is exceeded, the calibration is linear.

A.6.1 PBB (1 µg/ml for each congener), PBDE (1 µg/ml for each congener) and surrogate standard (1 µg/ml) stock solution

100 µl of each PBB (A.5.1.c) and each PBDE (A.5.1.d) stock solution (50 µg/ml) and 100 µl of the surrogate stock solution (A.5.1.a) (50 µg/ml) is placed in a 5 ml volumetric flask (A.2.1.b) in accordance with A.5.1 and filled up with solvent up to the mark.

A.6.2 Calibration

The following calibration solutions are produced from the stock solution of the PBB (1 µg/ml for each congener), PBDE (1 µg/ml for each congener) and surrogate standard (0,2 µg/ml) (see A.6.1). The volumes indicated in Table A.2 are placed in a 1 ml volumetric flask (A.2.1.b) with a pipette and filled with solvent up to the mark, and then 20 µl of 10 µg/ml internal standard solution (A.5.1.b) is added.

NOTE For decaBDE, the calibration range suggested in Table A.2 may have to be modified. When establishing a calibration curve for decaBDE, the lower range should be set according to the instrument's sensitivity. A higher concentration may be used for the upper range to account for the generally high (10 % to 12 % (m/m)) levels of decaBDE normally found in samples.

Table A.2 – Calibration solutions of PBBs and PBDEs

No.	Volume PBB+PBDE+ surrogate µl (see A.6.1)	Volume internal standard µl (see A.5.1)	c(PBB) c(PBDE) ng/ml per congener	c(Surrogate) ng/ml
1	50	20	50	50
2	150	20	150	150
3	250	20	250	250
4	350	20	350	350
5	450	20	450	450

The internal standard is used for the correction of the injection error. Therefore the evaluation of the response factor or ratio is carried out by A/A_{IS} .

To produce the calibration straight lines the response A/A_{IS} is plotted against the concentration ratio c/c_{IS} .

A linear regression is carried out using Equation (A.1):

$$\frac{A}{A_{IS}} = a \times \frac{c}{c_{IS}} + b \quad (\text{A.1})$$

where

A is the peak area of PBB, PBDE or the surrogate in the calibration solution;

A_{IS} is the peak area of the internal standard;

c is the concentration of PBB, PBDE or the surrogate per congener (ng/ml);

c_{IS} is the concentration of the internal standard (ng/ml).

NOTE 1 It is common practice to set the internal standard concentration to 1,00 ng/ml for the internal standard methods when the amount and concentration of internal standard added to the sample and calibrants prior to injection are the same.

a is the slope of the calibration curve;

b is the intercept on the y-axis of the calibration curve.

NOTE 2 A polynomial (e.g. second-order) regression may be utilized in the event that the relative standard deviation curve requirements cannot be achieved using linear regression. All quality control requirements are still in effect when using polynomial regression.

A.6.3 Calculation of PBB and PBDE concentration

Quantify the samples using the calibration curve. The instrument software usually performs the quantification. Normally, the calibration level of internal standard for all five calibration levels are set to 1 in the instrument method, but it can also be done manually using the equation of the fit from the calibration.

For a linear fit, the equation takes the form of:

$$y = ax + b \quad (\text{A.2})$$

where

y is the response factor or ratio (A/A_{IS}) for the congener in the sample;

a is the slope of the line that best fits the calibration obtained in Equation (A.1);

x is the instrumental result (c/c_{IS} where c_{IS} is commonly = 1) in ng/ml (the concentration of the congener in the extract);

b is the y intercept or the concentration when the response factor equals 0, obtained from Equation (A.1);

For a quadratic fit the equation takes the form of:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (\text{A.3})$$

where

y is the response factor or ratio (A/A_{IS}) for the congener in the sample;

a and b are constants that correspond to the curve that best fits the calibration;

- x is the instrumental result in ng/ml (the concentration of the congener in the extract);
- c is the y intercept or the concentration when the response factor equals 0.

Equation (A.1), which is in the form of a linear equation, can be rewritten in the form of Equation (A.4):

$$c = \left(\frac{A}{A_{IS}} - b \right) \left(\frac{c_{IS}}{a} \right) \quad (\text{A.4})$$

where

- A is the peak area of PBB, PBDE or the surrogate;
- A_{IS} is the peak area of the internal standard ;
- c is the (intermediate) concentration of PBB, PBDE or the surrogate per congener in ng/ml;
- c_{IS} is the concentration of the internal standard in ng/ml.

NOTE 1 It is common practice to set the internal standard concentration to 1,00 ng/ml for the internal standard methods when the amount and concentration of internal standard added to the sample and calibrants prior to injection are the same.

- a is the slope of the calibration curve;
- b is the intercept on the y-axis of the calibration curve.

NOTE 2 A polynomial (e.g. second-order) regression may be utilised in the event that the relative standard deviation curve requirements cannot be achieved using linear regression. All quality control requirements are still in effect when using polynomial regression.

If the concentration of each congener in a sample does not fall within the range of its respective calibrants, prepare a serial sample dilution that will bring the concentration of the congener to the midpoint of the calibration. Analyse the dilution and use the dilution factor to quantify the concentration of those congeners that were not within the calibration range in the original analysis. The dilution factor (D) can be calculated by dividing the final volume of the dilution by the volume of the aliquot:

$$D = \frac{V_f}{V_a} \quad (\text{A.5})$$

where

- D is the dilution factor;
- V_f is the final volume in ml;
- V_a is the volume of the aliquot in ml.

Equation (A.4) does not give the final concentration as the volume of the organic solvent, the mass of the sample and the volume of the extract and any dilution factor needs to be taken into account. A conversion factor (F) for the units from ng to μg is also needed. The final concentration of PBB, PBDE or the surrogate per congener in the sample can be calculated by using Equation (A.6):

$$c_{\text{final}} = \left(\frac{A}{A_{IS}} - b \right) \times \frac{c_{IS}}{a} \times \frac{V}{m} \times F \quad (\text{A.6})$$

where

- c_{final} is the concentration of PBB, PBDE or the surrogate per congener in the sample in $\mu\text{g/g}$;

- V is the final extraction volume (100 ml);
 m is the mass of the sample in grams;
 F is a conversion factor for ng to μg (1×10^{-3}).

NOTE 3 Based on the experience of interlaboratory comparison, when calculating the PBDE concentrations in the sample, a potential blank value (according to 7.6.1.a) should be taken into account.

NOTE 4 The calculation shown above is for linear regression calibration only. A separate calculation is required if polynomial regression calibration is utilized.

The results are the sum of the concentration of each PBB (total PBBs) and the sum of the concentrations of each PBDE (total PBDEs).

The total PBDEs or the total PBBs can be calculated by summing the measured concentrations of all of the signals that meet the requirements for identification as a PBDE or PBB. The PBBs and the PBDEs that are included in the total shall include all the signals that meet the identification requirements (proper mass, appropriate retention time, correct ion ratios) for a PBB or a PBDE. The PBBs and PBDEs included in the totals shall not be limited only to those used in the calibration solutions since most entities are interested in the concentration of the total PBBs and total PBDEs, not specific isomers.

The calibration solutions can be used to establish an average response factor for each degree of bromination within the PBDEs and PBBs. The average response factors can then be used in the calculation of the measured concentration of detected congeners in the sample that are not included in the calibration (e.g. tentatively identified compounds or "TICS", see also end of Clause A.7). Automatic integration of signals meeting the criteria for a PBB or a PBDE is a common function of software used in GC-MS trace analysis so the reporting of all PBBs and PBDEs in the totals is not a particularly onerous burden.

The PBDEs isolated from the sample extraction in A.5.3 are quantified by adding the internal standard (CB 209) (A.5.1.b) to an extract aliquot, injecting the solution into the GC-MS, measuring the area of the analyte peak(s) and the area of the CB 209 peak, and calculating the concentration of the analyte according to the formula given in A.6.3. Data on the surrogate standard (DBOFB) (A.5.1.a) are not used in the formula and are not used in any way to calculate the analyte concentration(s).

Only quantifiable values shall be summed. It is pointless to include limits of detection for concentrations of non-detected or non-quantifiable analytes, since these values would be so low as to render the numbers meaningless. In the event that there are no PBDEs or no PBBs detected in the sample, the total PBDE (or PBB) shall be reported as a function of the congener(s) with the highest method detection limits as determined in A.8.2. For example, if the method detection limit was 20 mg/kg for decaBB and 10 mg/kg for all other PBBs, and no PBBs were found in the sample, the total PBB is to be reported as <20 mg/kg.

It is important to remember that the measured concentration of decaBDE shall be reported separately from the total PBDEs since it is not a regulated substance and the determination of its concentration is solely for information purposes.

A.7 GC-MS

Different conditions might be necessary to optimize a specific GC-MS system to achieve effective separation of all calibration congeners and meet the QC and MDL requirements. The following parameters have been found suitable and are provided as an example:

- a) GC column: non-polar (phenyl-arylene-polymer equivalent to 5 % phenyl-methyl-polysiloxane), length 15 m; internal diameter 0,25 mm; film thickness 0,1 μm . A high-temperature column (maximum = 400 °C) shall be used for the stated GC conditions in the method.

b) PTV, cool on-column, split/splitless injector or comparable injections systems can be used. The following parameters are recommended/optional:

- PTV programme: 50 °C to 90 °C (0 min) at 300 °C/min to 350 °C (15 min); modus: splitless purge time 1 min; purge flow 50 ml/min.

NOTE 1 The initial temperature needs to be adjusted by the operator, depending on the boiling point of the solvent used.

NOTE 2 The use of an on-column injector can also be suggested as another means of introducing the sample. This may be particularly beneficial for the sensitivity of heavier congeners like octaBDE and nonaBDE. However, caution is advised due to sensitivity to matrix effects.

- Split/splitless programme: 280 °C, 1,0 µl splitless, 0,5 min splitless time. Total flow = 54,2 ml/min at 0,5 min.

c) Injector liner: 4 mm single bottom taper glass liner with glass wool at bottom (deactivated).

NOTE 3 Additional deactivation of a purchased deactivated injector liner can be performed. This is especially important if the "PR-206" quality control requirements in Clause A.8 cannot be achieved. An example of a chemical deactivation procedure is as follows: take a commercially available, factory-deactivated liner (split/splitless single-taper with glass wool at the bottom) and immerse it in 5 % dimethyldichlorosilane (DMDCS) in dichloromethane or toluene (A.3.a) for 15 min. Pick it up with forceps and drain and immerse it three times in the DMDCS to make sure the glass wool has been thoroughly covered and flushed. Drain once more and blot the residue solution onto a clean wiper. Immerse the liner in methanol for 10 min to 15 min, and again drain/immerse three times. Rinse it inside and out with methanol from a squeeze bottle, followed by dichloromethane from a squeeze bottle. Transfer the liner to a vacuum oven purged with nitrogen and dry it at 110 °C for at least 15 min. Once dry it is ready for use.

d) Carrier: helium (A.3.b), 1,0 ml/min, constant flow.

e) Oven: 110 °C for 2 min, 40 °C/min ramp to 200 °C; 10 °C/min ramp to 260 °C; 20 °C/min ramp to 340 °C for 2 min.

f) Transfer line: 300 °C, direct.

g) Ion source temperature 230 °C.

h) Ionization method: electron ionization (EI), 70 eV.

i) Dwell time: 80 ms.

NOTE 4 To achieve the required data quality for a PBB or PBDE GC peak, it is recommended that 3 to 4 scans of the quantification ions selected be acquired per second. This will give the appropriate dwell time for each ion (m/z) to be monitored. The scan rate will result in a dwell time in the range of 80 ms per ion. It should be noted that by default some software sets the dwell time as a function of the scan rate. The analysis of PBBs and PBDEs is carried out in SIM (single ion monitoring) modus with the mass traces (the bold mass traces have been used for quantification) given in Tables A.3 and A.4. These have been found suitable and are provided as examples.

Table A.3 – Reference masses for the quantification of PBBs

	Ions (m/z) ^a monitored in the extract		
Mono-BB	231,9^b	233,9	
Di-BB	309,8	311,8	<u>313,8^c</u>
Tri-BB	387,8	389,8	<u>391,8</u>
Tetra-BB	307,8	309,8	<u>467,7</u>
Penta-BB	385,7	387,7	<u>545,6</u>
Hexa-BB	465,6	467,6	<u>627,5</u>
Hepta-BB	543,6	545,6	<u>705,4</u>
Octa-BB	623,5	625,5	<u>627,5</u>
Nona-BB	701,4	703,4	<u>705,4 (863,4)</u>
Deca-BB	781,3	783,3	<u>785,3</u> (943,1;215,8, 382,6; 384,5)
^a Brackets () = optional ions. ^b Bold = Quantification ions. ^c Underlined = Identification ions.			

Table A.4 – Reference masses for the quantification of PBDEs

	Ions (m/z) ^a monitored in the extract		
Mono-BDE	247,9	249,9	
Di-BDE	325,8	327,8	<u>329,8^c</u>
Tri-BDE	403,8	405,8	<u>407,8</u>
Tetra-BDE	323,8	325,8	<u>483,7</u>
Penta-BDE	401,7	403,7	<u>561,6</u>
Hexa-BDE	481,6	483,6	<u>643,5</u>
Hepta-BDE	559,6	561,6	<u>721,4</u>
Octa-BDE	639,5	641,5	<u>643,5 (801,3)</u>
Nona-BDE	717,4	719,4	<u>721,4 (879,2)</u>
Deca-BDE	797,3	799,3	<u>959,1</u>
^a Brackets () = optional ions. ^b Bold = Quantification ions. ^c Underlined = Identification ions.			

A full scan run using a total ion current (“full scan”) MS method for each sample is also recommended for checking for the existence of peaks/congeners not present in the calibration (tentatively identified compounds or “TICS”) or not seen in the SIM window. If present, identify the peak and determine the class of compound (e.g. octabromobiphenyl, pentabromodiphenyl ether, etc.) by evaluation of the total ion spectra.

A.8 Quality control

At least annually (or any time instrumental parameters are changed), a 5 µg/ml solution of technical decaBDE (BDE-209, e.g. Wellington Laboratories Cat. # TBDE-83R or equivalent with BDE-209 ~ 96,9 % and BDE-206 ~ 1,5 %) with internal standard shall be analysed to confirm that the GC-MS system and parameters are suitable for the accurate determination of nonaBDEs in the presence of BDE-209 and to demonstrate that congener degradation is not

occurring. After the concentration (in µg/ml) of BDEs 206 and 209 measured in the injection solution is measured, the 206 / (206 + 209) per cent ratio ("PR - 206") is calculated as shown below.

$$PR = \frac{c_A}{c_A + c_B} \times 100 \tag{A.7}$$

where

PR is the per cent ratio, "PR-206";

c_A is the measured concentration of BDE-206 in µg/ml;

c_B is the measured concentration of BDE-209 in µg/ml

Table A.5 gives an example calculation.

Table A.5 – Example calculation

BDE congener	Theoretical injection concentration µg/ml	Measured concentration µg/ml	PR-206 %
BDE-209	4,845	5,200	(0,107 / 5,307) × 100 = 2,01
BDE-206	0,076	0,107	
Total		5,307	

A calculated PR-206 in the injection <4,0 is acceptable and samples can be tested. A calculated PR-206 >4,0 is unacceptable and samples are not to be tested until this condition is corrected. Effective corrections include replacement of the injection liner, reduction of the injection temperature, reduction of oven temperature or times, etc. New MDL studies are required if the instrumental parameters are changed.

A.8.1 Quality control method

The following steps are taken for the quality control:

- a) One reagent blank shall be extracted with each sequence of samples. The reagent blank is 60 ml of only solvent taken through the entire extraction procedure according to A.5.3 or A.5.4.
- b) One sample per sequence or one every ten samples, depending on the sample load, shall be spiked with 10 µg of each congener in the matrix spiking solution (see A.5.1.e). The following formula shall be used for calculation:

$$R = \frac{C_m - c}{C_s} \times 100 \tag{A.8}$$

where

R is the recovery of each PBB or PBDE congener in %;

c_m is the concentration of each PBB or PBDE congener in the matrix spike in ng/ml;

c is the concentration of each PBB or PBDE congener in the original sample in ng/ml;

C_s is the concentration of PBB or PBDE spike solution in ng/ml.

The per cent recovery for each congener shall be between 50 % and 150 %. The per cent recovery for each matrix spike shall be recorded and tracked in a spreadsheet to determine possible matrix effects in the analysis.

- c) After every tenth sample run and at the end of each sample set, analyse a continuing calibration check standard (CCC). A CCC is an unextracted mid-range calibrant that is analysed as a sample. The per cent recovery for each congener shall be between 70 % and 130 %. If the per cent recovery for any congener in the CCC standard falls outside of this range, the CCC standard should be reinjected within 12 h. If the recovery is still out of range after re-injection of the CCC standard, the analysis is stopped and maintenance shall be performed on the system to return it to optimal operating conditions. All samples injected before the last successful CCC standard may be reported, but all samples after the failing CCC standard shall be re-analysed with a new calibration.
- d) The surrogate recovery shall be monitored for each sample. Per cent (%) surrogate recovery can be calculated by the following:

$$SR = \frac{ms}{10 \mu\text{g}} \times 100 \quad (\text{A.9})$$

where

SR is the surrogate recovery, as a percentage (%);

ms is the total mass μg of surrogate measured in the final sample solution.

Acceptable recovery shall be between 70 % and 130 %. If the surrogate recovery for any sample is outside of these limits, the sample shall be re-analysed. If, after re-analysis, the surrogate recovery is not within these limits, the sample shall be re-extracted and re-analysed.

- e) From the results of the five calibrants (according to A.6.2, Table A.2), calculate the average response (peak area) for the internal standard. The internal standard (IS) response for each sample (according to A.5.4) shall be monitored throughout the analysis and compared to the average. If at any point in the analysis the IS response fluctuates below 50 % or above 150 % of the average, the sample is deemed out of control and shall be re-analysed. If the IS response is still out of range, check the results of the duplicate extract. If both are out of range and biased in the same direction, report data as suspect due to matrix effects.
- f) Samples containing significant concentrations of decaBDE (BDE-209) will have BDE-206 as the dominant nonaBDE, but only trace amounts of the nonaBDE, BDE-208. These qualitative nonaBDE concentrations can be used as an indication of the proper operation of the GC-MS system. The observation that BDE-206 is not the dominant nonaBDE, or the observation that BDE-208 is present in more than trace quantities in relation to the other nonaBDEs, indicates that corrective action is needed to render the instrumentation suitable for the accurate determination of nonaBDEs in the presence of significant concentrations of decaBDE.
- g) A solvent blank run between each injection is recommended in order to be certain that there is no analyte carry-over from sample to sample. This is particularly important when samples containing high levels of decaBDE and/or potentially interfering brominated flame retardants are analysed. Failure to determine that the instrument is free of contaminating analytes may result in falsely elevated results. It is recommended that the solvent shall contain a small amount of silylating agent (BSA, BSTFA) to maintain the inertness of the injector liner.
- h) The retention time of analytes having an identification mass corresponding to BDE-209 and BDE-206 shall be within ± 20 s of the BDE-209 and BDE-206 standards used in the calibration solutions in order to be confirmed as being BDE-209 and/or BDE-206. Peaks eluting outside this range cannot be identified as BDE-209 and/or BDE-206. (Samples containing decaBDE will have BDE-206 as the dominant nonaBDE.) The use of retention times as a confirmation criterion is a widely accepted practice.

A.8.2 Method detection limit and reporting limit

A method detection limit (MDL) study shall be completed before conducting this testing and each time there is a significant change in the method or instrument type. MDLs are defined as the minimum concentration of a substance that can be measured and reported with 99 % confidence from which a qualitative detection of a sample is permissible in a given matrix

concerning the analyte. The MDL is obtained by calculating the standard deviation for a minimum of seven replicate analyses. The standard deviation is then multiplied by the Student's *t* value for the total number of replicates (*n*) for *n*-1 degrees of freedom.

NOTE 1 All analyses used to calculate an MDL should be consecutive.

- a) Mill approximately 2 g of suitable polymer from a pure source known not to contain brominated flame retardants or other compounds that may interfere with the analysis (e.g. polyethylene material BCR-681 or other).
- b) Weigh out 100 mg of the milled polymer and place it in a new extraction thimble (A.2.1.d). Repeat this step six more times.
- c) Place the extraction thimble (A.2.1.d) in the Soxhlet extraction apparatus (A.2.1.c).
- d) Spike the thimble (A.2.1.d) with 5 µg of each calibration congener approximating the concentration of the lowest concentration calibrant.
- e) Use the procedure (extraction according to A.5.3 or A.5.4) to extract each of the samples. Analyse accordingly.
- f) The per cent recovery of each congener shall be between 70 % and 130 %. If the recovery is above or below these limits, the analysis shall be repeated. If the recovery is outside of these limits a second time, the entire extraction and analysis procedure shall be repeated.
- g) Each congener shall have a calculated MDL of less than or equal to 100 mg/kg. If the calculated MDL for any of the congeners is above these limits, the procedure, extraction and analysis shall be repeated for that congener(s).
- h) The reporting limit for each congener shall be, at a minimum, three times the respective MDL. Unlike the MDL, which relates to detection only, the reporting limit is a concentration that can be accurately quantified for a given compound.

NOTE 2 If the required MDL cannot be met, a concentration step can be added to the extraction procedure. Since the concentration step will also increase the resin concentration in the extract, a clean-up step is also recommended for each sample. This will extend the life of the column and reduce the frequency of instrument maintenance. If the concentration and clean-up steps are used in the analysis, they should also be used for the MDL samples.

A.9 Evaluation of the method

The precision and accuracy of the methods, the method detection limit, the way how to ensure these qualities of data and the determination process will be updated here once the suitable amounts of data become available from volunteer laboratories chosen by IEC TC111 WG3.

A.10 PBB and PBDE calibrants

All brominated species from mono- to decabrominated biphenyl (PBB) and mono- to decabrominated diphenyl ether (PBDE) shall be included in the calibration. The availability of congener standards for a particular PBB or PBDE (e.g. pentaBDE) may vary from region to region. The following is an example list of typically available calibration congeners that have been found suitable for this analysis.

Table A.6 – Example list of commercially available calibration congeners considered suitable for this analysis

PBB^a	Compound name
BB-003	4-Bromo biphenyl
BB-015	4,4'-Dibromo biphenyl
BB-029	2,4,5-Tribromo biphenyl
BB-049	2,2',4,5'-Tetrabromo biphenyl
BB-077	3,3',4,4'-Tetrabromo biphenyl
BB-103	2,2',4,5',6-Pentabromo biphenyl
BB-153	2,2',4,4',5,5'-Hexabromo biphenyl
BB-169	3,3',4,4',5,5'-Hexabromo biphenyl
Dow FR-250	Technical mixture of nonabromo biphenyl, octabromo biphenyl (80 %) and heptabromo biphenyl
BB-209	Decabromo biphenyl
PBDE^a	Compound name
BDE-003	4-Bromo diphenyl ether
BDE-015	4,4'-Dibromo diphenyl ether
BDE-033	2',3,4-Tribromo diphenyl ether
BDE-028	2,4,4'-Tribromo diphenyl ether
BDE-047	2,2',4,4'-Tetrabromo diphenyl ether
BDE-099	2,2',4,4',5-Pentabromo diphenyl ether
BDE-100	2,2',4,4',6-Pentabromo diphenyl ether
BDE-153	2,2',4,4',5,5'-Hexabromo diphenyl ether
BDE-154	2,2',4,4',5,6'-Hexabromo diphenyl ether
BDE-183	2,2',3,4,4',5',6-Heptabromo diphenyl ether
BDE-203	2,2',3,4,4',5,5',6-Octabromo diphenyl ether
BDE-206	2,2',3,3',4,4',5,5',6-Nonabromo diphenyl ether
BDE-209	Decabromo diphenyl ether
^a Ballschmitter and Zell classification numbers have been used for PBBs and PBDEs.	

A.11 Alternative extraction procedures for soluble polymers

For a soluble polymer sample, especially PS-HI, the following alternative extraction procedure may be applied:

- a) Weigh 100 mg of sample to the nearest 0,1 mg in an amber vial (at least 2 ml in volume).

NOTE 1 Other sample amounts may be used for samples with potentially very low or very high PBB or PBDE concentrations.

- b) Transfer 9,8 ml of the appropriate solvent to the vial, and record the mass of the mixture.

NOTE 2 The solvent volume may be adjusted accordingly for samples with potentially very low or very high PBB or PBDE concentrations.

- c) Add 200 µl of the DBOFB surrogate standard (A.5.1.a) (50 µg/ml) to the vial and record the new mass. Record the total mass of the sample, solvent, vial and cap.

- d) Tightly cap the sample vial. Place it in an ultrasonic bath and sonicate for 30 min until the sample has been dissolved. A small piece of adhesive tape may be used to prevent the cap from vibrating loose. After the sample is dissolved, allow the vial to cool and record the mass. Verify that the mass is the same as recorded in step c) above.
- e) Transfer 1,0 ml of the solution to a new amber vial (at least 12 ml in volume) and weigh the aliquot to the nearest 0,1 mg.
- f) Choose a non-solvent for the polymer that is a good solvent for PBB/PBDE. Transfer 9,0 ml of the non-solvent to the vial and record the mass of vial and contents to the nearest 0,1 mg.
- g) Allow the polymer to settle out or filter the mixture through a 0,45 µm PTFE membrane. Alternatively, transfer a 1,0 ml aliquot of solution to a 10 ml volumetric flask and weigh the aliquot accurately to 0,1 mg. Bring the volume up to the mark with fresh solvent, record the final mass, and mix well.

NOTE 3 For example, dissolve a sample of PS-HI in toluene (A.3.a), then dilute a 1,0 ml aliquot of the solution with 9,0 ml of isooctane.

- h) If the polymer precipitation step was followed, prepare a 10 % solution of the solvent in the non-solvent and use a calibrated volumetric flask to determine the density of the mixture. Use this density in later calculations.
- i) Prepare a blank extraction and dilution by the same procedure.
- j) Follow the analytical procedures described in A.5.4 and Clauses A.6 and A.7. Calculate the PBB or PBDE concentration in the sample according to A.6.3.

A.12 Examples of chromatograms at suggested GC-MS conditions

Table A.7 shows PBB and PBDE congeners in the mixture used for the examples of chromatograms shown in Figures A.1 to A.3.

Table A.7 – PBB and PBDE congeners in the mixture

PBB congeners	PBDE congeners
B-2 = 3-Bromobiphenyl	BDE-1 = 2-Bromodiphenyl ether
B-10 = 2,6-Dibromobiphenyl	BDE-7 = 2,4-Dibromodiphenyl ether
B-30 = 2,4,6-Tribromobiphenyl	BDE-28 = 2,4,4'-Tribromodiphenyl ether
B-80 = 3,3',5,5'-Tetrabromobiphenyl	BDE-47 = 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl ether
B-103 = 2,2',4,5',6-Pentabromobiphenyl	BDE-99 = 2,2',4,4',5-Pentabromodiphenyl ether
B-169 = 3,3',4,4',5,5'-Hexabromobiphenyl	BDE-100 = 2,2',4,4',6-Pentabromodiphenyl ether
B-194 = 2,2',3,3',4,4',5,5'-OctaBB	BDE-154 = 2,2',4,4',5,6'-Hexabromodiphenyl ether
B-206 = 2,2',3,3',4,4',5,5',6-NonaBB	BDE-183 = 2,2',3,4,4',5',6-Heptabromodiphenyl ether
B-209 = Decabromobiphenyl	BDE-203 = 2,2',3,4,4',5,5',6-Octabromodiphenyl ether
	BDE-206 = 2,2',3,3',4,4',5,5',6-Nonabromodiphenyl ether
	BDE-209 = Decabromodiphenyl ether

The following chromatograms were obtained by using the GC parameters described in Clause A.7.

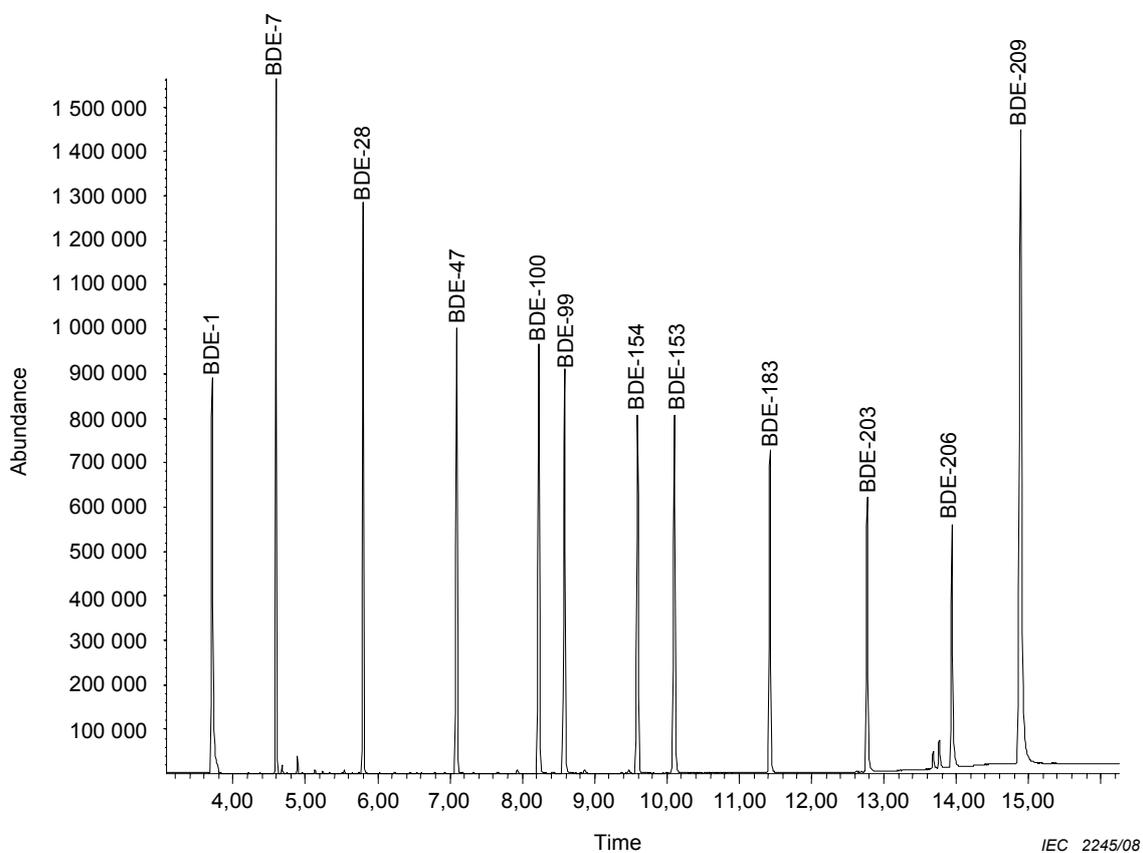
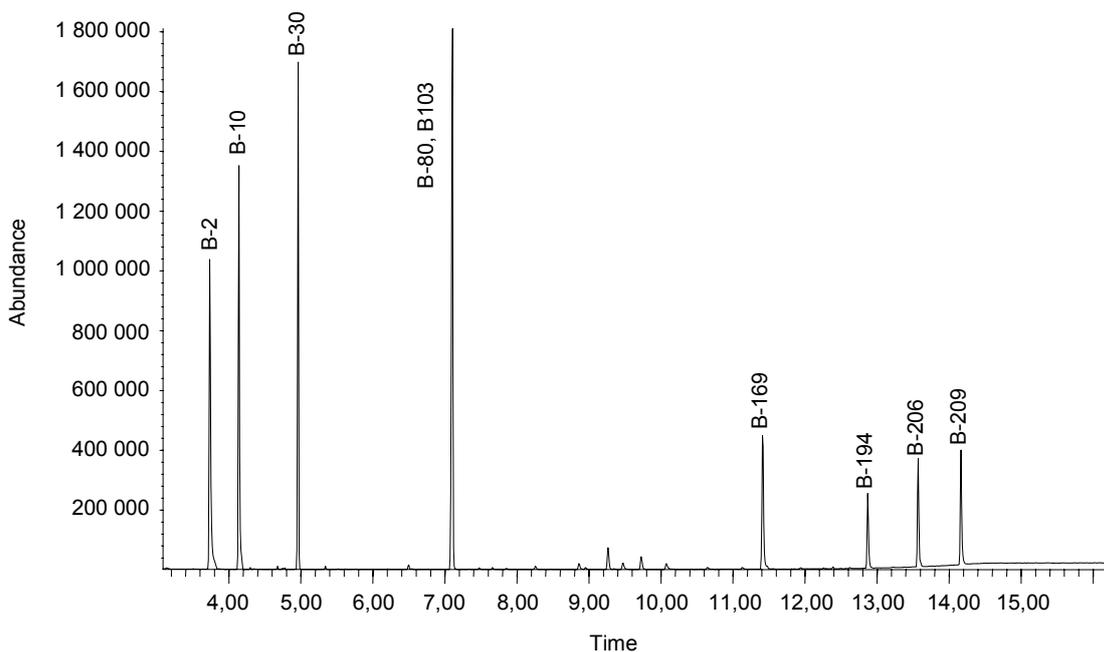
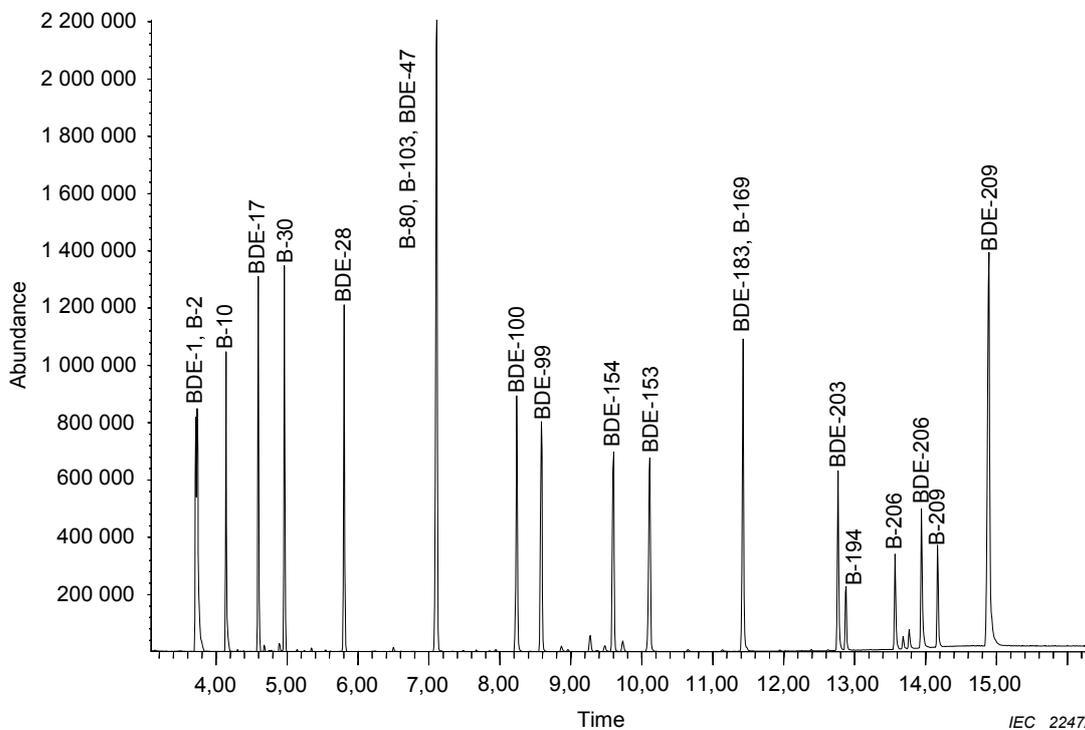


Figure A.1 – Total ion chromatogram of PBDE mixture, BDE-1 to BDE-206 (5 µg/ml), BDE-209 (50 µg/ml)



IEC 2246/08

Figure A.2 – Total ion chromatogram of PBB mixture (3,5 µg/ml)



IEC 2247/08

Figure A.3 – Total ion chromatogram of PBB and PBDE mixtures (BDE-1 to BDE-206 5 µg/ml, BDE-209 5,0 µg/ml, PBBs 3,5 µg/ml)

Annex B (informative)

Test for the presence of hexavalent chromium (Cr(VI)) in colourless and coloured corrosion-protected coatings on metals

B.1 Overview

This method provides procedures for the qualitative determination of the presence of hexavalent chromium (Cr(VI)) in colourless and coloured corrosion-protection coatings on metallic samples. Cr(VI) is toxic to human beings. All potential Cr(VI)-containing samples and reagents used in the method shall be handled with appropriate precautions.

Due to its highly reactive nature, the concentration of Cr(VI) in a corrosion-protection coating layer can change drastically with time and storage conditions. Therefore this method takes a practical and effective approach to qualitatively detecting the presence of Cr(VI) in the coating layer. The samples to be tested shall be stored at ambient conditions and the analytical method described here shall be carried out within 30 days of the coating process. Ambient conditions are defined as 45 % RH to 75 % RH (relative humidity) and temperature between 15 °C and 35 °C. If a sample cannot meet the requirement of being stored at ambient conditions and analysed within 30 days of the coating process, or if a sample has an unknown storage conditions and production date, the analytical result of the sample obtained by following the method described here cannot verify whether Cr(VI) was originally present in the coating layer. The results can only give an indication of the presence/absence of Cr(VI) within the limitations of the method at the time of testing. It shall also be clearly stated in the analytical report.

This method contains two main procedures: the spot-test procedure and the boiling water extraction procedure. The spot-test procedure may be conducted first for its simplicity and ease of use. When the spot-test shows a negative result after finishing all the procedures listed in B.5.1, or an analyst is not certain about the result from a spot-test, or there is colour interference from the background, the boiling water extraction procedure shall be conducted for verification. Colour interference can often be found in coloured corrosion protection coatings and cause a false test result. When the presence of Cr(VI) in a sample is detected using the spot-test procedure or the boiling water extraction method, the sample is considered to have Cr(VI) in the coating layer.

NOTE The Cr(VI) comparison standard solutions used in this method were chosen on the basis of two international inter-laboratory studies (IIS) organized by IEC TC 111 WG3. The test results are expressed in terms of positive and negative for the presence of Cr(VI). Refer to Clause B.6 for details.

Solutions or waste material containing Cr(VI) shall be disposed of properly. For example, ascorbic acid or other reducing agent can be used to reduce Cr(VI) to Cr(III).

B.2 Apparatus, equipment and materials

The following items shall be used for the analysis:

- a) Calibrated balance: analytical balance with an accuracy of 0,1 mg.
- b) Thermometer or other temperature measurement device capable of measuring up to 100 °C.
- c) Colorimetric instrument: either a spectrophotometer for use at 540 nm, providing a light path of 1 cm or longer; or a filter photometer, providing a light path of 1 cm or longer and equipped with a greenish-yellow filter having maximum transmittance near 540 nm.
- d) Labware: all re-usable labware (glass, quartz, polyethylene, polytetrafluoroethylene (PTFE), etc.), including the sample containers, shall be soaked overnight in laboratory-

grade detergent and water (B.3.g), rinsed with water (B.3.g), and soaked for 4 h in a mixture of dilute acids ($\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O} = 1:2:9$ by volume) followed by rinsing with water (B.3.g). Alternative cleaning procedures are permitted, provided adequate cleanliness can be demonstrated through the analysis of method blanks.

- e) Volumetric graduated cylinders: Class A glassware, 100 ml, or equivalent of acceptable precision and accuracy. Alternative volumetric equipment, e.g. automatic dilutors, with acceptable precision and accuracy can be used.
- f) Assorted calibrated pipettes: Class A glassware or equivalent of acceptable precision and accuracy.
- g) Extraction vessel: borosilicate glass or quartz beaker with volume graduation of 250 ml, or equivalent.
- h) Heating device: capable of maintaining boiling of the extraction solution.
- i) Filter membranes (0,45 μm), preferably cellulose-based or polycarbonate membranes.

B.3 Reagents

The following reagents shall be used:

- a) 1,5-diphenylcarbazide, analytical reagent grade.
- b) Potassium dichromate $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ standard solution (containing 400 mg/kg total Cr): In a glass container, dissolve 0,113 g of $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (analytical reagent grade) in water (B.3.g) and dilute with water (B.3.g) to a total mass of 100 g. Cap or stopper the container tightly. The shelf life of this solution is about one year.
- c) $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ standard solution (containing 1 mg/kg total Cr): Into a glass container, measure 0,25 g of the solution from step b) and dilute with water (B.3.g) to a total mass of 100 g. Cap or stopper the container tightly. This solution shall be used within 24 h after preparation.
- d) Acetone, analytical reagent grade.
- e) Ethanol $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (96 % (v/v)), analytical reagent grade.
- f) Orthophosphoric acid H_3PO_4 solution (75 % (m/m)), analytical reagent grade.
- g) Water: Grade 1 specified in ISO 3696, which shall be free of interferences.

B.4 Sample preparation

Prior to the test, the sample surface shall be free of all contaminants, fingerprints and stains. If the surface is coated with thin oil, it shall be removed prior to the test by using a clean, soft laboratory wipe wetted with a suitable solvent, or by rinsing the surface with a suitable solvent at room temperature (not exceeding 35 °C). The samples shall not be subject to forced drying at temperature in excess of 35 °C. Treatment in alkaline solutions shall not be performed as corrosion-protection coatings are broken down by alkalis.

If there is a polymer coating on a sample surface, gentle abrasion with a fine sandpaper, such as a SiC grinding paper with 800 grit size, may be performed to remove the polymer layer, but without removing the corrosion protection coating on the sample. Other coating removal methods may be applied if they are proven to be of equal or greater effectiveness.

B.5 Test procedures

B.5.1 Spot-test procedure

For the spot-test procedure the following steps are carried out:

- a) Dissolve 0,4 g of 1,5-diphenylcarbazide (B.3.a) in a mixture of 20 ml acetone (B.3.d) and 20 ml ethanol (96 % (v/v), B.3.e). After dissolving, add 20 ml of 75 % (m/m)

orthophosphoric acid solution (B.3.f) and 20 ml of water (B.3.g). Prepare this solution no more than 8 h prior to use.

- b) For a metal plate sample, place 1 to 5 drops of test solution (prepared in B.5.1.a) on the sample surface. If Cr(VI) is present, a red to violet colour will appear within a few minutes. The test result is considered as positive. Otherwise, the test result is considered as negative. The colour change or a positive test result can be confirmed by following the procedures described in B.5.1.d) 4th and 5th bullets. Ignore any colour that appears much later, for example on drying

For a fastener sample, e.g. a small screw, place the sample in a small container, such as a test tube, and add 1 to 5 drops of test solution (prepared in B.5.1.a) to the container. If Cr(VI) is present, a red to violet colour will appear within a few minutes. It is easier to observe the colour of test solution by removing the fastener sample from the container and putting the container against a white background.

- c) If the test result is positive, the sample is considered to contain Cr(VI) in the coating layer. No further analysis is required.
- d) If the test result is negative, the following steps shall be carried out:
- Choose an untested area on the sample surface of the metal plate, or choose another fastener sample of the same kind. Apply a gentle rub with an abrasive paper, such as a SiC grinding paper with 800 grit size, to scratch the possibly reduced chromate surface, but without completely removing the whole coating layer.
 - On the newly scratched surface, repeat B.5.b. If the test result is positive, the sample is considered to contain Cr(VI) in the coating layer.
 - If the test result is negative again, repeat the first step of B.5.d with more force to scratch deeper into the coating layer, and repeat the second step of B.5.d. If the test result remains negative upon reaching the substrate, the sample is considered below the limit of detection of Cr(VI) at the time of testing.
 - If the colour developed during the test is difficult for the analyst to judge, place one drop of $K_2Cr_2O_7$ standard solution (containing 1 mg/kg Cr, prepared in B.3.c) on a newly polished bare substrate, and mix it with one drop of test solution (prepared in procedure B.5.1.a). As an alternative, mix equal amounts of $K_2Cr_2O_7$ standard solution (1 mg/kg Cr, prepared in B.3.c) and test solution (prepared in procedure B.5.1.a) in a small container, such as a test tube.
 - Compare the colour obtained from the sample with the colour obtained from the $K_2Cr_2O_7$ standard solution. If the colour obtained from sample is the same or redder than the colour from the standard solution, the spot-test result for the sample is positive. If the colour obtained from the sample is clear (no colour), the test result is negative. If the colour obtained from the sample is less red than the colour from the standard solution but not clear, go to B.5.2.
 - A positive spot-test result indicates the presence of Cr(VI) in the coating. The Cr(VI) concentration detected in the spot-test solution is equal to or greater than 1 mg/kg. However, it shall not be interpreted as the Cr(VI) concentration in the coating layer of the sample and shall not be used as a method detection limit for this qualitative test.
- e) For comparison purposes, test the substrate of the sample similarly. The substrate of the sample can be reached by removing all the coating layers on the sample surface, for example, abrasion with abrasive paper or a file, or by stripping the coating layer with acid solutions.
- f) When the spot-test shows a negative result, or the analyst is not certain about the spot-test result obtained, the boiling water extraction procedure in B.5.2 shall be used to verify the result.

B.5.2 Boiling water extraction procedure

- a) The test solution prepared in B.5.1.a can be used directly in this procedure. An alternative test solution with a much longer shelf life can also be used in this procedure. Prepare the alternative solution as follows. Dissolve 0,5 g of diphenylcarbazide (B.3.a) in 50 ml of acetone (B.3.d). Dilute slowly, while stirring, with 50 ml of water (B.3.g) (rapid mixing may result in precipitation of diphenylcarbazide). For maximum stability, store this test solution

under refrigeration in an amber glass bottle. Discard when the solution becomes discoloured.

- b) The sample to be tested shall have a surface area of $50 \text{ cm}^2 \pm 5 \text{ cm}^2$. For small parts, such as fasteners or samples with irregular surface shapes, use a suitable number of samples to obtain the total required surface area of $50 \text{ cm}^2 \pm 5 \text{ cm}^2$.

NOTE 1 For a sample with a complex shape, its surface area can be estimated according to its manufacturing specifications if available, or by using its dimensions and shape. For example: a flat-headed countersunk screw may be considered as one metal cylinder (the screw body) adjacent to one metal cone (the screw head).

Estimated surface area of the screw body:

$$S_b = 2\pi R_b H_b + 2\pi (R_b)^2 \quad (\text{B.1})$$

where

S_b is the estimated surface area of the screw body;

R_b is the radius of the screw body;

H_b is the height of the screw body.

Estimated surface area of the screw head:

$$S_h = \pi(R_c + R_b)H_h + \pi R_c^2 \quad (\text{B.2})$$

where

S_h is the estimated surface area of the screw head;

R_c is the top radius of the screw head;

H_h is the height of the screw head.

Total estimated surface area of the screw:

$$S_t = S_h + S_b - 2\pi(R_b)^2 \quad (\text{B.3})$$

where

S_t is the total estimated surface area of the screw.

NOTE 2 It may be difficult to obtain a total surface area of $50 \text{ cm}^2 \pm 5 \text{ cm}^2$ for some small electronic parts. In that case, a reduced total sample surface may be used, and the dilution factor is adjusted accordingly. The adjustment should be recorded on the analysis report.

- c) Heat 50 ml of water (B.3.g) in a suitable beaker (with volume graduation) (B.2.d) to boiling, and totally immerse the sample(s) inside the beaker (B.2.d). Cover the beaker (B.2.d) with a watch glass (B.3.d). Leach for $10 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$ while the water continues to boil. Remove the sample(s), and cool the beaker (B.2.d) and its contents to room temperature. If some water evaporates, fill with water (B.3.g) back to 50 ml. If the solution is milky or has a precipitate, filter it through a membrane filter (B.2.i) into a dry beaker (B.2.d). Add 1 ml of orthophosphoric acid solution (8.3.f) and mix well. Pour half (approximately 25 ml) the solution into another dry beaker (B.2.d). Add 1 ml test solution (B.5.1.a or B.5.2.a) to one of the two beakers (B.2.d), mix and observe the colour against the solution in the other beaker (B.2.d), which serves as the blank. A red colour indicates the presence of Cr(VI).
- d) If the colour developed during the test is difficult for the analyst to judge, transfer a portion of the solution to a 1 cm absorption cell (B.2.c). After a reaction time of 2 min, measure the absorbance at 540 nm against the blank with the colorimetric instrument (B.2.c). Make three measurements and take the average as the final absorbance of the sample.
- e) Dilute 1 ml of $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ standard solution (containing 1 mg/kg Cr, prepared in B.3.c) to 50 ml with water (B.3.g). Add 1 ml of orthophosphoric acid solution (B.3.f) and mix well. Add 2 ml test solution (B.5.1.a or B.5.2.a), mix and measure the absorbance three times as above. Take the average of three measurements as the final absorbance of the standard solution.
- f) If the absorbance value obtained in B.5.2.d is equal to or greater than that obtained in B.5.2.e, the sample is considered to be positive for Cr(VI). If not, the test result is negative.

- g) A positive boiling water extraction test result indicates the presence of Cr(VI). The Cr(VI) concentration detected in the boiling water extraction solution is equal to or greater than 0,02 mg/kg with a sample surface area of 50 cm² used. However, it shall not be interpreted as the Cr(VI) concentration in the coating layer of the sample and shall not be used as a method detection limit for this qualitative test.

B.6 Evaluation of the method

The principle of this method was evaluated and supported by two international inter-laboratory studies (IIS) organized by IEC TC 111 WG3. The studies were focused on detecting the presence of Cr(VI) in the corrosion protection coatings on metallic samples. Fourteen international laboratories participated in the first study and twelve in the second study.

The Cr(VI) comparison standard solutions in this method, namely 0,5 mg/kg for spot-test procedures and 0,02 mg/kg for boiling water extraction procedures, were decided on the results from two IIS. Different comparison standard solutions can also be found in other Cr(VI)-related standard method(s), e.g. EN 15205:2006^[49] where a 0,1 µg/cm² threshold is utilized as a qualitative comparison, above which a sample is found to contain Cr(VI). This threshold has not been evaluated under the scope of this method. Also note that different units are used in the different methods.

Annex C (Informative)

Determination of hexavalent chromium (Cr(VI)) in polymers and electronics by the colorimetric method

C.1 Overview

This method describes procedures to measure hexavalent chromium, Cr(VI), quantitatively in samples of polymers and electronic components. This method uses alkaline digestion procedures to extract Cr(VI) from samples. Studies have shown that alkaline solution is more effective than acidic solution in extracting Cr(VI) from water-soluble and water-insoluble samples. Minimal reduction of native Cr(VI) to Cr(III) or oxidation of native Cr(III) to Cr(VI) occurs in the alkaline extraction solution.

The alkaline extraction solution is a mixture of 0,28 mol/l Na_2CO_3 and 0,5 mol/l NaOH. A target sample is digested in the solution at 90 °C to 95 °C for 3 h. The Cr(VI) concentration in the extract is determined by its reaction under acidic conditions with 1,5-diphenylcarbazide. Cr(VI) is reduced to Cr(III) in the reaction with diphenylcarbazide which is oxidized to diphenylcarbazone. The Cr(III) and diphenylcarbazone further form a red-violet-coloured complex in the reaction. The complex solution is measured quantitatively by a colorimeter or a spectrophotometer at 540 nm.

To retard the chemical activity of Cr(VI), the samples and extracts shall be stored until analysis at ambient conditions of 45 % to 75 % relative humidity and 15 °C to 35 °C. Since the stability of Cr(VI) in extracts is not completely understood, the analyses shall be carried out as soon as possible after extraction.

An international inter-laboratory study organized during the development of this method found that Cr(VI) extraction is heavily affected by the sample matrix. The suitability of this method is therefore variable and dependent on the specific compositional matrix of the sample under test. Every sample shall be evaluated by the matrix spike procedure described in C.4.5.2 to determine whether the method is applicable to the target sample and whether the analysis result must be adjusted according to the matrix spike recovery rate. Inter-laboratory study results suggest that this method is suitable for certain polymer sample types, including polyvinyl chloride (PVC) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS), but is not suitable for an ethylene vinyl acetate/polyethylene copolymer (EVAC/PE).

One practical approach to measure the total Cr, including Cr(VI), quantitatively in samples of polymers and electronic components is to use inductively coupled plasma methods (ICP) similar to the methods described in Clauses 8 to 10. However, ICP cannot selectively detect Cr(VI); it determines the amount of total Cr in all chemical forms in the samples.

Possible interferences may be caused by reduction of Cr(VI), oxidation of Cr(III), or colour interference in the colorimetric measurement. The interference parameters may include, but are not limited to, pH, Fe^{2+} , S^{2-} , Mo(VI) and Hg salts.

All potential Cr(VI)-containing samples and reagents used in the method shall be handled with appropriate precautions. Solutions or waste material containing Cr(VI) shall be disposed of properly. For example, ascorbic acid or some other reducing agent can be used to reduce Cr(VI) to Cr(III).

C.2 Apparatus, equipment and materials

C.2.1 Apparatus

- a) Vacuum filtration apparatus.
- b) Heating and stirring device capable of maintaining the digestion solution at temperatures between 90 °C and 95 °C with continuous stirring capability. A polytetrafluoroethylene (PTFE)-coated magnetic stirring rod can be used for polymer samples. However, it is not recommended for ferromagnetic samples, such as those commonly found in metallic and electronic samples. In that case, an overhead stirrer with a PTFE shaft and paddle is recommended.
- c) Calibrated pH meter to read pH range 0 to 14 with an accuracy $\pm 0,03$ pH units.
- d) Analytical balance capable of measurement to 0,1 mg.
- e) Thermometer, thermistor or other temperature measurement device capable of measuring up to 100 °C.
- f) Colorimetric instrument: either a spectrophotometer for use at 540 nm, providing a light path of 1 cm or longer; or a filter photometer, providing a light path of 1 cm or longer and equipped with a greenish-yellow filter having maximum transmittance near 540 nm.
- g) Grinding mill, with or without LN₂ cooling, capable of grinding polymer samples and electronic components.

C.2.2 Equipment

- a) Labware: all re-usable labware (glass, quartz, polyethylene, PTFE, etc.), including the sample containers, shall be soaked overnight in laboratory-grade detergent and water (C.3.n), rinsed with water (C.3.n), and soaked for 4 h in a mixture of dilute HNO₃ and HCl (HNO₃:HCl:H₂O = 1:2:9 by volume) followed by rinsing with water (C.3.n). Alternative cleaning procedures are permitted, provided that adequate cleanliness can be demonstrated through the analysis of method blanks.
- b) Volumetric flasks and graduated cylinders: Class A glassware, 1 000 ml and 100 ml, with stoppers, or equivalent of acceptable precision and accuracy. Alternative volumetric equipment, e.g. automatic dilutors, with acceptable precision and accuracy can be used.
- c) Assorted calibrated pipettes of acceptable precision and accuracy.
- d) Digestion vessel: a suitable borosilicate glass or quartz beaker with volume graduation of 250 ml or equivalent.
- e) Filter membranes (0,45 µm): preferably cellulose-based or PC membranes.
- f) C18 syringe filter cartridge.

C.3 Reagents

- a) Nitric acid: $\rho(\text{HNO}_3) = 1,40$ g/ml, 65 % (m/m), analytical reagent grade or spectroscopic grade. Store at 20 °C to 25 °C in the dark. Do not use concentrated HNO₃ if it has a yellow colour, which is indicative of photoreduction of NO₃⁻ to NO₂, a reducing agent for Cr(VI).
- b) Sodium carbonate: Na₂CO₃, anhydrous, analytical reagent grade. Store at 20 °C to 25 °C in a tightly sealed container.
- c) Sodium hydroxide: NaOH, analytical reagent grade. Store at 20 °C to 25 °C in a tightly sealed container.
- d) Magnesium chloride: MgCl₂ (anhydrous), analytical reagent grade. A mass of 400 mg MgCl₂ is approximately equivalent to 100 mg Mg²⁺. Store at 20 °C to 25 °C in a tightly sealed container.
- e) Phosphate buffer: To prepare a buffer solution at pH 7, dissolve 87,09 g K₂HPO₄ (analytical reagent grade) and 68,04 g KH₂PO₄ (analytical reagent grade) into 700 ml of water (C.3.n). Transfer to a 1 l volumetric flask (C.2.2.a) and dilute to volume. As prepared, the solution will contain 0,5 mol/l K₂HPO₄ and 0,5 mol/l KH₂PO₄.

- f) Lead chromate: PbCrO_4 , analytical reagent grade. Store at 20 °C to 25 °C in a tightly sealed container. This is the solid matrix spike agent.
- g) Digestion solution: Dissolve 20,0 g \pm 0,05 g NaOH and 30,0 g \pm 0,05 g Na_2CO_3 in water (C.3.n) in a 1 l volumetric flask (C.2.2.a) and dilute to the mark. Store the solution in a tightly capped polyethylene bottle at 20 °C to 25 °C, and prepare fresh monthly. The pH of the digestion solution shall be checked before using. If the pH is <11,5, discard the solution and prepare a fresh batch.
- h) Potassium dichromate stock solution: Dissolve 141,4 mg of dry $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (analytical reagent grade) in water (C.3.n) and dilute to 1 l in a volumetric flask (C.2.2.a) (1 ml contains 50 μg Cr).
- i) Potassium dichromate standard solution: Dilute 10 ml potassium dichromate stock solution (C.3.h) with water (C.3.n) to 100 ml in a volumetric flask (C.2.2.a) (1 ml contains 5 μg Cr).
- j) Sulfuric acid, 10 % (v/v): Dilute 10 ml of distilled reagent grade or spectroscopic grade H_2SO_4 to 100 ml with water (C.3.n) in a volumetric flask (C.2.2.a).
- k) Diphenylcarbazide solution: Dissolve 250 mg 1,5-diphenylcarbazide in 50 ml acetone (C.3.o). Store in a brown bottle. Prior to use, check the solution for discoloration. If the solution becomes discoloured, discard it and prepare a fresh batch.
- l) Potassium dichromate, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, spike solution (1 000 mg/l Cr(VI)): Dissolve 2,829 g of dried (105 °C) $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ in water (C.3.n) in a 1 l volumetric flask (C.2.2.a), and dilute to the mark. Alternatively, a 1 000 mg/l Cr(VI)-certified standard solution can be used. Store for use up to six months at 20 °C to 25 °C in a tightly sealed container.
- m) Potassium dichromate, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, matrix spike solution (100 mg/l Cr(VI)): Add 10,0 ml of the 1 000 mg/l Cr(VI) solution made from $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ spike solution (C.3.l) to a 100 ml volumetric flask (C.2.2.a) and dilute to volume with water (C.3.n). Mix well.
- n) Water: Grade 1 specified in ISO 3696, which shall be free of interferences.
- o) Acetone, analytical reagent grade.

C.4 Sample preparation

Samples shall be collected and stored using devices and containers that do not contain stainless steel.

Prior to digestion, polymer samples and electronic components shall be ground into a fine powder (C.2.1.g) with 100 % of the material passing through a 250 μm sieve, e.g. a #60 ASTM standard sieve.

C.5 Test procedure

C.5.1 Extraction

- a) Accurately weigh a sample of 2,5 g. Place the sample into a clean digestion vessel (C.2.2.d).

NOTE 1 Alternative sample amounts may be used for samples with potentially very low or very high Cr(VI) concentrations.

- b) To test for recovery in every matrix, accurately weigh a second sample of 2,5 g (or another chosen amount of sample), and place it into a second, clean digestion vessel (C.2.2.d). Choose a spike solution (C.3.l) or C.3.m) and add it directly to the sample.
- c) To each sample add 50 ml of digestion solution (C.3.g) measured with a graduated cylinder (C.2.2.a).
- d) Next, add 400 mg MgCl_2 dissolved in 0,5 ml of 1,0 mol/l phosphate buffer (C.3.e) to each sample. It is optional to add MgCl_2 to the solution if the analytical techniques used can correct for the possible method-induced oxidation/reduction of chromium.

NOTE 2 For polymer samples that appear to “float” on the surface of the digestion solution, 1 or 2 drops of a wetting agent (e.g. “Triton X”) may be added at this time to increase the sample wetting during digestion. Cover all digestion vessels with watch glasses or plastic covers.

- e) Heat the samples to 90 °C to 95 °C with continuous stirring (C.2.1.b). Then maintain the samples at 90 °C to 95 °C for at least 3 h with constant stirring. After 3 h, cool to room temperature with continued stirring.
- f) Filter through a 0,45 µm membrane filter (C.2.2.e). Rinse the digestion vessel (C.2.2.d) three times with water (C.3.n) with the rinse solution added to the filter (C.2.2.e). If the filter becomes clogged using the 0,45 µm membrane filter, a large pore size filter paper may be used to pre-filter the samples.
- g) Rinse the inside of the filter flask and the filter pad (C.2.2.e) with water (C.3.n) and transfer the filtrate and the rinse solutions to a clean 250 ml vessel (C.2.2.a). Save the solids collected on the filter (C.2.2.e) for possible use in assessing low Cr(VI) matrix spike recoveries. Store the filtered solids at 4 °C ± 2 °C.
- h) With constant stirring while monitoring the pH, add HNO₃ (C.3.a) drop-wise to the 250 ml vessel (C.2.2.a). Adjust the pH of the solution to 7,5 ± 0,5. Remove the stirring device (C.2.1.b) and rinse, collecting the rinse solution in the beaker (C.2.2.a). Transfer the contents of the vessel quantitatively to a 100 ml volumetric flask (C.2.2.a) and fill to the mark with water (C.3.n). Mix well. The digestate is ready for analysis.

C.5.2 Colour development and measurement

- a) Transfer 95 ml of the digestate to be tested to a clean 100 ml vessel (C.2.2.a). Slowly add H₂SO₄ solution (C.3.j) to the vessel and adjust the pH of the solution to 2,0 ± 0,5. If the solution is clear proceed to C.5.2.d. If the solution is turbid, contains a flocculent precipitate (cloudy, flake-like and non-crystalline), or colour is present, proceed to C.5.2.b.
- b) If the solution is turbid or flocculent precipitates are present, filter the sample through a 0,45 µm membrane filter (C.2.2.e) or slow-rate filter paper. If colour is present in the sample solution, filter the solution with a C18 syringe cartridge (C.2.2.f) before adding diphenylcarbazide solution (C.3.k). If the digestate is clear after either filtration step, proceed to C.5.2.d. If the digestate is coloured or turbid after either filtration step, proceed to C.5.2.c.
- c) Transfer each of the turbid digestates quantitatively to a 100 ml volumetric flask (C.2.2.a) and bring to volume with water (C.3.n). Invert several times to mix. Remove approximately 5 ml from the flask and record an absorbance reading after zeroing the UV instrument (C.2.1.f) with the 0,0 µg/ml standard. Add 2,0 ml diphenylcarbazide solution (C.3.k) to each of the turbid digestion solutions, mix and adjust the sample volumes to 100 ml with water (C.3.n). Invert several times to mix and let stand 5 min to 10 min for full colour development. Proceed to C.5.2.d).
- d) Transfer the contents of the vessel quantitatively to a 100 ml volumetric flask (C.2.2.a), add 2,0 ml diphenylcarbazide solution (C.3.k) and adjust the sample volume to 100 ml with water (C.3.n). Invert several times to mix and let stand 5 min to 10 min for full colour development.
- e) Transfer an appropriate portion of the solution to a 1 cm absorption cell and measure its absorbance at 540 nm with a colorimetric instrument (C.2.1.f).
- f) Correct the absorbance reading of the sample by subtracting the absorbance of a blank carried through the colour development procedures. For the filtered solutions in C.5.2.b), correct the absorbance by subtracting the absorbance reading from step C.5.2.c).
- g) From the corrected absorbance, determine the concentration of Cr(VI) present by referring to the calibration curve.

C.5.3 Preparation of the calibration curve

- a) Pipette the Cr(VI) standard solution (C.3.i) in measured volumes into 10 ml volumetric flasks (C.2.2.a) to create concentrations ranging from 0,1 mg/l to 5,0 mg/l Cr(VI) when diluted to volume. Prepare a blank and a minimum of three standard solutions.

NOTE An alternative concentration range of the standard solutions may be used if the Cr(VI) concentration in the sample solution is outside the original calibration curve. The sample solutions may also be diluted if they are more concentrated than the highest calibrant solution.

- b) Develop the colour of the standard solutions as for the samples using the procedure in C.5.2.
- c) Transfer an appropriate portion of the solution to a 1 cm absorption cell and measure the absorbance at 540 nm using the colorimetric instrument (C.2.1.f).
- d) Correct the absorbance reading by subtracting the absorbance of a blank carried through the colour development procedure.
- e) Construct a calibration curve by plotting corrected absorbance values versus concentration of Cr(VI). Either linear regression or quadratic fitting can be applied to establish a calibration curve. The correlation coefficient (R^2) of the curve shall be >0,99, or a new calibration curve shall be created.

C.5.4 Calculation of analytical results

- a) Cr(VI) concentration ($\mu\text{g/g}$) in total sample:

$$C = \frac{A \times D \times F}{S} \quad (\text{C.1})$$

where

- C is the Cr(VI) concentration in $\mu\text{g/g}$;
- A is the concentration observed in the digestate in $\mu\text{g/ml}$;
- D is the dilution factor;
- F is the final volume of the digestate in ml;
- S is the initial sample mass in g.

- b) Relative per cent difference:

$$R = \frac{|S - D|}{0,5 \times (S + D)} \times 100 \quad (\text{C.2})$$

where

- R is the relative per cent difference in %;
- S is the Cr(VI) concentration in sample observed in the initial test in $\mu\text{g/g}$;
- D is the Cr(VI) concentration in sample observed in the duplicated test in $\mu\text{g/g}$.

NOTE 1 A similar calculation listed in (C.4.4.a) can also be used to obtain the Cr(VI) concentrations in the initial and duplicated tests.

- c) Spike recovery:

$$SR = \frac{SS - US}{SA} \times 100 \quad (\text{C.3})$$

where

- SR is the spike per cent recovery in %;
- SS is the Cr(VI) concentration in the spiked sample in $\mu\text{g/g}$;
- US is the Cr(VI) concentration in the unspiked sample in $\mu\text{g/g}$;
- SA is the Cr(VI) concentration used in the spike solution in $\mu\text{g/g}$.

NOTE 2 A similar calculation listed in (C.5.4.a) can also be used to obtain the Cr(VI) concentrations in the spiked sample, unspiked sample.

C.5.5 Quality control

C.5.5.1 General method

Samples shall be analysed in batches of not more than 20 samples counting all samples, any blanks, any duplicates and any spike recovery tests. A minimum of one blank per batch shall be prepared and analysed to test for contamination and memory effects. In every batch, at least one sample shall be prepared in duplicate. Results for duplicate samples shall have a relative difference of $\leq 20\%$ or the batch shall be reanalysed. A laboratory control sample shall be analysed at a frequency of one per batch. The control sample shall be either of the following:

- a) utilize the matrix spike solution (C.3.m) to spike 50 ml of digestion solution (prepared in C.3.h) from one sample material; or
- b) utilize the solid matrix spike agent PbCrO_4 (C.3.f) to spike into 50 ml of digestion solution (prepared in C.3.h). Acceptable recovery shall be in the range of 80 % to 120 % or the sample batch shall be re-analysed.

C.5.5.2 Matrix spike recovery correction method

Because this test method is subject to relatively strong matrix effects, it is necessary to demonstrate the matrix spike recovery for every sample having a unique origin. Unique origin includes any of the following circumstances: different customer (even if same polymer as prior sample); different production batch (even if same polymer as prior sample); different polymer; different additives (even if same polymer as prior sample); and all other cases of changes in sample origin. The matrix spike recovery test begins with spiking the sample prior to digestion, carrying the spike through the digestion and colour development.

- a) A pre-digestion matrix spike sample shall be analysed for each unique sample. Choose one of the following two options:
 - Spike the sample with 1,0 ml of the matrix spiking solution (C.3.m) or at twice the sample concentration, whichever is the greater.
 - Spike the sample by accurately weighing a minimum of 1,0 mg of PbCrO_4 (C.3.f) or enough PbCrO_4 to double the sample concentration, whichever is the greater.
- b) Carry the spiked sample through the digestion and colorimetric measurement procedures beginning with C.4.1.
- c) An acceptance range for matrix spike recovery shall be 10 % to 125 %, or the sample shall be re-analysed. In the case of $<10\%$ recovery, double the matrix spiking solution amount in the re-analysis. In the case of $>125\%$ recovery, repeat the analysis with the same amount of spiking solution in the re-analysis. If the recovery from the repeat analysis is still outside the range of 10 % to 125 %, the method is considered not applicable to the sample analysed, and the result cannot be reported.
- d) If recovery is $>75\%$ or $<125\%$, the result for the sample and the LOD shall not be corrected.
- e) If recovery for a sample is between 10 % and 75 %, both the result and limit of detection (LOD) (see Clause C.6) for the sample shall be corrected according to the recovery. That is, multiply the result by the ratio (100 %/spike recovery). Then multiply the estimated LOD for the method by the same ratio.
- f) If the sample test result corrected as in C.5.5.2.e) is greater than the estimated LOD corrected as in C.5.5.2.e), report the corrected test result. Otherwise report the corrected LOD value as the result for that sample.

EXAMPLE Assuming an estimated LOD of 2 $\mu\text{g/g}$ Cr(VI) of sample and a 50 % matrix spike recovery for a sample, the corrected LOD for that test sample = $2 \mu\text{g/g} \times (100\% / 50\%) = 4 \mu\text{g/g}$. If the test result is 100 $\mu\text{g/g}$, the corrected test result = $100 \mu\text{g/g} \times (100\% / 50\%) = 200 \mu\text{g/g}$. In this case, the reported result is 200 $\mu\text{g/g}$.

C.6 Determination of method detection limit and limit of quantification

Clause 4 provides a general description of method detection limits and limits of quantification. The following experimental procedure is performed to determine the method detection limit and limit of quantification for Cr(VI) in polymers and electronics.

- a) Accurately weigh 2,5 g of a milled (see Clause C.4) polymer or electronic sample known not to contain Cr(VI) (e.g. IRMM VDA reference material) or other compounds that may interfere with the analysis and place it in a 250 ml beaker (C.2.2.a). Repeat this step a minimum of 5 times.
- b) Spike each of the beakers (C.2.2.a) with 10 µg Cr(VI) using 100 µl of the matrix spiking solution (see C.3.m).
- c) Follow the test procedure in C.5.1 (excluding (C.5.1 b), C.5.2 and C.5.3).
- d) Calculate the Cr(VI) concentration (µg/g) as indicated in (C.5.4.a) and determine the percent recovery of the spiked Cr(VI) for each of the samples.

$$SR = \frac{C \times M}{SA} \times 100 \quad (C.4)$$

where

SR is the rate of recovery in % of the spiked Cr(VI);

C is the measured concentration in µg/g;

M is the sample mass in g;

SA is the spike amount (10 µg).

- The per cent recovery of Cr(VI) shall be between 70 % and 125 % for each of the samples. If the recovery is outside the limits for any of the replicates, the entire extraction and analysis procedure shall be repeated.

- e) The method detection limit is obtained by calculating the standard deviation, *s*, for the replicate (minimum of 6) analyses. The standard deviation is then multiplied by Student's *t* value for the total number of replicates (*n*) for *n*-1 degrees of freedom. A list of Student's *t* values for 6 to 10 replicates is shown in Table C.1.

EXAMPLE For 6 replicates and 6 – 1 = 5 degrees of freedom, the *t* value would be 3,36.

NOTE All analyses used to calculate an MDL should be consecutive.

Table C.1 – Method detection limit = *t* × *s*_{*n*-1}

Number of samples	Student's <i>t</i> -statistic (99 % confidence)
6	3,36
7	3,14
8	3,00
9	2,90
10	2,82

- f) The limit of quantification is determined by multiplying the method detection limit by a factor of 5.

Method detection limits and limits of quantification will vary from laboratory to laboratory. Generally, a method detection limit of 2 µg/g (limit of quantification of 10 µg/g) has been found achievable using this method.

C.7 Evaluation of the method

An international inter-laboratory study (IIS) organized by WG3 of IEC TC 111 during the development of this method found that Cr(VI) extraction is strongly affected by the sample matrix. The suitability of this method is therefore variable and dependent on the specific compositional matrix of the sample under test. Study results demonstrated a wide range of results for three polymer types containing levels of Cr(VI) between 250 µg/g and 1 100 µg/g. Results for a PVC material exhibited reproducibility up to 3,9 % relative standard deviation and Cr(VI) recovery of approximately 70 % among six laboratories. For an ABS material available as a certified reference material, the reproducibility was approximately 13 % relative standard deviation and Cr(VI) recovery was approximately 27 %. Results for an EVAC/PE material exhibited no measurable recovery.

Annex D (informative)

Practical application of screening by X-ray fluorescence spectrometry (XRF)

D.1 Introductory remark

This annex provides general information to aid in the practical application of the method described above. Some manufacturers may provide a Standard Operating Procedure (SOP) with the instrument. Following the recommendation contained in such a document assures the operator of the best possible quality of analytical results.

D.2 Matrix and interference effects

As a general guide, the user of this method is advised that limitations in corrections for spectral interference and matrix variations from material to material may significantly affect the sensitivity, detection limit or accuracy of each analyte. The following list covers the most common issues:

- a) The intensity of characteristic radiation of the element in the sample is adversely influenced by the process of scattering of the excitation radiation, which contributes to the spectral background. In addition, two major effects occur:
 - 1) Absorption of excitation radiation and fluorescence radiation by the analyte and by the other elements (matrix) in the sample.
 - 2) Secondary excitation (enhancement) of the analyte by other elements in the sample:
 - Polymers: In polymer samples the matrix influence on the analyte characteristic X-ray intensity comes from:
 - the scattering (mainly incoherent) of the primary radiation, which contributes heavily to the spectral background.
 - the absorption of the fluorescence radiation mainly by Cl in PVC, by additive elements such as Ca, Ti, Zn, Sn, and by such elements as Br and Sb, which originate in flame retardants.
 - the secondary excitation by elements such as Sb, Sn, and Br.
 - some high-powered WDXRF (>500 W) spectrometers can alter the surface of a polymer sample if exposed to the tube for long periods of time. A newly prepared sample shall always be used in this case.
 - Metals: In metal samples the scattering of the primary radiation, while still present, does not play an important role. The matrix effect is mainly caused by absorption and secondary excitation effects. These will be different for each metal matrix. The following list shows some typical elements in the various matrices:
 - Fe alloys: Fe, Cr, Ni, Nb, Mo, W,
 - Al alloys: Al, Mg, Si, Cu, Zn,
 - Cu alloys: Cu, Zn, Sn, Pb, Mn, Ni, Co,
 - Solder alloys: Pb, Cu, Zn, Sn, Sb, Bi, Ag,
 - Zn alloys: Zn, Al,
 - Precious metals alloys: Rh, Pd, Ag, Ir, Pt, Au, Cu, Zn,
 - Other metals such as Ti, Mg.
 - Electronics: In principle all effects that are described for polymers and metals.

- b) In addition, the intensity of characteristic radiation of the element in the sample can be influenced by interfering lines from other elements in the sample. For the target elements these can typically be the following:
- Cd: Interferences possible from Br, Pb, Sn, Ag and Sb;
 - Pb: Interferences possible from Br, As, Bi;
 - Hg: Interferences possible from Br, Pb, Bi, Au and from Ca and Fe if the samples contain Ca and Fe in high concentrations;
 - Cr: Interferences possible from Cl;
 - Br: Interferences possible from Fe, Pb and Hg. On rare occasions an interference from Al might be experienced if BrL_α line is selected to analyse Br.
- c) Influence of matrix effects on LOD.

Table D.1 – Effect of matrix composition on limits of detection of some controlled elements

Element/analyte	Pure polymer	Polymer with ≥ 2 % Sb, without Br	Polymer with ≥ 2 % Br, without Sb
Cadmium	A	~ A → 2A	≥2A
Lead	B	~ 2B	≥3B

NOTE 1 If A and B are limits of detection (LOD) for Cd and Pb, respectively, in a pure polymer, then the LODs to be expected for more complex matrices are expressed as multiples of A and B as in Table D.1.

NOTE 2 The information in Table D.1 is provided as guidance only; the actual LODs for the target analytes are specific for each instrument and analytical conditions/parameters employed.

D.3 Interpretation of results

For each analyte the analyst shall prepare an uncertainty budget with an estimate of the expanded uncertainty, U , expressed at a chosen confidence level. Using the value for U and the maximum allowed level, L , of the substance, the analyst shall categorize each sample as:

- a) “BELOW LIMIT” – If the results, R_i , of the quantitative analysis for all analytes are lower than the values, P_i , calculated by Equation (D.1), the result for the sample is “BELOW LIMIT”.

$$P_i = L_i - U_i \quad (\text{D.1})$$

where “i” indicates each analyte.

- b) “OVER LIMIT” – If the results, R_i , of the quantitative analysis for any individual analyte is higher than the values, F_i , calculated from Equation (D.2), the result for the sample is “OVER LIMIT”.

$$F_i = L_i + U_i \quad (\text{D.2})$$

NOTE 1 In case of actual legislation, which restricts PBB/PBDE and Cr(VI) rather than Br and Cr, the exceptions are the XRF determinations of Br and Cr. If the quantitative results for the elements Br and/or Cr are higher than the limit (for Br calculated based on the stoichiometry of Br in the most common congeners of PBB/PBDE), the sample is “inconclusive”, and even if the quantitative results for all other analytes are “below limit”.

- c) “INCONCLUSIVE” – If the result, R_i , of the quantitative analysis for any individual analyte in a sample is intermediate between P_i and F_i , the test is “INCONCLUSIVE” for that sample.
- The value L is defined by the restrictions being used to judge the acceptability of the material in the product. If the material listed in the governing restrictions is in the elemental form, L shall be used directly from the governing restrictions. If the material listed in the governing restrictions is in compound form, the value for L shall be

calculated using the gravimetric factor for the element being determined using XRF in the target chemical compound.

- The value U above denotes an estimate of the uncertainty associated with the XRF determination of each analyte. That is, U is different for each combination of analyte, sample preparation procedure, calibration, and spectrometer. Guidance on the estimation of uncertainty may be obtained from ISO/IEC Guide 98.

NOTE 2 The user may choose a value to substitute for U on the basis of a desired margin of safety. However, it is recommended that efforts be made to estimate U to ensure that it is less than or equal to the chosen safety margin.

d) Example scheme for interpreting results at sample limits are given in Table D.2.

Table D.2 – Screening limits in mg/kg for regulated elements in various matrices

Element	Polymers	Metals	Composite material
Cd	$BL \leq (70-3\sigma) < X < (130+3\sigma) \leq OL$	$BL \leq (70-3\sigma) < X < (130+3\sigma) \leq OL$	$LOD < X < (150+3\sigma) \leq OL$
Pb	$BL \leq (700-3\sigma) < X < (1\ 300+3\sigma) \leq OL$	$BL \leq (700-3\sigma) < X < (1\ 300+3\sigma) \leq OL$	$BL \leq (500-3\sigma) < X < (1\ 500+3\sigma) \leq OL$
Hg	$BL \leq (700-3\sigma) < X < (1\ 300+3\sigma) \leq OL$	$BL \leq (700-3\sigma) < X < (1\ 300+3\sigma) \leq OL$	$BL \leq (500-3\sigma) < X < (1\ 500+3\sigma) \leq OL$
Br	$BL \leq (300-3\sigma) < X$		$BL \leq (250-3\sigma) < X$
Cr	$BL \leq (700-3\sigma) < X$	$BL \leq (700-3\sigma) < X$	$BL \leq (500-3\sigma) < X$

- A common set of limits for the substances of interest have been assumed for the purposes of this example. The limits are 100 mg/kg for Cd and 1 000 mg/kg for Pb, Hg and Cr. The limit for Br is calculated based on the stoichiometry of Br in the most common congeners of PBB/PBDE and their limit of 1 000 mg/kg. The “action levels” for this method have been set for the purpose of this screening procedure with a 30 % margin of safety (50 % for composite materials).
- A “BELOW LIMIT” (BL) or “OVER LIMIT” (OL) determination will be set at 30 % (50 % for composite materials) less than or greater than the limit, respectively. The margins of safety have been agreed upon based on the experience of many experts and practitioners in the industry. Further explanation of this approach to estimating uncertainty (translated here as “margin of safety”) can be found in 6.6 c).
- The symbol “X” marks the region where further investigation is necessary.
- The term “ 3σ ” expresses the repeatability of the analyser at the action level, where σ is determined as the standard deviation of a typical sample with the content of the regulated substances near the limits of interest (see spectrometer performance verification test 6.5.4). The repeatability is expressed in terms of “ 3σ ” 99,7 % confidence level rather than the more common “ 2σ ” 95 % confidence level. The 99,7 % confidence level will allow the method to produce fewer “false negative errors”.

NOTE 3 The limit of detection of the instrument should be below the “action level” and should be applied in accordance with the note in 6.5.4 d).

D.4 Summary results of the IIS2 as related to the XRF method

Volunteer laboratories chosen by IEC TC111 WG3 participated in an international inter-laboratory study (IIS2) to determine the performance of this test method. The CRMs (certified reference materials) that were donated were research samples of known composition, and real samples were analysed as per procedures described in this clause. The equipment used in these tests ranged from laboratory ED-XRF or WD-XRF, through bench-top to portable and hand-held XRF analysers. Samples were analysed “as is”. All samples were assumed to be homogeneous, although this assumption has been validated only for CRM samples. The most questionable was homogeneity of samples of ground printed wiring board (F20 and F21).

Tables D.3 to D.7 present a detailed summary of the results for each substance and material tested, obtained for the purposes of evaluating this XRF method. These results support the conclusions about the method (XRF) performance formulated in 6.7.

Table D.3 – Mean results and recovery rates for lead obtained in the IIS2 study

Sample number	Sample description	Certified value of Pb mg/kg	Mean result of Pb mg/kg	Standard deviation mg/kg	Recovery rate ^a %	Range of recovery rate %	Total number of data sets ^b	Number of data sets used ^b
IIS2-C10	EC 680 (polyethylene)	107,9	115	20	107	91 – 152	10	10
IIS2-C11	EC 681 (polyethylene)	13,8	18	10	132	92 – 278	10	8
IIS2-C12	NMIJ CRM 8112-a (acrylonitrile butadiene styrene)	108,9	95	15	87	66 – 110	13	12
IIS2-C13	NMIJ CRM 8113-a (acrylonitrile butadiene styrene)	1 084	952	156	88	67 – 106	13	12
IIS2-F22	BCR 126 (lead crystal glass)	240 000	232 192	58 270	97	62 – 129	5	4
IIS2-D14	NIST SRM 2166 (low alloy steel)	30	ND ^c				5	0
IIS2-D15	NIST SRM 855a (aluminium casting alloy)	190	187	50	98	64 – 122	6	3
IIS2-D16	NIST SRM 87a (silicon aluminium alloy)	930	1 021	269	110	73 – 150	11	7
IIS2-D18	MBH CRM 74X CA4 (tin-based alloy)	174	ND ^c (ranged from 60 to 377)				9	4
IIS2-F20	Real sample (ground PWB)	23 000	18 735	5 897	81	54 – 87	6	4
IIS2-F21	Real sample (ground PWB)	22 000	7 991	1 931	36	23 – 44	5	4

^a Recovery rate is defined as the ratio of the actually measured concentration of analyte to the expected one and multiplied by 100 %. In other words, it illustrates inaccuracy of the results.

^b Each data set typically represents three replicate analyses of the sample.

^c ND means “not detected”.

Table D.4 – Mean results and recovery rates for mercury obtained in the IIS2 study

Sample number	Sample description	Certified value of Hg mg/kg	Mean result of Hg mg/kg	Standard deviation mg/kg	Recovery rate ^a %	Range of recovery rate %	Total number of data sets ^b	Number of data sets used
IIS2-C10	EC 680 (polyethylene)	25,3	25	11	100	0 - 146	10	8
IIS2-C11	EC 681 (polyethylene)	4,5	4	3	89	0 - 133	10	5
IIS2-C12	NMIJ CRM 8112-a (acrylonitrile butadiene styrene)	100	92	15	92	67 - 117	13	12
IIS2-C13	NMIJ CRM 8113-a (acrylonitrile butadiene styrene)	941,5	893	109	95	80 - 120	13	12

^a Recovery rate is defined as the ratio of the actually measured concentration of analyte to the expected one and multiplied by 100 %. In other words it illustrates inaccuracy of the results.

^b Each data set typically represents three replicate analyses of the sample.

Table D.5 – Mean results and recovery rates for cadmium obtained in the IIS2 study

Sample number	Sample description	Certified value of Cd mg/kg	Mean result of Cd mg/kg	Standard deviation mg/kg	Recovery rate ^a %	Range of recovery rate %	Total number of data sets ^b	Number of data sets used
IIS2-C10	EC 680 (polyethylene)	140,8	133	19	94	78 – 116	10	9
IIS2-C11	EC 681 (polyethylene)	21,7	20	5	91	65 – 124	10	9
IIS2-C12	NMIJ CRM 8112-a (acrylonitrile butadiene styrene)	10,77	16	13	155	90 – 500	13	10
IIS2-C13	NMIJ CRM 8113-a (acrylonitrile butadiene styrene)	106,9	92	13	86	72 – 111	13	9
IIS2-D18	CRM “MBH” (tin-based alloy)	3,3	ND ^c				8	0

^a Recovery rate is defined as the ratio of the actually measured concentration of analyte to the expected one and multiplied by 100 %. In other words it illustrates inaccuracy of the results.

^b Each data set typically represents three replicate analyses of the sample.

^c ND means “not detected”.

Table D.6 – Mean results and recovery rates for total chromium obtained in the IIS2 study

Sample number	Sample description	Certified value of Cr mg/kg	Mean result of Cr mg/kg	Standard deviation mg/kg	Recovery rate ^a %	Range of recovery rate %	Total number of data sets ^b	Number of data sets used
IIS2-C10	EC 680 (polyethylene)	114,6	134	38	117	61 – 182	10	10
IIS2-C11	EC 681 (polyethylene)	17,7	20	6	112	68 – 185	10	7
IIS2-C12	NMIJ CRM 8112-a (acrylonitrile butadiene styrene)	27,87	<u>125^c</u>	42	<u>448</u>		13	13
IIS2-C13	NMIJ CRM 8113-a (acrylonitrile butadiene styrene)	269,5	<u>1 016^c</u>	303	<u>377</u>		13	13
IIS2-F22	BAM S004 (glass)	94	77	32	82	50 – 110	3	2
IIS2-D14	SRM 2166 (low alloy steel)	240	ND ^d (ranged from ND to 827)				5	0
IIS2-D15	SRM 855a (aluminium casting alloy)	130	ND ^d (ranged from 89 to 890)				5	0
IIS2-D16	SRM 87a (silicon aluminium alloy)	1 100	1 107	450	110	55 – 152	11	4

^a Recovery rate is defined as the ratio of the actually measured concentration of analyte to the expected one and multiplied by 100 %. In other words it illustrates inaccuracy of the results.

^b Each data set typically represents three replicate analyses of the sample.

^c The underlined results for samples C12 and C13 are for information only. In both samples the Cr results reported by the laboratories were a factor of about four larger than certified. The reason for this has not been established.

^d ND means “not detected”.

Table D.7 – Mean results and recovery rates for total bromine obtained in the IIS2 study

Sample number	Sample description	Certified value of Br	Mean result of Br	Standard deviation	Recovery rate ^a	Range of recovery rate	Total number of data sets ^b	Number of data sets used
		mg/kg	mg/kg	mg/kg	%	%		
IIS2-C10	EC 680 (polyethylene)	808	826	90	102	70 – 125	10	8
IIS2-C11	EC 681 (polyethylene)	98	90	13	92	65 - 102	10	8
IIS2-A01	HIPS (high-impact polystyrene), donated research sample	99 138	104 976	15 353	105	84 – 124	12	5
IIS2-A02	HIPS (high-impact polystyrene), donated research sample	100 050	116 007	10 053	116	100 – 125	12	5
IIS2-A03	ABS (acrylonitrile butadiene styrene), donated research sample	116 800	118 817	29 351	102	69 – 123	6	5
IIS2-A04	ABS (acrylonitrile butadiene styrene), donated research sample	118 400	127 856	32 346	108	90 – 131	6	5
IIS2-A05	PC/ABS (polycarbonate and acrylonitrile butadiene styrene), donated research sample	800	995	90	124	114 – 136	4	3
IIS2-A06	PC/ABS (polycarbonate and acrylonitrile butadiene styrene), donated research sample	2 400	3 034	467	126	111 – 148	4	3

^a Recovery rate is defined as the ratio of the actually measured concentration of analyte to the expected one, and multiplied by 100 %. In other words it illustrates inaccuracy of the results.

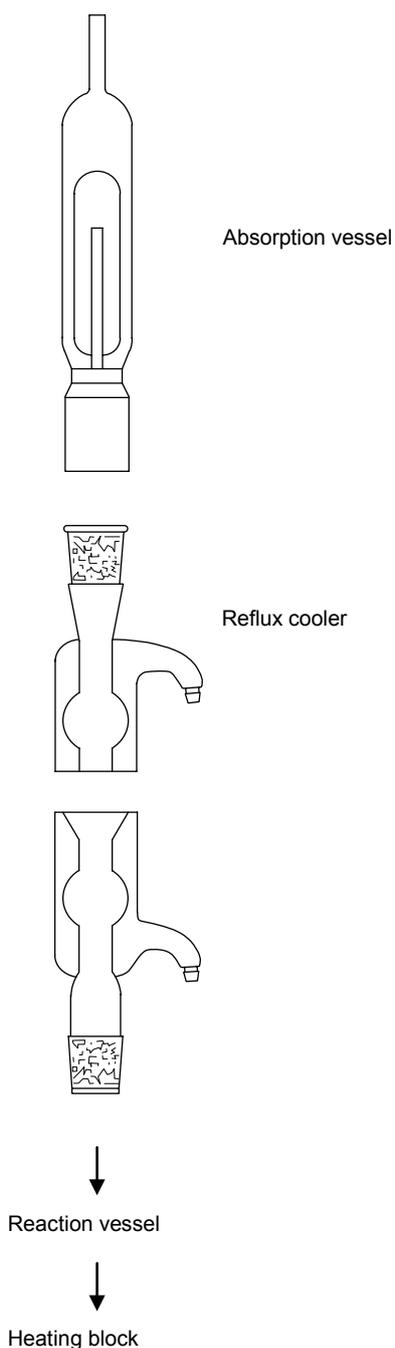
^b Each data set typically represents three replicate analyses of the sample.

Annex E (informative)

Practical application of determination of mercury in polymers, metals and electronics by CV-AAS, CV-AFS, ICP-OES and ICP-MS

E.1 Equipment

Below is an example of the equipment used.



IEC 2248/08

Figure E.1 – Heating digester equipped with reaction vessel, reflux cooler and absorption vessel

Table E.1 – Program for microwave digestion of samples (power output for five vessels)

Step	Time min	Power output W	Pressure limited to MPa
1	5	400	3,5
2	5	600	3,5
3	12	800	3,5
4	20	800	4,0
5	3	500	4,0
Ventilation step	20	0	–

E.2 Instrument parameters

The listed instrument parameters are examples of workable instrument parameters and may differ, since individual instruments may require alternate parameters. The use of listed wavelengths and mass-charge ratios is highly recommended; the selection of other parameters in this context can cause false results.

a) CV-AAS

- Light source: Electrodeless discharge lamp or hollow cathode lamp
- Wavelength: 253,7 nm
- Spectral bandwidth: 0,7 nm
- Purge gas: N₂ or Ar

b) CV-AFS

- Source: Hg hollow cathode lamp, current: 30 mA, wavelength: 253,7 nm
- Detector bias voltage: -360 V
- Oven temperature: 800 °C
- Ar flow carrier gas: 0,6 l/min, screen gas: 1,0 l/min
- Wash water: 6 % (m/m) HNO₃

c) ICP-OES

- Hg wavelength: 194,227 nm
- RF generator power: 1 150 W
- Frequency of RF generator: 27,12 MHz
- Ar pressure: 0,16 MPa
- Ar flow carrier gas: Cool gas: 14 l/min, auxiliary gas: 0,5 l/min
- Sample uptake rate: 1,6 ml/min

d) ICP-MS

- Mass-charge ratios for Hg: m/z = 199, 200, 201, 202
- RF generator power: 1 200 W
- Frequency of RF generator: 27,12 MHz
- Ar pressure: 0,28 MPa
- Ar flow carrier gas: Cooling gas: 16 l/min, auxiliary gas: 1,0 l/min

NOTE Torch position: sampling depth, horizontal, vertical; lenses: all conditions should be optimized before measurement.

Annex F (informative)

Practical application of determination of lead and cadmium in polymers by ICP-OES, ICP-MS and AAS

F.1 ICP-OES

Table F.1 – Spectral interferences for the wavelengths of cadmium and lead

	Cd	Cd	Cd	Cd	Pb	Pb	Pb	Pb
nm	214,439	226,502	228,802	361,051	217,000	220,353	261,417	283,305
Ag	+	+	+	+	+	+	+	+
As	++	+	+++	+	+	+	+	+
Au	+	+	++	+	+	+	+	+++
B	+	+	+	+++	+	+	++	+
Ca	+	+	+	+	+	+	+	+
Co	+	++	+++	+++	++	+++	+++	++
Cr	+	+	+	+	+	+	++	+
Cu	+	+	+	+	+	+	+	++
Eu	+	+	+	+++	++	+	+++	+++
Ga	+	+	+	+	+	+	+	+
Ge	+	+	+	+	+	+	+	+
In	+	+	+	+	+	+	+	+
Ir	++	++	++	++	+++	+++	+++	+++
Mg	+	+	+	+	+	+	+	++
Mn	+	+	+	+++	+	++	+++	+
Mo	++	+	+	+++	++	+	++	+++
Ni	+	+	++	+++	+++	++	+	+
Pd	+	+	+	+	+	+++	+	+
Pt	+++	+	++	+	+	+	+	+
Re	++	++	+	+++	++	+++	++	+++
Ru	++	+	++	+	++	+	+++	+
Sb	++	+	+	+	++	+	+	+
Sc	+	+	+++	++	++	++	+++	++
Sn	+	+	+	+	++	+	+	++
V	+	+	++	+++	++	++	++	+
W	++	++	++	++	+++	+	+++	++
Zn	+	+	+	+	+++	+	+	+
Al	+	+	+	+	+++	+++	+	++
Ti	+	+	+	++	+	+++	+	++
Fe	+++	+++	+	++	+++	++	+++	+++
Nb	+	+	+	-	-	+	-	+++
Hf	-	-	-	-	-	+	-	+++

Table F.1 (continued)

	Cd	Cd	Cd	Cd	Pb	Pb	Pb	Pb
nm	214,439	226,502	228,802	361,051	217,000	220,353	261,417	283,305
Ta	-	-	-	-	-	+	-	++
Pb	+	+	+	+	-	-	-	-
Cd	-	-	-	-	+	+	+	+

NOTE The table shows the strength of interference for the wavelengths of Cd and Pb when 1 000 mg/kg of the corresponding matrix elements are introduced.

+ no or small interference (typically less than 0,05 mg/kg).
 ++ medium interference (typically between 0,05 mg/kg and 0,2 mg/kg).
 +++ strong interference (typically more than 0,2 mg/kg).

F.2 ICP-MS

If a stable isotope is found, the mass/charge (m/z) number of several isotopes can be measured to estimate the level of spectral interference. If the sample contains tin or molybdenum, attention shall be paid to positive interference in cadmium mass measurement.

Table F.2 – Examples of mass/charge (m/z) ratios

Element	Isotope	Isobar	Polyatomic ion
Cd	¹¹¹ Cd		MoO, MoOH, ZrOH
	¹¹² Cd	Sn	MoO, MoOH
	¹¹³ Cd	In	MoO, MoOH, ZrOH, RuO
	¹¹⁴ Cd	Sn	MoO, MoOH, RuO
Pb	²⁰⁴ Pb		
	²⁰⁶ Pb		PtO
	²⁰⁷ Pb		IrO
	²⁰⁸ Pb		PtO

F.3 AAS

Recommended measurement wavelengths for AAS.

Table F.3 – Examples of wavelengths for AAS

Element	Wavelength nm	Slit width nm
Cd	228,8	0,7
Pb	261,4	0,7
	217,0	0,7
	283,3	0,7

Light source: Electrodeless discharge lamp or hollow cathode lamp, gas type: acetylene/air.

Annex G (informative)

Practical application of determination of lead and cadmium in metals by ICP-OES, ICP-MS and AAS

G.1 ICP-OES

Table G.1 – Spectral interferences for the wavelengths of cadmium and lead

	Cd	Cd	Cd	Cd	Pb	Pb	Pb	Pb
nm	214,439	226,502	228,802	361,051	217,000	220,353	261,417	283,305
Ag	+	+	+	+	+	+	+	+
As	++	+	+++	+	+	+	+	+
Au	+	+	++	+	+	+	+	+++
B	+	+	+	+++	+	+	++	+
Ca	+	+	+	+	+	+	+	+
Co	+	++	+++	+++	++	+++	+++	++
Cr	+	+	+	+	+	+	++	+
Cu	+	+	+	+	+	+	+	++
Eu	+	+	+	+++	++	+	+++	+++
Ga	+	+	+	+	+	+	+	+
Ge	+	+	+	+	+	+	+	+
In	+	+	+	+	+	+	+	+
Ir	++	++	++	++	+++	+++	+++	+++
Mg	+	+	+	+	+	+	+	++
Mn	+	+	+	+++	+	++	+++	+
Mo	++	+	+	+++	++	+	++	+++
Ni	+	+	++	+++	+++	++	+	+
Pd	+	+	+	+	+	+++	+	+
Pt	+++	+	++	+	+	+	+	+
Re	++	++	+	+++	++	+++	++	+++
Ru	++	+	++	+	++	+	+++	+
Sb	++	+	+	+	++	+	+	+
Sc	+	+	+++	++	++	++	+++	++
Sn	+	+	+	+	++	+	+	++
V	+	+	++	+++	++	++	++	+
W	++	++	++	++	+++	+	+++	++
Zn	+	+	+	+	+++	+	+	+
Al	+	+	+	+	+++	+++	+	++
Ti	+	+	+	++	+	+++	+	++
Fe	+++	+++	+	++	+++	++	+++	+++
Nb	+	+	+	-	-	+	-	+++
Hf	-	-	-	-	-	+	-	+++
Ta	-	-	-	-	-	+	-	++

Table G.1 (continued)

	Cd	Cd	Cd	Cd	Pb	Pb	Pb	Pb
nm	214,439	226,502	228,802	361,051	217,000	220,353	261,417	283,305
Pb	+	+	+	+	-	-	-	-
Cd	-	-	-	-	+	+	+	+

NOTE The table shows the strength of interference for the wavelengths of Cd and Pb when 1 000 mg/kg of the corresponding matrix elements are introduced.

+ no or small interference (typically less than 0,05 mg/kg).
 ++ medium interference (typically between 0,05 mg/kg and 0,2 mg/kg).
 +++ strong interference (typically more than 0,2 mg/kg).

G.2 Background correction

In the event of changing background by the main matrix of the solution which affects the emission intensities (I_x), these emission intensities shall be obtained by deducting the background intensities (I_x'). Figure G.1 shows an example of the effect of background correction. Figure G.1a shows an example of uniform background versus wavelength. In this case, the background could be corrected by both positions A and B. Figure G.1b shows an example of changing background versus wavelength. In this case, background intensities shall be corrected by obtaining the background intensities (I_x'), which are calculated by both position A and position B of the emission intensities.

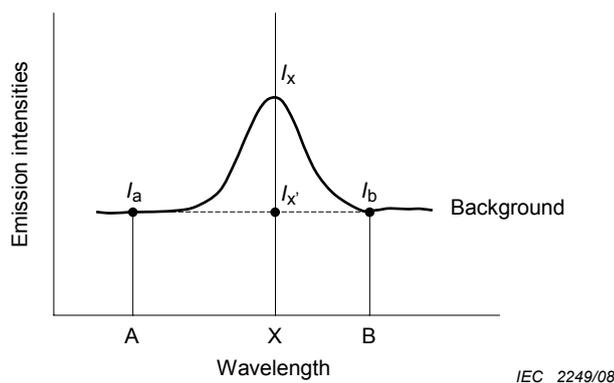


Figure G.1a – Uniform background versus wavelength

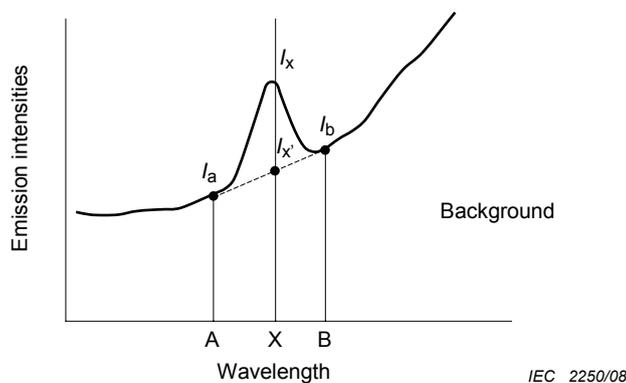


Figure G.1b – Changing background versus wavelength

Figure G.1 – Background correction

When using a standard addition method, the background shall be subtracted by the above background correction method before a standard addition calibration can be made.

G.3 ICP-MS

If a stable isotope is found, the mass/charge (m/z) number of several isotopes can be measured to estimate the level of spectral interference. If the sample contains tin or molybdenum, attention shall be paid to positive interference in cadmium mass measurement.

Table G.2 – Examples of mass/charge (m/z) ratios

Element	Isotope	Isobar	Polyatomic ion
Cd	¹¹¹ Cd		MoO, MoOH, ZrOH
	¹¹² Cd	Sn	MoO, MoOH
	¹¹³ Cd	In	MoO, MoOH, ZrOH, RuO
	¹¹⁴ Cd	Sn	MoO, MoOH, RuO
Pb	²⁰⁴ Pb		
	²⁰⁶ Pb		PtO
	²⁰⁷ Pb		IrO
	²⁰⁸ Pb		PtO

G.4 AAS

Recommended measurement wavelengths for AAS.

Table G.3 – Examples for wavelengths for AAS

Element	Wavelength nm	Slit width nm
Cd	228,8	0,7
Pb	261,4	0,7
	217,0	0,7
	283,3	0,7

Annex H (informative)

Practical application of determination of lead and cadmium in electronics by ICP-OES, ICP-MS and AAS

H.1 Program for microwave digestion

Table H.1 – Program for microwave digestion of samples^a

Step	Time min	Power output W	Pressure limited to MPa
1A	5	300	2,5
2A	5	350	2,5
3A	17	450	2,5
4A	2	300	2,5
Ventilation step A	3	0	2,5
1B	5	300	2,5
2B	5	400	2,5
3B	17	450	2,5
Ventilation step B	3	0	2,5
^a Power output for five vessels.			

H.2 ICP-OES**Table H.2 – Spectral interferences for the wavelengths of cadmium and lead**

	Cd	Cd	Cd	Cd	Pb	Pb	Pb	Pb
nm	214,439	226,502	228,802	361,051	217,000	220,353	261,417	283,305
Ag	+	+	+	+	+	+	+	+
As	++	+	+++	+	+	+	+	+
Au	+	+	++	+	+	+	+	+++
B	+	+	+	+++	+	+	++	+
Ca	+	+	+	+	+	+	+	+
Co	+	++	+++	+++	++	+++	+++	++
Cr	+	+	+	+	+	+	++	+
Cu	+	+	+	+	+	+	+	++
Eu	+	+	+	+++	++	+	+++	+++
Ga	+	+	+	+	+	+	+	+
Ge	+	+	+	+	+	+	+	+
In	+	+	+	+	+	+	+	+
Ir	++	++	++	++	+++	+++	+++	+++
Mg	+	+	+	+	+	+	+	++
Mn	+	+	+	+++	+	++	+++	+
Mo	++	+	+	+++	++	+	++	+++
Ni	+	+	++	+++	+++	++	+	+
Pd	+	+	+	+	+	+++	+	+
Pt	+++	+	++	+	+	+	+	+
Re	++	++	+	+++	++	+++	++	+++
Ru	++	+	++	+	++	+	+++	+
Sb	++	+	+	+	++	+	+	+
Sc	+	+	+++	++	++	++	+++	++
Sn	+	+	+	+	++	+	+	++
V	+	+	++	+++	++	++	++	+
W	++	++	++	++	+++	+	+++	++
Zn	+	+	+	+	+++	+	+	+
Al	+	+	+	+	+++	+++	+	++
Ti	+	+	+	++	+	+++	+	++
Fe	+++	+++	+	++	+++	++	+++	+++
Nb	+	+	+	-	-	+	-	+++
Hf	-	-	-	-	-	+	-	+++
Ta	-	-	-	-	-	+	-	++

Table H.2 (continued)

	Cd	Cd	Cd	Cd	Pb	Pb	Pb	Pb
nm	214,439	226,502	228,802	361,051	217,000	220,353	261,417	283,305
Pb	+	+	+	+	-	-	-	-
Cd	-	-	-	-	+	+	+	+

NOTE The table shows the strength of interference for the wavelengths of Cd and Pb when 1 000 mg/kg of the corresponding matrix elements are introduced.

- + no or small interference (typically less than 0,05 mg/kg).
- ++ medium interference (typically between 0,05 mg/kg and 0,2 mg/kg).
- +++ strong interference (typically more than 0,2 mg/kg).

H.3 Background correction

In the event of changing background by the main matrix of the solution which affects the emission intensities (I_x), the emission intensities shall be obtained by deducting the background intensities (I_x'). Figure H.1 shows an example of the effect of background correction. Figure H.1a shows the example of uniform background versus wavelength. In this case, background could be corrected by both of positions A and B. Figure H.1b shows an example of changing background versus wavelength. In this case, background intensities shall be corrected by obtaining the background intensities (I_x'), which are calculated by both position A and position B of emission intensities.

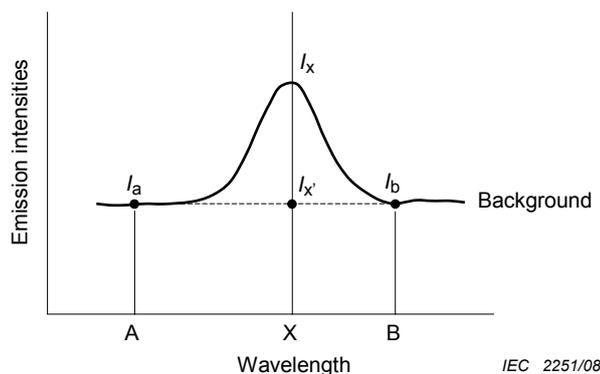


Figure H.1a – Uniform background versus wavelength

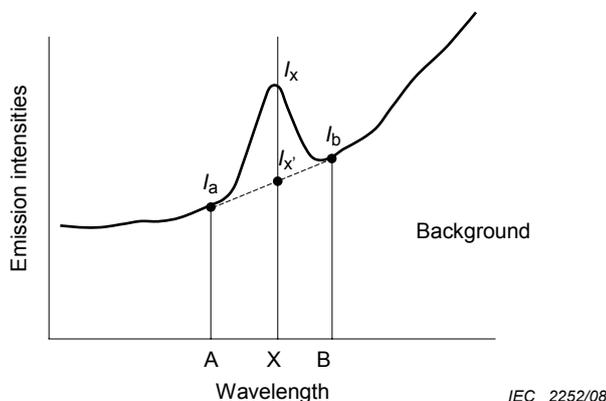


Figure H.1b – Changing background versus wavelength

Figure H.1 – Background correction

When using a standard addition method, the background shall be subtracted by the above background correction method before a standard addition calibration can be made.

H.4 ICP-MS

If a stable isotope is found, mass/charge (m/z) number of several isotopes can be measured to estimate the level of spectral interference. If the sample contains tin or molybdenum, attention shall be paid to positive interference in cadmium mass measurement.

Table H.3 – Examples of mass/charge (m/z) ratios

Element	Isotope	Isobar	Polyatomic ion
Cd	¹¹¹ Cd		MoO, MoOH, ZrOH
	¹¹² Cd	Sn	MoO, MoOH
	¹¹³ Cd	In	MoO, MoOH, ZrOH, RuO
	¹¹⁴ Cd	Sn	MoO, MoOH, RuO
Pb	²⁰⁴ Pb		
	²⁰⁶ Pb		PtO
	²⁰⁷ Pb		IrO
	²⁰⁸ Pb		PtO

H.5 AAS

Recommended measurement wavelengths for AAS.

Table H.4 – Examples of wavelengths for AAS

Element	Wavelength (nm)	Slit width (nm)
Cd	228,8	0,7
Pb	261,4	0,7
	217,0	0,7
	283,3	0,7

Gas type: Acetylene/air.

Light source: Electrodeless discharge lamp or hollow cathode lamp.

Bibliography

General

- [1] *Guidance for assessing conformity of product with respect to substance use restrictions in electric and electronic equipment*³
- [2] ISO Guide 30, *Terms and definitions used in connection with reference materials*
- [3] IEC 60730-1:1999, *Automatic electrical controls for household and similar use – Part 1: General requirements*
- [4] IEC/TS 62239:2003, *Process management for avionics – Preparation of an electronic components management plan*
- [5] IEC Guide 114:2005, *Environmentally conscious design – Integrating environmental aspects into design and development of electrotechnical products*
- [6] BECKER, D., Use of NIST Standard Reference Materials for Decisions on Performance of Analytical Chemical Methods and Laboratories, National Institute of Standards and Technology (NIST) Special Publication 829, 1992
- [7] ISO 5725, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results
- [8] International Union of Pure and Applied Chemistry, *Harmonized Guidelines for Single Laboratory Validation of Methods of Analysis* (IUPAC Technical Report), Pure Appl. Chem., 2002, vol. 74, no. 5, p. 835–855
- [9] International Union of Pure and Applied Chemistry, *Nomenclature in Evaluation of Analytical Methods Including Detection and Quantification Limits*, Pure Appl. Chem., 1995, vol. 67, no. 10, p.1699-1723,

Screening

- [10] ASTM C 982-03, Guide for Selecting Components for Energy-Dispersive X-ray Fluorescence Systems
- [11] ASTM C 1118-89, Guide for Selecting Components for Wavelength-Dispersive X-ray Fluorescence Systems
- [12] ASTM E 1172-87, Standard Practice for Describing and Specifying a Wavelength-Dispersive X-ray Spectrometer
- [13] ASTM E 1361-02, Guide for Correction of Interelement Effects in X-ray Spectrometric Analysis
- [14] ASTM E 1621-94, Standard Guide for X-ray Emission Spectrometric Analysis
- [15] ASTM E 1622-94, Standard Practice for Correction of Spectral Line Overlap in Wavelength-Dispersive X-ray Spectrometry
- [16] BERTIN, EP. *Principles and Practices of X-ray Spectrometric Analysis*, 2nd Edition Plenum Press N.Y.

³ Under consideration.

- [17] BUHRKE, VE., JENKINS, R., SMITH, DK., *A Practical Guide for the Preparation of Specimens for X-ray Fluorescence and X-ray Diffraction Analysis*, Wiley-VCHR
- [18] VAN GRIEKEN, R. and MARKOWICZ, A. *Handbook of X ray Spectrometry*, 2nd Edition, Marcel Dekker Inc.

Mercury

- [19] JEL303:2004, Practical quantitative analysis procedure for mercury contained in fluorescent lamps
- [20] EU Commission, Decision of 9 September 2002 establishing revised ecological criteria for the award of the community eco-label to light bulbs and amending decision 1999/568/EC; 2002/747/EC
- [21] California Environmental Protection Agency, Procedural SOP No. 914-S, Preparation of Cold Cathode Fluorescent Lamps for Mercury Testing, including WET and TCLP, Department of Toxic Substances Control Revision No. 2, 2004
- [22] Battery Industry (EPBA, BAJ and NEMA), Standard Analytical Method for the Determination of Mercury, Cadmium and Lead in Alkaline Manganese Cells using AAS, ICP-OES and "Cold Vapor", 1998

Lead/Cadmium

- [23] ERNST, T. R., POPP, M., WOLF, R., VAN ELDIK, R., *Analysis of eco-relevant elements and noble metals in printed wiring boards using AAS, ICP-OES and EDXRF*, Anal. Bioanal. Chem., 2003, 375:p.805-814
- [24] ISO 11885, *Water quality – Determination of selected elements by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICPOES)*
- [25] EN 1122, *Plastics – Determination of cadmium – Wet decomposition method*
- [26] EN 13346, *Characterization of sludges – Determination of trace elements and phosphorus – Aqua regia extraction methods*
- [27] ASTM D 4004-93, *Standard test methods for rubber determination of metal content by flame atomic absorption (AAS) analysis*
- [28] ISO 3856-4, *Paints and varnishes – Determination of "soluble" metal content – Part 4: Determination of cadmium content – Flame atomic absorption spectrometric method and polarographic method*
- [29] ISO 6101-2, *Rubber – Determination of metal content by atomic absorption spectrometry – Part 2: Determination of lead content*
- [30] ISO 17294-1, *Water quality – Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) – Part 1: General guidelines*
- [31] ISO 247, *Rubber – Determination of ash*
- [32] JIS K 0102, *Testing methods for industrial wastewater*
- [33] JIS K 0116, *General rules for atomic emission spectrometry*

- [34] JIS K 0133, General rules for high-frequency plasma mass spectrometry
- [35] EDGELL, K., US EPA Method Study 37 – SW-846 Method 3050 Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils. EPA Contract No. 68-03-3254, November 1988
- [36] United States Environmental Protection Agency (EPA), EPA SW-846 Method 3052, Microwave-assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices
- [37] United States Environmental Protection Agency (EPA), EPA SW-846 Method 6010B, Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry
- [38] United States Environmental Protection Agency (EPA), EPA SW-846 Method 7000, Series measurement methods for lead, cadmium, chromium and mercury

PBB/PBDE

- [39] KEMMLEIN, S., *Polybromierte Flammenschutzmittel: Entwicklung eines Analyseverfahrens und Untersuchung und Bewertung der Belastungssituation ausgewählter Umweltkompartemente. (Polybrominated flame retardants: Development of an analytical method for the determination and evaluation of the occurrence in various environmental compartments). Thesis.* Technical University Berlin, 2000. ISBN 3-89820-128-7
- [40] KIMBROUGH, David E. and WAKAKUWA, JANICE R., Acid Digestion for Sediments, Sludges, Soils, and Solid Wastes. A Proposed Alternative to EPA SW 846 Method 3050, *Environmental Science and Technology*, July 1989, Vol. 23, p.898
- [41] KRÜGER, C., *Polybromierte Biphenyle und polybromierte Biphenylether – Nachweis und Bestimmung in ausgewählten Lebensmitteln. (Polybrominated biphenyls and polybrominated diphenylethers – detection and determination in selected food samples). Thesis.* Wilhelms-Universität zu Münster, 1988
- [42] Amts- und Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, 35, 3 (2005), S. 245-251, KEMMLEIN, S, BERGMANN, M. and JANN, O. *Standard measurement method for the determination of polybrominated flame retardants (pentabromodiphenylether, octabromodiphenylether) in products.* Research Report 202 67 300, German Federal Environmental Agency, 2005, UBA-Texte 31/05, ISSN 0722-186X
- [43] RIESS, M. and VAN ELDIK, R., Identification of brominated flame-retardants in polymeric materials by reversed phase liquid chromatography with ultraviolet detection, *Journal of Chromatography A* 827, 1998, p.65-71
- [44] United States Environmental Protection Agency (EPA), EPA 1613: 1994: Tetra- through octa-chlorinated dioxins and furans by isotope dilution HRGC/HRMS
- [45] United States Environmental Protection Agency (EPA), EPA 8270c:1996: Semivolatile organic compounds by gas chromatography and mass spectrometry
- [46] European Union Risk Assessment final report – Volume 17 – EUR 20402 – bis(pentabromophenyl) ether – EINECS No 214-604-9 or CAS No 1163-19-5; <http://rcb.jec.it/esis/>

Cr(VI)

- [47] ISO 3613, *Chromate conversion coatings on zinc, cadmium, aluminium-zinc alloys and zinc-aluminium alloys – Test methods*

- [48] DIN 50993-1, Determination of hexavalent chromium in corrosion protection coatings – Part 1: Qualitative analysis
 - [49] EN 15205:2006, Determination of hexavalent chromium in corrosion protection layers. Qualitative analysis
 - [50] GMW3034, Absence of Hexavalent Chrome (VI) Coatings
 - [51] U.S. Department of Health and Human Services – Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Toxicological Profile for Chromium. April, 1993
 - [52] United States Environmental Protection Agency (EPA), EPA method 3060A, "Alkaline Digestion for Hexavalent Chromium", December 1996
 - [53] United States Environmental Protection Agency (EPA), EPA method 7196A, "Chromium, Hexavalent (colorimetric)", July 1992
 - [54] ZVO-0102-QUA-02, Qualitative Analysis of Cr-VI in Passivation Layers on Parts by Spot Analysis
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	115
INTRODUCTION.....	117
1 Domaine d'application	118
2 Références normatives.....	118
3 Termes, définitions et abréviations	119
3.1 Termes et définitions	119
3.2 Abréviations	120
4 Méthodes d'essai – Présentation	122
4.1 Champ d'application	122
4.2 Echantillon	123
4.3 Méthodes d'essai – Organigramme.....	123
4.4 Adaptation à la matrice.....	125
4.5 Limites de détection (LOD) et limites de quantification (LOQ).....	125
4.6 Rapport d'essai	126
4.7 Autres méthodes d'essai	127
5 Préparation mécanique de l'échantillon	127
5.1 Présentation	127
5.1.1 Champ d'application	127
5.1.2 Assurance qualité	127
5.2 Appareillage, équipements et matériaux	128
5.3 Mode opératoire	128
5.3.1 Coupe manuelle	128
5.3.2 Broyage primaire	128
5.3.3 Homogénéisation.....	129
5.3.4 Broyage fin.....	129
5.3.5 Broyage très fin des polymères et matières organiques	129
6 Détection par spectrométrie par fluorescence X (XRF)	129
6.1 Présentation.....	129
6.1.1 Principe.....	132
6.1.2 Avertissements	132
6.2 Appareillage, équipements et matériaux	133
6.2.1 Spectromètre XRF	133
6.2.2 Matériaux et outils	133
6.3 Réactifs.....	133
6.4 Echantillonnage.....	133
6.4.1 Approche non destructive	133
6.4.2 Approche destructive	134
6.5 Mode opératoire	134
6.5.1 Généralités.....	134
6.5.2 Préparation du spectromètre	134
6.5.3 Prise d'essai.....	135
6.5.4 Vérification des performances du spectromètre	135
6.5.5 Essais	136
6.5.6 Etalonnage	136
6.6 Calculs.....	137
6.7 Evaluation de la méthode	138

6.7.1	Plomb	138
6.7.2	Mercure	139
6.7.3	Cadmium	139
6.7.4	Chrome	139
6.7.5	Brome	139
6.8	Contrôle de la qualité	139
6.8.1	Exactitude de l'étalonnage	139
6.8.2	Echantillons témoins	140
6.9	Cas spéciaux	140
6.9.1	Présentation d'un échantillon à mesurer	140
6.9.2	Uniformité de l'échantillon	141
7	Détermination du mercure dans les polymères, métaux et produits électroniques par CV-AAS, CV-AFS, ICP-OES et ICP-MS	142
7.1	Présentation	142
7.2	Appareillage, équipements et matériaux	143
7.3	Réactifs	144
7.4	Préparation des échantillons	145
7.4.1	Prise d'essai	145
7.4.2	Digestion par voie humide (digestion de produits électroniques)	146
7.4.3	Digestion aux micro-ondes	146
7.4.4	Préparation du réactif témoin de laboratoire	147
7.5	Procédure d'essai	147
7.5.1	Préparation des solutions d'étalonnage	147
7.5.2	Elaboration de la courbe d'étalonnage	147
7.5.3	Mesure de l'échantillon	148
7.5.4	Calcul	148
7.6	Evaluation de la méthode	149
8	Détermination du plomb et du cadmium dans des polymères par ICP-OES, ICP-MS et AAS	149
8.1	Présentation	149
8.2	Appareillage, équipements et matériaux	150
8.3	Réactifs	151
8.4	Préparation des échantillons	152
8.4.1	Prise d'essai	152
8.4.2	Préparation de la solution d'essai	153
8.4.3	Préparation du réactif témoin de laboratoire	155
8.5	Procédure d'essai	155
8.5.1	Préparation de la solution d'étalonnage	156
8.5.2	Elaboration de la courbe d'étalonnage	156
8.5.3	Mesure de l'échantillon	157
8.5.4	Calcul	157
8.6	Evaluation de la méthode	157
9	Détermination du plomb et du cadmium dans les métaux par ICP-OES, ICP-MS et AAS	158
9.1	Présentation	158
9.2	Appareillage, équipements et matériaux	158
9.3	Réactifs	159
9.4	Préparation des échantillons	160
9.4.1	Prise d'essai	160

9.4.2	Préparation de la solution d'échantillon d'essai.....	160
9.5	Préparation du réactif témoin de laboratoire	162
9.6	Procédure d'essai.....	162
9.6.1	Préparation de l'étalon	162
9.6.2	Mesure de l'étalon	163
9.6.3	Mesure de l'échantillon	163
9.6.4	Calcul.....	164
9.7	Evaluation de la méthode	164
10	Détermination du plomb et du cadmium dans les produits électroniques par ICP-OES, ICP-MS et AAS	164
10.1	Présentation.....	164
10.2	Appareillage, équipements et matériaux	165
10.3	Réactifs.....	166
10.4	Préparation des échantillons	167
10.4.1	Prise d'essai.....	168
10.4.2	Digestion à l'eau régale	168
10.4.3	Digestion aux micro-ondes	168
10.5	Procédure d'essai.....	169
10.5.1	Préparation d'une solution d'étalonnage	170
10.5.2	Préparation de l'étalon.....	170
10.5.3	Etalonnage	171
10.5.4	Elaboration de la courbe d'étalonnage	171
10.5.5	Mesure de l'échantillon	172
10.5.6	Calcul.....	172
10.6	Evaluation de la méthode	173
	Annexe A (informative) Détermination du PBB et du PBDE présents dans les polymères par la méthode GC-MS	174
	Annexe B (informative) Essai de détermination de la présence de chrome hexavalent (Cr(VI)) dans les revêtements incolores et colorés de protection anticorrosion appliqués sur les métaux	190
	Annexe C (informative) Détermination du chrome hexavalent (Cr VI) dans des polymères et des produits électroniques par la méthode colorimétrique	195
	Annexe D (informative) Application pratique de détection par spectrométrie par fluorescence X (XRF).....	203
	Annexe E (informative) Application pratique de la détermination du mercure dans les polymères, les métaux et les produits électroniques par CV-AAS, AFS, ICP-OES et ICP-MS	211
	Annexe F (informative) Application pratique de la détermination du plomb et du cadmium dans les polymères par ICP-OES, ICP-MS et AAS	213
	Annexe G (informative) Application pratique de la détermination du plomb et du cadmium dans les métaux par ICP-OES, ICP-MS et AAS.....	215
	Annexe H (informative) Application pratique de la détermination du plomb et du cadmium dans les produits électroniques par ICP-OES, ICP-MS et AAS.....	219
	Bibliographie.....	223
	Figure 1 – Organigramme des méthodes d'essai.....	123
	Figure A.1 – Chromatogramme d'ionisation totale du mélange PBDE, BDE-1 à BDE-206 (5 µg/ml), BDE-209 (50 µg/ml)	188
	Figure A.2 – Chromatogramme d'ionisation totale du mélange PBB (3,5 µg/ml)	189

Figure A.3 – Chromatogramme d'ionisation totale des mélanges PBB et PBDE (BDE-1 à BDE-206, 5 µg/ml, BDE-209, 5,0 µg/ml, PBB, 3,5 µg/ml).....	189
Figure E.1 – Digesteur chauffant équipé d'un récipient de réaction, d'un réfrigérant à reflux et d'un récipient d'absorption.....	211
Figure G.1 – Correction de fond.....	217
Figure H.1 – Correction de fond.....	221
Tableau 1 – Récapitulatif du contenu de la procédure d'essai de vérification	125
Tableau 2 – Plages de concentration de plomb soumises à l'essai dans des matériaux	130
Tableau 3 – Plages de concentration de mercure soumises à l'essai dans des matériaux.....	130
Tableau 4 – Plages de concentration de cadmium soumises à l'essai dans des matériaux.....	130
Tableau 5 – Plages de concentration de chrome total soumises à l'essai dans des matériaux.....	131
Tableau 6 – Plages de concentration de brome soumises à l'essai dans des matériaux.....	131
Tableau 7 – Raies de rayon X recommandées pour les analytes individuels	135
Tableau 8 – Résultats moyens et taux de rétablissement pour le mercure obtenus au cours de l'étude IIS2	149
Tableau A.1 – Solution de dopage de la matrice	176
Tableau A.2 – Solutions d'étalonnage de PBB et PBDE	178
Tableau A.3 – Masses de référence pour la quantification des PBB.....	182
Tableau A.4 – Masses de référence pour la quantification des PBDE.....	182
Tableau A.5 – Exemple de calcul	183
Tableau A.6 – Exemple de liste de congénères d'étalonnage disponibles dans le commerce et considérés appropriés pour la présente analyse	186
Tableau A.7 – Congénères PBB et PBDE dans le mélange	188
Tableau C.1 – Limite de détection de la méthode = $t \times s_{n-1}$	202
Tableau D.1 – Effet de la composition de la matrice sur les limites de détection de certains éléments contrôlés	204
Tableau D.2 – Limites de détection en mg/kg pour les éléments réglementés dans diverses matrices.....	205
Tableau D.3 – Résultats moyens et taux de rétablissement pour le plomb obtenus au cours de l'étude IIS2	207
Tableau D.4 – Résultats moyens et taux de rétablissement pour le mercure, obtenus au cours de l'étude IIS2	208
Tableau D.5 – Résultats moyens et taux de rétablissement pour le cadmium, obtenus au cours de l'étude IIS2	208
Tableau D.6 – Résultats moyens et taux de rétablissement pour le chrome total, obtenus au cours de l'étude IIS2	209
Tableau D.7 – Résultats moyens et taux de rétablissement pour le brome total, obtenus au cours de l'étude IIS2.....	210
Tableau E.1 – Programme de digestion des échantillons aux micro-ondes (puissance fournie pour cinq récipients).....	212
Tableau F.1 – Interférences spectrales pour les longueurs d'onde du cadmium et du plomb	213
Tableau F.2 – Exemples de rapports masse/charge (m/z).....	214
Tableau F.3 – Exemples de longueurs d'ondes pour AAS	214

Tableau G.1 – Interférences spectrales pour les longueurs d'onde du cadmium et du plomb	215
Tableau G.2 – Exemples de rapports masse/charge (m/z)	218
Tableau G.3 – Exemples de longueurs d'onde pour AAS.....	218
Tableau H.1 – Programme pour la digestion d'échantillons aux micro-ondes.....	219
Tableau H.2 – Interférences spectrales pour les longueurs d'onde du cadmium et du plomb	219
Tableau H.3 – Exemples de rapports masse/charge (m/z).....	222
Tableau H.4 – Exemples de longueurs d'ondes pour AAS	222

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

PRODUITS ÉLECTROTECHNIQUES – DÉTERMINATION DES NIVEAUX DE SIX SUBSTANCES RÉGLEMENTÉES (PLOMB, MERCURE, CADMIUM, CHROME HEXAVALENT, DIPHENYLES POLYBROMES, DIPHENYLETHERS POLYBROMES)

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés «Publication(s) de la CEI»). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de 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 62321 a été établie par le comité d'études 111 de la CEI: Normalisation environnementale pour les produits et les systèmes électriques et électroniques.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
111/116/FDIS	111/125/RVD

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

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

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

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

INTRODUCTION

L'utilisation largement répandue des produits électrotechniques a attiré une attention accrue concernant leur impact sur l'environnement. Dans de nombreux pays, dans le monde entier, ceci a conduit à une adaptation des réglementations relatives aux déchets, aux substances et à la consommation d'énergie des produits électrotechniques.

L'emploi de certaines substances comme le plomb (Pb), le mercure (Hg), le cadmium (Cd), le chrome hexavalent (Cr(VI)) contenus dans des composés inorganiques et organiques, ainsi que deux types de retardateurs de flammes bromés (diphényles polybromés (PBB), et diphényles éthers polybromés (PBDE) dans les produits électrotechniques est réglementé par la législation régionale en vigueur et en cours d'élaboration.

L'objet de la CEI 62321 est par conséquent de fournir, à une échelle mondiale cohérente, des méthodes d'essai qui permettront à l'industrie électrotechnique de déterminer les niveaux des substances réglementées Pb, Hg, Cd, Cr(VI) et leurs composés ainsi que les PBB et les PBDE dans les produits électrotechniques.

PRODUITS ÉLECTROTECHNIQUES – DÉTERMINATION DES NIVEAUX DE SIX SUBSTANCES RÉGLEMENTÉES (PLOMB, MERCURE, CADMIUM, CHROME HEXAVALENT, DIPHENYLES POLYBROMES, DIPHENYLETHERS POLYBROMES)

1 Domaine d'application

La CEI 62321, qui est une Norme internationale, spécifie la détermination des niveaux de plomb (Pb), de mercure (Hg), de cadmium (Cd), de chrome hexavalent (Cr(VI)) contenus dans des composés inorganiques et organiques, ainsi que de deux types de retardateurs de flammes bromés, diphényles polybromés (PBB) et diphényles éthers polybromés (PBDE) contenus dans les produits électrotechniques.

Cette norme fait référence à l'échantillon comme étant l'objet à traiter et à mesurer. L'entité qui réalise les essais définit la nature de l'échantillon et la manière de l'obtenir, et non pas la présente norme.

NOTE 1 Des instructions supplémentaires quant à la manière d'obtenir des échantillons représentatifs à partir de produits électroniques finis afin de vérifier leur teneur en substances réglementées peuvent être trouvées dans la future norme CEI/PAS (PAS: *Publicly Available Specification – Spécification Accessible au Public*) relative au désassemblage pour échantillonnage.¹

Il est à noter que la sélection de l'échantillon peut affecter l'interprétation des résultats des essais.

La présente norme ne détermine pas:

- la définition d'une «unité» ou d'une «matière homogène» comme échantillon;
- la procédure de démontage permettant d'obtenir un échantillon;
- les procédures d'évaluation.

NOTE 2 Des instructions supplémentaires concernant les procédures d'évaluation sont données dans la future Spécification Technique CEI/TS 62476^{[1]2}.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

ISO/CEI Guide 98:1995, *Guide ISO pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM)*

ISO 3696, *Eau pour laboratoire à usage analytique – Spécification et méthodes d'essai*

ISO 5961, *Qualité de l'eau – Dosage du cadmium par spectrométrie d'absorption atomique*

ISO 17025, *Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais*

¹ A l'étude, aucun numéro n'est encore attribué.

² Les chiffres entre crochets se réfèrent à la bibliographie.

3 Termes, définitions et abréviations

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

3.1 Termes et définitions

3.1.1

analyte

substance à mesurer

3.1.2

étalon

référence d'étalonnage

substance sous forme solide ou liquide, à une (des) concentration(s) connue(s) et stable(s) d'analyte(s), utilisée pour établir la réponse des instruments (courbe d'étalonnage) en fonction de la (des) concentration(s) d'analyte(s)

3.1.3

témoin d'étalonnage

substance de forme et de composition matricielle identiques à (aux) l'étalon(s), mais ne contenant pas d'analyte(s)

3.1.4

matériau de référence certifié**MRC**

matériau de référence, accompagné d'un certificat, dont une (ou plusieurs) valeur(s) de la (des) propriété(s) est (sont) certifiée(s) par une procédure qui établit son raccordement à une réalisation exacte de l'unité dans laquelle les valeurs de propriété sont exprimées et pour laquelle chaque valeur certifiée est accompagnée d'une incertitude à un niveau de confiance indiqué

[Guide 30 de l'ISO]^[2]

3.1.5

matière digérée

solution obtenue une fois achevé le processus de digestion de l'échantillon

3.1.6

ensemble électronique

groupe de composants, dont l'un au moins est un dispositif électronique, mais dans lequel des parties individuelles peuvent être remplacées sans endommager l'ensemble

EXEMPLE Groupe de composants montés sur une carte de circuit imprimé.

[CEI 60730-1:1999, définition H.2.5.9]^[3]

3.1.7

composants électroniques

dispositifs électriques ou électroniques qui ne peuvent pas être démontés sans destruction ou sans nuire à l'utilisation prévue. Ils sont parfois appelés pièces électroniques ou pièces élémentaires

EXEMPLES Résistances, condensateurs, diodes, circuits intégrés, hybrides, circuits intégrés spécifiques à une application, composants enroulés et relais.

[CEI/TS 62239:2003]^[4]

3.1.8

produit électronique

ensemble et/ou composant électronique et/ou unité remplaçable par l'utilisateur

3.1.9

unité remplaçable par l'utilisateur

URU

pièce, composant ou sous-ensemble facilement déposé (désassemblé mécaniquement) à l'aide d'outils ordinaires

NOTE «Facilement déposé» signifie au moyen d'outils ordinaires permettant d'effectuer des opérations telles que le vissage ou la déconnexion et seulement sans détruire l'unité de manière irréversible.

[Guide CEI 114:2005, définition 3.7]^[5]

3.1.10

matrice

matériau ou substance et sa forme ou son état dans lequel l'analyte est encastré ou auquel l'analyte est attaché

3.1.11

système de mesure basé sur les performances

SMBP

ensemble de processus qui spécifient les besoins en données, les exigences ou limites de programmes ou projets et qui servent de critères pour sélectionner les méthodes appropriées permettant de répondre à ces besoins de manière économique

NOTE Les critères peuvent être publiés dans des réglementations, des documents d'instructions techniques, des autorisations, des plans de travail ou des ordonnances d'exécution.

3.1.12

matériau de référence

matériau ou substance dont une propriété ou plus sont suffisamment homogènes et bien établies pour être utilisées pour l'étalonnage d'un appareil, l'évaluation d'une méthode de mesure ou l'affectation de valeurs aux matériaux

[Guide 30 de l'ISO, modifié]

3.2 Abréviations

AAS	Spectrométrie d'absorption atomique (<i>Atomic absorption spectrometry</i>)
ABS	Acrylonitrile butadiène styrène
AFS	Spectrométrie de fluorescence atomique (<i>Atomic fluorescence spectrometry</i>)
ASTM	Société Américaine pour des Essais et des Matériaux (<i>ASTM: American Society for Testing and Materials</i>)
BCR	Bureau Communautaire de Référence
BL	En dessous de la limite (<i>Below limit</i>)
BSA	N,O-bis triméthylsilyle acétamide
BSTFA	N,O-bis triméthylsilyle trifluoroacétamide
CCC	étalon de vérification continue de l'étalonnage (<i>Continuing calibration check standard</i>)
CCFL	Lampe fluorescente à cathode froide (<i>Cold cathode fluorescent lamp</i>)
CFR	Code des Réglementations Fédérales (<i>Code of Federal Regulations</i>)
MRC	Matériau de référence certifié
CV-AAS	Spectrométrie d'absorption atomique à vapeur froide (<i>Cold vapour atomic absorption spectrometry</i>)

CV-AFS	Spectrométrie de fluorescence atomique à vapeur froide (<i>Cold vapour atomic fluorescence spectrometry</i>)
DBOFB	Dibromooctafluorobiphényle 4,4'
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMDCS	Diméthylchlorosilane dans une solution de dichlorométhane (<i>Dimethyldichlorosilane in dichloromethane</i>)
CE	Communauté européenne
EDXRF	Fluorescence X à dispersion en énergie (<i>Energy dispersive X-ray fluorescence</i>)
EI	Ionisation par impact électronique (<i>Electron ionization</i>)
EN	Norme Européenne (<i>European norm</i>)
EPA	Agence de protection de l'environnement (<i>Environmental Protection Agency</i>)
EVAC	Acétate d'éthylènevinyle (<i>Ethylene vinyl acetate</i>)
FEP	Perfluoro(éthylène-propylène)
FP	Paramètres fondamentaux (<i>Fundamental parameters</i>)
URU	Unité remplaçable par l'utilisateur
GC	Chromatographie en phase gazeuse (<i>Gas chromatography</i>)
GC-MS	Chromatographie en phase gazeuse – Spectrométrie de masse (<i>Gas chromatography–mass spectrometry</i>)
GLP	Bonnes pratiques de laboratoire (<i>Good laboratory practice</i>)
HPLC-UV	Chromatographie liquide à haute performance à rayonnement ultraviolet (<i>High-performance liquid chromatography – ultraviolet</i>)
ICP-MS	Spectrométrie de masse couplée à un plasma induit (<i>Inductively coupled plasma mass spectrometry</i>)
ICP-OES	Spectrométrie d'émission optique couplée à un plasma induit (<i>Inductively coupled plasma optical emission spectrometry</i>)
IS	Etalon interne (<i>Internal standard</i>)
IIS	Etude internationale inter-laboratoire (<i>International interlaboratory study</i>)
IUPAC	Union internationale de la Chimie Pure et Appliquée (IUPAC: <i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>)
JIS	Norme industrielle japonaise (<i>Japanese Industrial Standard</i>)
LN	Azote liquide (<i>Liquid nitrogen</i>)
LOD	Limite de détection (<i>Limit of detection</i>)
LOQ	Limite de quantification (<i>Limit of quantification</i>)
MDL	Limite de détection de la méthode (<i>Method detection limit</i>)
NIST	Institut National de Technologie et des Normes (<i>National Institute of Standards and Technology</i>)
NMIJ	Institut National de Metrologie du Japon (National Metrology Institute of Japan)
OctaBB	Octabromobiphényle
OctaBDE	Octabromodiphényléther
OL	Hors limite (<i>Over limit</i>)
PAS	Spécification Accessible au Public (<i>Publicly Available Specification</i>)
PBB	Diphényle polybromé (<i>Polybrominated biphenyl</i>)
PBDE	Diphényléther polybromé (<i>Polybrominated diphenyl ether</i>)
SMBP	Système de mesure basé sur les performances
PC	Polycarbonate
PE	Polyéthylène

PE-HD	Polyéthylène haute densité
PFA	(Résine) en perfluoroalcoylalkane
PS-HI	Polystyrène choc (<i>High-impact polystyrene</i>)
PTFE	Polytétrafluoroéthylène
PTV	Vaporisation à température programmée (<i>Programmable temperature vaporization</i>)
PVC	Chlorure de polyvinyle (<i>Polyvinyl chloride</i>)
PWB	Carte de circuit imprimé (<i>Printed wiring board</i>)
AQ	Assurance qualité
CQ	Contrôle de la qualité
HR	Humidité relative
RSD	Ecart type relatif (<i>Relative standard deviation</i>)
SIM	Surveillance sélective des ions ou surveillance à ion unique (<i>Single (or "selected") ion monitoring</i>)
SOP	Procédure Normalisée d'Utilisation (SOP : <i>Standard Operating Procedure</i>)
SRM	Matériau de référence étalon (<i>Standard reference material</i>)
TFM	Tétrafluoroéthylène modifié
US	Etats-Unis (<i>United States</i>)
WC	Carbure de tungstène (<i>Tungsten carbide</i>)
WDXRF	Fluorescence X à dispersion en longueur d'onde (<i>Wavelength dispersive X-ray fluorescence</i>)
XRF	Fluorescence X (<i>X-ray fluorescence</i>)

4 Méthodes d'essai – Présentation

4.1 Champ d'application

Les méthodes d'essai permettant de déterminer les niveaux de substances réglementées se composent de deux étapes importantes:

- Les méthodes d'essai analytiques
- Les applications en laboratoire

Des méthodes d'essai analytiques ont été développées et validées de manière à s'assurer qu'elles conviennent à leur objectif. Elles sont réparties en cinq parties principales:

- Présentation
- L'appareillage/les équipements et les matériaux
- Les réactifs
- La préparation des échantillons
- La méthode d'essai proprement dite, qui comprend:
 - l'étalonnage;
 - les performances des instruments;
 - l'analyse des échantillons;
 - le calcul des résultats de l'analyse;
 - le rapport d'essai;
 - le contrôle de la qualité.

Des descriptifs des différentes méthodes d'essai suivent ces grandes lignes.

La mise en œuvre en laboratoire n'est pas traitée dans la présente norme car les laboratoires sont capables d'appliquer des méthodes d'essai décrites en recourant à d'autres méthodes et normes émanant d'autres sources. L'étape de la mise en œuvre comporte des mesures d'assurance qualité et un protocole de validation qui documente les performances de la méthode analytique qui utilise des instruments en laboratoire. L'emploi de systèmes d'assurance qualité tels que les bonnes pratiques de laboratoire (GLP) et/ou une accréditation fondée sur des systèmes internationaux ou nationaux similaires (par exemple l'ISO 17025) est fortement encouragé.

4.2 Echantillon

La présente norme se réfère à l'échantillon comme étant l'objet à traiter et à mesurer conformément aux méthodes d'essai afin de déterminer les niveaux de substances réglementées. Il peut s'agir d'un polymère, d'un métal ou d'un composant électronique.

L'entité qui exécute les méthodes d'essai doit définir la nature de l'échantillon et la manière de l'obtenir, en se fondant sur les documents normatifs applicables.

NOTE L'entité peut être aussi bien l'organisation qui commande le travail que celle chargée de le réaliser. Dans la pratique, le demandeur et l'analyste conviendront probablement de l'échantillon à prélever.

L'entité peut décider de préparer un échantillon de matériau homogène. Les méthodes d'essai applicables aux métaux ou aux polymères conviennent particulièrement bien à ce type d'échantillon.

L'entité peut également décider de préparer un échantillon constitué d'un composant électronique, d'un ensemble électronique ou d'une unité remplaçable par l'utilisateur (URU). Les méthodes d'essai applicables aux produits électroniques conviennent particulièrement bien à ce type d'échantillon.

Les méthodes d'obtention de l'échantillon ne relèvent pas du domaine d'application de la présente norme. D'autres instructions peuvent être trouvées dans la future Spécification Accessible au Public (PAS) de la CEI, relative au désassemblage pour échantillonnage.

4.3 Méthodes d'essai – Organigramme

La Figure 1 représente un organigramme des méthodes d'essai permettant de déterminer les niveaux de substances réglementées dans des produits électrotechniques.

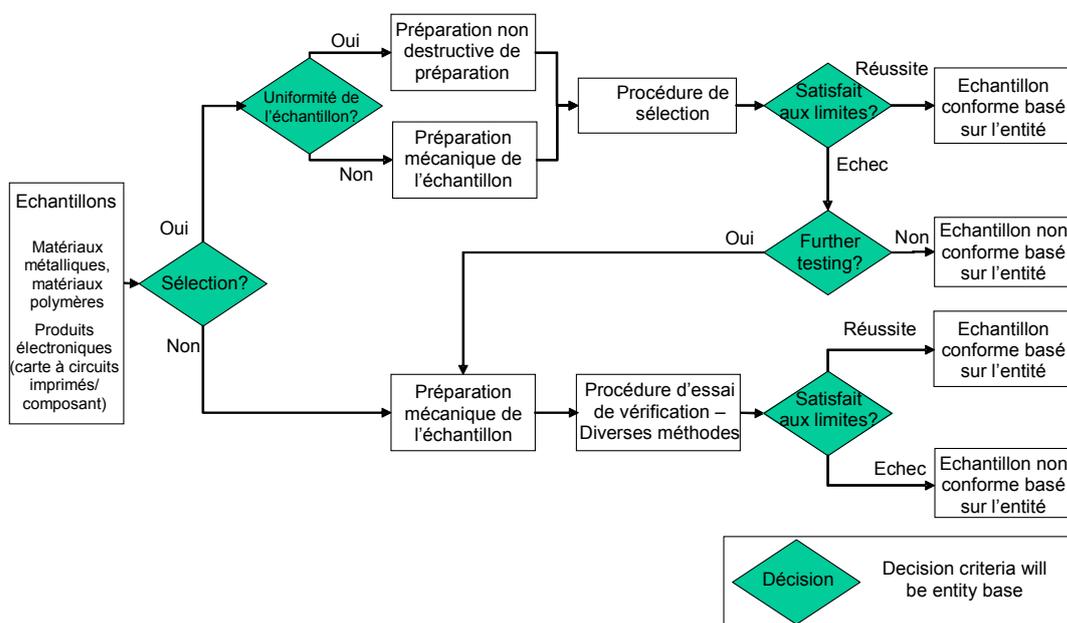


Figure 1 – Organigramme des méthodes d'essai

Après avoir obtenu l'échantillon, qui peut être un polymère, un métal ou un produit électronique (par exemple sous forme de composants électroniques, d'ensembles électroniques ou de URU), il convient de décider s'il faut utiliser la procédure d'essai de sélection ou la procédure d'essai de vérification en utilisant diverses méthodes d'essai.

La procédure d'essai de sélection peut consister en une mesure directe de l'échantillon (préparation non destructive de l'échantillon) ou en une destruction de l'échantillon pour le rendre uniforme (préparation mécanique de l'échantillon). Cette décision doit être prise après estimation de l'uniformité de l'échantillon. La sélection des échantillons représentatifs de nombreux matériaux uniformes (tels que les polymères, les alliages, le verre) peut être réalisée de manière non destructive alors qu'une préparation mécanique peut être une solution appropriée pour d'autres échantillons plus complexes (tels qu'une URU). La préparation mécanique de l'échantillon est la même pour la procédure d'essai de sélection et pour la procédure d'essai de vérification. La procédure de préparation mécanique de l'échantillon est décrite dans l'Article 5.

La sélection d'un échantillon est effectuée à l'aide d'un spectromètre XRF (par exemple EDXR (fluorescence X à dispersion en énergie) ou WDXRF (fluorescence X à dispersion en longueur d'onde), à condition qu'il présente les caractéristiques de performance décrites dans l'Article 6. La procédure d'essai de sélection doit être appliquée dans des conditions maîtrisées. Il existe des limites à l'utilisation de la technique d'analyse XRF et à l'applicabilité des résultats obtenus, même si sa rapidité d'exécution et son efficacité en termes de ressources présentent des avantages, notamment lorsqu'il s'agit de répondre aux exigences de l'industrie électrotechnique.

La procédure d'essai de vérification est appliquée après préparation mécanique de l'échantillon à l'aide de diverses méthodes d'essai adaptées aux substances réglementées et à l'échantillon, qui peut être un polymère, un métal ou un produit électronique. Le Tableau 1 récapitule les méthodes de vérification qui sont décrites en détail dans les Articles 7 à 10 ainsi que dans les Annexes A, B et C. L'objectif de l'utilisation d'une méthode d'essai de vérification particulière est de garantir des résultats aussi précis que possible, même s'il est fort probable que son exécution nécessite davantage de ressources.

Tableau 1 – Récapitulatif du contenu de la procédure d'essai de vérification

Étapes	Substances	Polymères	Métaux	Produits électroniques (cartes à circuits imprimés/composants)
Préparation mécanique de l'échantillon (voir Article 5)		Mesure directe Broyage	Mesure directe Broyage	Broyage
Préparation chimique de l'échantillon		Digestion aux micro-ondes Digestion par des acides Incinération par voie sèche Extraction des solvants	Digestion aux micro-ondes Digestion par des acides	Digestion aux micro-ondes Digestion par des acides Extraction des solvants
Définition de la technique d'analyse (y compris les marges d'erreur typiques)	PBB/PBDE	GC-MS (voir Annexe A)	NA	GC-MS (voir Annexe A)
	Cr(VI)	Digestion alcaline/ Méthode colorimétrique (voir Annexe C)	Procédure d'essai à la touche/ procédure d'extraction à l'eau bouillante (voir Annexe B)	Digestion alcaline/ Méthode colorimétrique (voir Annexe C)
	Hg	CV-AAS, CV-AFS, ICP-OES, ICP-MS (voir Article 7)		
	Pb/Cd	ICP-OES, ICP-MS, AAS (voir Article 8)	ICP-OES, ICP-MS, AAS (voir Article 9)	ICP-OES, ICP-MS, AAS (voir Article 10)

A l'issue de la procédure d'essai de vérification, il doit être décidé si l'échantillon satisfait aux limites en fonction des critères fixés par l'entité pour les substances réglementées.

4.4 Adaptation à la matrice

Les méthodes d'essai applicables aux substances réglementées présentes à des niveaux relativement faibles parmi d'autres éléments ou composés chimiques présents à des concentrations relativement élevées, ou ceux représentant le constituant principal de l'échantillon, dépendent très souvent du matériau ou de la matrice. Par conséquent, les méthodes d'essai doivent être adaptées aux matériaux à soumettre à l'essai, soit en introduisant les témoins appropriés et des échantillons d'étalonnage adaptés à la matrice, soit en réalisant une préparation qui sépare l'analyte des matériaux qui y adhèrent ou de la matrice principale. Les types principaux de matériaux (ou matrices) d'un équipement électronique sont des polymères (pour la plupart des polymères techniques contenant des additifs et dont les surfaces sont parfois recouvertes d'un revêtement), des métaux ou des alliages (qui peuvent également être recouverts d'un revêtement) et des produits électroniques.

4.5 Limites de détection (LOD) et limites de quantification (LOQ)

Sous sa forme la plus simple, une limite de détection (LOD) ou la limite de détection de la méthode (MDL) est en général décrite comme la quantité ou la concentration la plus faible d'analyte dans un échantillon pour essai qui peut être différenciée de zéro de manière fiable pour un système de mesure donné.

Les limites de détection d'un instrument représentent l'aptitude d'un instrument à différencier les faibles concentrations d'analytes par rapport au «zéro» dans une solution à blanc ou solution étalon, et sont en général utilisées par les fabricants pour démontrer la capacité de mesure d'un système (par exemple celle d'un spectromètre d'absorption atomique). Même si les limites de détection des instruments sont utiles, elles sont souvent bien plus basses

qu'une limite de détection représentant un processus de mesure d'une méthode d'analyse complète.

Les limites de détection d'une méthode d'analyse complète sont de préférence déterminées expérimentalement en réitérant les mesures indépendantes sur des matrices d'échantillons à faible teneur ou enrichies (par exemple du plastique) effectuées sur l'ensemble de la procédure d'essai, y compris la digestion ou l'extraction de l'échantillon. Pour cette analyse, il a été suggéré d'utiliser au minimum six répliques et concentrations d'analyte de 3 à 5 fois la limite estimée de détection de la méthode. La limite de détection de la méthode complète pour l'ensemble d'une procédure d'essai est déterminée en multipliant l'écart-type des répétitions d'essais par un facteur approprié. L'IUPAC (en anglais: International Union of Pure and Applied Chemistry) recommande un facteur de 3 pour un minimum de six répétitions, tandis que l'US EPA (en anglais: *United States Environmental Protection Agency*) utilise un intervalle de confiance unilatéral, avec un multiplicateur égal à la valeur t de Student, choisi en fonction du nombre de répétitions et du niveau de confiance (par exemple $t = 3,36$ pour six répétitions avec un niveau de confiance de 99 %).

La limite de quantification (LOQ) ou la limite de quantification estimée pour un système de mesure donné est en général décrite comme la concentration la plus faible qui peut être déterminée de manière fiable dans des limites de justesse spécifiées ou acceptables dans des conditions de fonctionnement normales de laboratoire. La limite de justesse acceptable est souvent définie à 10 % de l'écart-type relatif ou simplement exprimée comme un multiple fixe (2 à 10) de la limite de détection de la méthode.

4.6 Rapport d'essai

Le travail effectué par le laboratoire d'essai doit faire l'objet d'un rapport présentant de manière précise, claire et non ambiguë, les résultats des essais et les autres informations afférentes. Chaque rapport d'essai doit inclure, au moins, les informations suivantes:

- 1) Le nom, adresse et lieu d'implantation de tout laboratoire participant à l'analyse et le nom de l'opérateur.
- 2) La date de réception de l'échantillon et la (les) date(s) d'exécution de l'essai ou des essais.
- 3) L'identification unique du rapport (un numéro de série, par exemple) et de chaque page, ainsi que le nombre total de pages du rapport.
- 4) La description et l'identification de l'échantillon, y compris la description de tout désassemblage de produit pour obtenir l'échantillon pour essai.
- 5) Une référence à la présente norme, la méthode utilisée ou un équivalent basé sur les performances (y compris méthode(s) de digestion et équipements).
- 6) La limite de détection (LOD) ou la limite de quantification (LOQ).
- 7) Les résultats de l'essai exprimés en milligrammes/kilogramme (mg/kg] dans les échantillons soumis à l'essai.
- 8) Tout détail optionnel non précisé dans la présente norme et tout autre facteur pouvant avoir affecté les résultats. Toute dérogation, après accord ou autre, à la procédure d'essai spécifiée dans le présent document.

Les résultats de tous les essais de contrôle de qualité (CQ) (par exemple résultats des témoins, pointes de matrice, etc.) ainsi que la liste des matériaux de référence utilisés et leur origine doivent être fournis sur demande.

Les corrections ou les additifs au rapport d'essai après sa publication ne doivent être effectué(e)s que dans un autre document repéré en conséquence, par exemple «Amendement/Addendum au numéro de série XXX du rapport d'essai» (ou autre système d'identification), et doivent satisfaire aux exigences applicables de 4.2 à 4.6.

4.7 Autres méthodes d'essai

D'autres méthodes d'essai, méthodes de digestion ou techniques d'analyse peuvent être utilisées à condition que leur efficacité en termes de performances ait été validée conformément aux critères du système de mesure basés sur les performances (SMBP) et référencés dans les articles de contrôle de la qualité des méthodes d'essai. Toute divergence par rapport aux méthodes d'essai décrites doit être évaluée et documentée dans le rapport d'essai.

5 Préparation mécanique de l'échantillon

5.1 Présentation

5.1.1 Champ d'application

Le présent article décrit les techniques courantes de réduction mécanique de la taille des produits électrotechniques, de leurs sous-unités ou des parties constitutives, préalablement à l'analyse des substances réglementées. Les articles de la méthode d'essai décrits dans la présente norme comportent des exigences applicables à la manutention et à la préparation des échantillons dans des situations spécifiques. Le présent article fournit des lignes directrices concernant le traitement de parties sélectionnées d'une entité. L'utilisateur peut choisir d'appliquer une ou plusieurs des méthodes décrites dans le présent article afin de produire les échantillons devant être soumis à l'essai. La sélection de la (des) technique(s) appropriée(s) dépend de la taille de particule requise pour la méthode d'essai à utiliser. D'autres méthodes de préparation mécanique de l'échantillon peuvent être employées à condition que la granulométrie requise de l'échantillon soit obtenue sans contaminer ou altérer l'échantillon par des substances réglementées.

5.1.2 Assurance qualité

Face au risque d'une erreur d'analyse due à la contamination ou à l'évaporation des composants volatils (par exemple vaporisation sous l'effet de la chaleur), ou à une perte de matériau par émission de poussières, il est important de choisir l'équipement et les procédures de nettoyage appropriés.

La contamination peut être due à l'équipement de broyage et aux accessoires éventuels qui sont en contact avec l'échantillon. Pour ce qui concerne l'équipement choisi, on doit connaître les éléments qui peuvent se dégager et contaminer l'échantillon d'analyse, par exemple du cobalt (Co) et du tungstène (W) peuvent se dégager d'un équipement en carbure de tungstène (WC) et du chrome (Cr), du nickel (Ni), du molybdène (Mo) ainsi que du vanadium (V) peuvent se dégager d'un équipement en acier inoxydable.

Le laboratoire doit démontrer par expérimentation qu'un processus mécanique n'entraîne aucune contamination par des quantités décelables de substances réglementées, ou par la perte de ces dernières. Le laboratoire doit démontrer par expérimentation que la procédure employée pour le nettoyage de l'équipement de préparation mécanique de l'échantillon prévient la contamination de l'échantillon par des substances réglementées provenant de l'échantillon précédent.

Ceci peut être démontré par transformation et analyse des matériaux de référence certifiés et des témoins avant ou après transformation d'un matériau réputé contenir des niveaux significatifs de substances réglementées. Les matériaux de référence certifiés ne sont pas obligatoires. Les matériaux utilisés doivent présenter une teneur connue en substances réglementées afin de pouvoir déterminer que les procédés mécaniques de meulage/broyage/cope n'entraînent pas de contamination ou de perte de substances réglementées. L'efficacité de la procédure de préparation mécanique de l'échantillon peut être surveillée en continu par des pratiques courantes de contrôle de la qualité, y compris les pointes de matrice et les échantillons témoins.

5.2 Appareillage, équipements et matériaux

L'appareillage, les équipements et les matériaux suivants sont nécessaires:

- a) Un broyeur primaire ou à couteaux, avec tamis de fond en acier inoxydable de 4 mm et 1 mm ou similaire.
- b) Un broyeur à centrifuge à tamis d'acier revêtu de carbure de tungstène (WC) de 25 µm et à rotor sextuple revêtu de WC (pour un matériau plastique uniforme, un tamis d'acier de 1 mm convient). Un tamis en titane de 1 mm et un rotor de tamis en acier/titane doit être utilisé pour éviter tout risque d'introduction d'impuretés pendant le broyage.
- c) Une meule/broyeur à impact cryogénique, sans lame, de type «congélateur» à bac d'azote liquide autonome, carter isolé, contrôle de vitesse, chronomètre programmable et verrouillage de sécurité.
- d) Un mélangeur d'homogénéisation (par exemple mélangeur).
- e) Une balance d'analyse d'une précision de 0,000 1 g.
- f) Des brosses (différentes tailles).
- g) Du papier.
- h) Des ciseaux et des cisailles à tôle forte.
- i) Un bécher en verre.
- j) De l'azote liquide (LN₂).

NOTE L'azote liquide est plutôt volatil et peut donner lieu à une carence en oxygène dans la zone d'utilisation, surtout si elle est fermée. Le laboratoire est responsable de la conformité aux procédures de sécurité appropriées et de l'emploi d'équipements de protection lors du broyage cryogénique.

- k) Un entonnoir à poudre.
- l) Des gants.
- m) Des lunettes de sécurité.
- n) Du polyéthylène (à utiliser avec le LN₂).

5.3 Mode opératoire

5.3.1 Coupe manuelle

La coupe manuelle convient à une découpe et à une préparation grossières des échantillons avant une réduction supplémentaire. Les effectifs d'échantillons maximaux recommandés sont énumérés ci-dessous, mais dépendront de la spécification des équipements utilisés dans les procédés de préparation ultérieurs.

- a) Produits électroniques: Les échantillons sont prédécoupés à une taille de 40 mm × 40 mm à l'aide d'une cisaille à tôle forte (5.2.h).
- b) Tôles métalliques: Les échantillons sont prédécoupés à une taille de 40 mm × 40 mm à l'aide d'une cisaille à tôle forte (5.2.h).
- c) Polymères: Les échantillons sont prédécoupés à une taille de 5 mm × 5 mm à l'aide d'une cisaille à tôle forte (5.2.h). Les feuilles minces de polymère doivent être découpées en petits morceaux à l'aide d'une cisaille (5.2.h).

5.3.2 Broyage primaire

Le broyage primaire convient pour réduire les échantillons à environ 1 mm de diamètre. Refroidir, si nécessaire, les échantillons à l'azote liquide (5.2.j). Le broyage cryogénique est recommandé pour les échantillons organiques. Placer les échantillons dans un récipient en polyéthylène (5.2.n) pour le refroidir à l'azote liquide (5.2.j) constitue un exemple de préparation cryogénique. Attendre que l'azote liquide se soit dissipé (5.2), puis attendre 10 min supplémentaires. Broyer alors les échantillons dans le broyeur (5.2.c) muni d'un tamis de fond en acier inoxydable de 4 mm. Pendant le broyage, maintenir l'échantillon à une température de < -20 °C. Essuyer soigneusement le broyeur et recueillir toutes les particules. Regarnir le broyeur (5.2.c) avec un tamis de fond prépesé en acier inoxydable de 1 mm et

retraiter le matériau de 4 mm. Enlever soigneusement le broyeur (5.2.c) et recueillir toutes les particules. Prévoir un temps de refroidissement de 5 min entre les cycles de broyage.

NOTE Il est possible que les matériaux métalliques ne puissent être broyés qu'à des tailles de particules de 4 mm (même si des particules de 1 mm sont préférables).

5.3.3 Homogénéisation

L'homogénéisation convient à la préparation des échantillons après broyage primaire dans le mélangeur avant de poursuivre la réduction de taille dans le broyeur à centrifuge (5.2.b). Utiliser un conteneur d'une capacité égale au double du volume de poudre à mélanger. Régler le mélangeur à sa vitesse moyenne et mélanger la poudre jusqu'à ce qu'elle soit homogène.

5.3.4 Broyage fin

Le broyage fin convient à la réduction des échantillons à <1 mm de diamètre. Refroidir la poudre d'échantillon homogénéisée à LN₂ (5.2.j) si nécessaire. Le broyage cryogénique est recommandé pour les échantillons organiques ne comportant pas de parties métalliques. Veiller à ne pas laisser LN₂ (5.2.j) venir en contact direct avec la poudre, afin d'empêcher les éclaboussures et la perte d'échantillon, par exemple en utilisant un récipient en polyéthylène (5.2.n). Broyer la poudre d'échantillon dans le broyeur à centrifuge (5.2.b). Essuyer soigneusement le broyeur (5.2.n) et recueillir toute la poudre. La matière recueillie peut être tamisée de manière à obtenir un échantillon suffisamment homogène de classe granulométrique connue.

5.3.5 Broyage très fin des polymères et matières organiques

Cette procédure convient pour réduire des échantillons d'un diamètre de 500 µm ou moins. Elle ne convient pas au métal, au verre ou aux matériaux similaires durs et coupants. Environ 3 g à 10 g de matériau coupé grossièrement (sections de 3 mm à 5 mm) à broyer sont placés dans le tube d'échantillon rempli entre deux-tiers et trois-quarts de sa capacité. Ajouter le corps broyant et fixer les extrémités du tube. Laisser refroidir le broyeur à impact cryogénique sans lame (5.2.c) à la température ambiante pendant 15 min en remplissant le réservoir avec LN₂ (5.2.j). Placer les tubes contenant les échantillons dans le broyeur (5.2.c) et verrouiller le couvercle en place. Un ou plusieurs tamis peuvent être ajoutés pour obtenir un échantillon suffisamment homogène.

6 Détection par spectrométrie par fluorescence X (XRF)

6.1 Présentation

La présente méthode d'essai décrit des procédures d'analyse de détection de cinq substances, spécifiquement le plomb (Pb), le mercure (Hg), le cadmium (Cd), le chrome total (Cr) et le brome (Br) dans des matériaux uniformes utilisés dans les produits électrotechniques en utilisant la technique d'analyse de spectrométrie par fluorescence X (XRF). Ceci s'applique aux polymères, aux métaux et aux matériaux céramiques. La méthode d'essai peut être appliquée aux matières premières, à des matériaux particuliers tirés de produits et à des mélanges «homogénéisés» de plusieurs matériaux. La détection d'un échantillon est réalisée au moyen de tout type de spectromètre XRF, à condition qu'il ait les caractéristiques de performance spécifiées dans la présente méthode d'essai. Tous les types de spectromètres XRF ne conviennent pas à toutes les tailles et toutes les formes d'échantillon. Une attention toute particulière doit être accordée au choix du modèle de spectromètre approprié à la tâche concernée.

La présente méthode d'essai est conçue spécifiquement pour la détection du plomb, du mercure, du cadmium, du chrome et du brome (Pb, Hg, Cd, Cr, Br) dans les matériaux uniformes qui sont à la base de la plupart des produits électrotechniques. De manière générale, la spectrométrie XRF fournit des informations sur la quantité totale de chaque élément présent dans l'échantillon, mais n'identifie pas les composés ou les états de valence

des éléments. Par conséquent, la détection du chrome et du brome doit faire l'objet d'une attention toute particulière, car les résultats reflèteront uniquement la présence de chrome total et de brome total. La présence de chrome hexavalent Cr(VI) ou de retardateurs de flammes bromés PBB ou PBDE, doit être vérifiée par une autre méthode d'essai conformément au Tableau 1.

Lorsque cette méthode est appliquée à des produits électroniques «en l'état» qui, de par la nature même de leur conception, ne sont pas uniformes, l'interprétation des résultats doit faire l'objet d'une attention toute particulière. De la même manière, l'analyse du Cr dans des couches de conversion peut être difficile du fait de la présence de Cr dans le matériau de substrat et/ou du fait d'une sensibilité insuffisante au Cr dans des couches de revêtement de conversion généralement très fines (plusieurs centaines de nm).

Les spectromètres XRF peuvent être étalonnés pour couvrir une plage de fractions massiques allant de la limite de détection dans une matrice particulière à une composition de 100 % par masse. La spectrométrie XRF est une technique comparative; son fonctionnement dépend de la qualité de l'étalonnage qui, à son tour, dépend de la qualité des étalons et du modèle utilisés pour représenter la réponse de l'instrument. L'analyse XRF subit les effets de la matrice (absorption et activation) ainsi que les interférences spectrales.

Les performances de la présente méthode d'essai ont été vérifiées pour les substances suivantes présentes dans divers supports et dans des plages de concentration telles que spécifiées dans les Tableaux 2 à 6.

Tableau 2 – Plages de concentration de plomb soumises à l'essai dans des matériaux

Substance/élément	Plomb							
Paramètre	Unité de mesure	Support/matériau soumis à l'essai						
		ABS	PE	Acier faiblement allié	Alliage Al-Si	Alliage d'étain	Verre	Carte à circuits imprimés broyée
Concentration ou plage de concentration vérifiée par essai	mg/kg	109 à 184	14 à 108	30	190 à 930	174	240 000	22 000 à 23 000

Tableau 3 – Plages de concentration de mercure soumises à l'essai dans des matériaux

Substance/élément	Mercure		
Paramètre	Unité de mesure	Support/matériau soumis à l'essai	
		ABS	PE
Concentration ou plage de concentration vérifiée par essai	mg/kg	100 à 940	4 à 25

Tableau 4 – Plages de concentration de cadmium soumises à l'essai dans des matériaux

Substance/élément	Cadmium			
Paramètre	Unité de mesure	Support/matériau soumis à l'essai		
		Alliage d'étain	ABS	PE
Concentration ou plage de concentration vérifiée par essai	mg/kg	3	11 à 107	22 à 141

Tableau 5 – Plages de concentration de chrome total soumises à l'essai dans des matériaux

Substance/élément	Chrome					
	Unité de mesure	Support/matériau soumis à l'essai				
Paramètre		ABS	PE	Acier faiblement allié	Alliage Al-Si	Verre
Concentration ou plage de concentration vérifiée par essai	mg/kg	28 à 270	18 à 115	240	130 à 1 100	94

Tableau 6 – Plages de concentration de brome soumises à l'essai dans des matériaux

Substance/élément	Brome			
	Unité de mesure	Support/matériau soumis à l'essai		
Paramètre		PS-HI, ABS	PC/ABS	PE
Concentration ou plage de concentration vérifiée par essai	mg/kg	99 138 à 118 400	800 à 2 400	98 à 808

Ces substances présentes dans des supports similaires, hors des plages de concentration spécifiées, peuvent être analysées conformément à la présente méthode d'essai; cependant, les performances correspondantes n'ont pas été établies pour la présente norme.

Il existe deux principales méthodes d'étalonnage en spectrométrie XRF:

- Un étalonnage universel peut être réalisé à l'aide d'approches reposant sur des paramètres fondamentaux (FP). Les approches FP peuvent être étalonnées avec des éléments ou des composés purs ou avec un petit nombre de matériaux de référence de compositions matricielles bien définies. Comme avec tous les étalonnages XRF, l'exactitude est susceptible de s'améliorer lorsque les étalons sont de plus en plus semblables aux échantillons.
- Un étalonnage empirique peut être obtenu en utilisant les matériaux de référence en combinaison avec un algorithme d'étalonnage capable d'apporter des corrections pour la matrice et les interférences spectrales. En principe, un étalonnage empirique n'est valable que pour la matrice de matériaux spécifiques pour laquelle il a été créé, plusieurs étalonnages se révélant nécessaires pour des analyses de matrices multiples. Cependant, pour les besoins de l'essai de détection, il peut être possible d'utiliser le même étalonnage empirique que pour des matériaux de matrices similaires. Les étalons doivent couvrir toute la plage de chaque élément de la matrice. Si un élément susceptible d'interférence n'est pas inclus dans le modèle d'étalonnage, sa présence dans un échantillon peut donner lieu à une erreur significative. Du fait de la disponibilité limitée des étalons, c'est-à-dire des matériaux de référence, il est complexe, voire souvent impossible, d'inclure toutes les interférences possibles des matrices et des interférences spectrales dans une méthode tout en maintenant une précision optimale.

Dans le cas des matériaux enduits et des structures multicouches, aucun résultat précis ne peut être obtenu sans une connaissance préalable de la structure en couches et de l'utilisation d'un modèle d'étalonnage tenant compte de la structure de l'échantillon. Dans le cas d'un revêtement ou d'une couche fine, il faut veiller à ce que la sensibilité du spectromètre XRF soit suffisante pour détecter une petite quantité de matière dans la couche. Si la sensibilité du spectromètre XRF se révélait insuffisante pour mesurer la substance réglementée directement sur le revêtement, il est possible de procéder au retrait physique de la couche de revêtement du substrat afin d'accumuler une quantité suffisante de matière pour la soumettre à analyse.

L'analyse de détection peut être de deux sortes:

- Non destructive – par analyse directe de l'échantillon «en l'état».
- Destructive – en appliquant une ou plusieurs phases de préparation mécanique ou chimique de l'échantillon avant analyse.

Dans ce dernier cas, l'utilisateur doit appliquer la procédure de préparation des échantillons décrite dans l'Article 5. Cette méthode d'essai guide l'utilisateur dans le choix de la bonne approche de présentation de l'échantillon.

6.1.1 Principe

Pour atteindre cet objectif, la méthode d'essai doit permettre une identification rapide et univoque des éléments intéressants. Elle doit présenter, au minimum, un niveau d'exactitude parfois décrit comme semi-quantitatif, ce qui signifie une incertitude relative d'un résultat qui est normalement de 30 % ou plus pour un niveau de confiance défini de 68 %. Certains utilisateurs peuvent tolérer une incertitude relative plus élevée en fonction de leurs besoins. Ce niveau de performance permet à l'utilisateur de trier des matériaux pour des essais supplémentaires. L'objectif général est d'obtenir des informations pour les besoins de la gestion du risque.

Cette méthode d'essai est conçue pour que les analyses de détection puissent être effectuées avec des spectromètres XRF de tous les modèles, complexités et capacités existants. Cependant, les capacités des différents spectromètres XRF couvrent une gamme telle que certains sont relativement inadaptés du point de vue de leur sélectivité et de leur sensibilité, tandis que d'autres sont plus qu'appropriés. Certains spectromètres mesurent facilement une vaste plage de formes et de tailles d'échantillon alors que d'autres, notamment les appareils WDXRF utilisés pour la recherche, seront très limités en termes de prises d'essai.

Etant donné le niveau de performances requises défini ci-dessus et la grande diversité des spectromètres XRF capables d'effectuer des mesures utiles, les exigences posées par la spécification des procédures sont considérablement moins drastiques que pour une méthode d'essai haute performance de détermination quantitative nécessitant de faibles niveaux d'incertitude.

Cette méthode d'essai repose sur le concept des méthodes basées sur les performances. La présente norme spécifie l'appareillage, la préparation des échantillons et l'étalonnage en des termes relativement généraux. Il incombe à l'utilisateur de documenter l'ensemble des procédures élaborées par le laboratoire appliquant cette méthode d'essai. L'utilisateur doit élaborer une procédure écrite pour tous les cas abordés par cette méthode sous le nom «d'instructions de travail».

Cette méthode stipule soigneusement les paramètres de performance des spectromètres et des méthodes qui doivent être documentés par l'utilisateur.

6.1.2 Avertissements

AVERTISSEMENT 1 Les personnes utilisant la méthode d'essai XRF doivent être formées à l'emploi des spectromètres XRF et posséder une expérience pratique de la technique et des exigences de l'échantillonnage.

AVERTISSEMENT 2 Les rayons X sont dangereux pour l'homme. Un soin tout particulier doit être apporté au fonctionnement de l'équipement conformément aux instructions de sécurité du fabricant et à la réglementation locale applicable en matière de santé et de sécurité au travail.

6.2 Appareillage, équipements et matériaux

6.2.1 Spectromètre XRF

Un spectromètre XRF comporte une source d'excitation des rayons X, un moyen de présentation reproductible de l'échantillon, un détecteur de rayons X, un processeur de données et un système de commande.

- a) Source d'excitation des rayons X – Un tube à rayons X ou des sources radio-isotopes sont communément utilisés.
- b) Détecteur de rayons X (sous-système de détection) – Dispositif utilisé pour convertir l'énergie d'un photon de rayons X en une impulsion électrique correspondante d'une amplitude proportionnelle à l'énergie du photon.

6.2.2 Matériaux et outils

Les matériaux utilisés pour la préparation des échantillons pour les mesures XRF doivent être exempts de contamination, plus spécifiquement par les analytes de cette méthode d'essai. Cela signifie qu'aucun matériau de broyage, aucun solvant, aucun flux, etc. ne doivent contenir de quantités détectables de Pb, Hg, Cd, Cr et/ou Br.

Les outils utilisés pour la manipulation des échantillons doivent être choisis de manière à limiter la contamination des échantillons par les analytes de la présente méthode d'essai ainsi que par d'autres éléments éventuels. Les procédures éventuelles utilisées pour nettoyer les outils ne doivent introduire aucun contaminant.

6.3 Réactifs

Les réactifs ne doivent pas contenir de quantités détectables de Pb, Hg, Cd, Cr et/ou Br.

6.4 Echantillonnage

Il est de la responsabilité de l'utilisateur de la présente méthode d'essai de définir l'échantillon pour essai à l'aide des instructions de travail documentées. L'utilisateur peut choisir de définir l'échantillon pour essai de diverses manières, soit par une approche non destructive selon laquelle la prise à mesurer est définie par la surface de vision du spectromètre, soit par une approche destructive selon laquelle la prise à mesurer est extraite du corps du matériau de plus grande surface, et mesurée dans l'état ou détruite et préparée sur la base d'une procédure définie.

6.4.1 Approche non destructive

L'utilisateur de cette méthode d'essai doit:

- a) Déterminer la surface observée par le spectromètre et placer l'échantillon dans cette zone en s'assurant qu'aucun rayon X fluorescent ne sera détecté dans des matériaux autres que la prise d'essai définie. Habituellement, la surface observée par le spectromètre est délimitée par la forme et la limite de la fenêtre de mesure de l'instrument.
- b) Mettre tout en œuvre pour définir une géométrie de mesure reproductible à une distance reproductible entre le spectromètre et la prise d'essai.
- c) Prendre toutes les mesures pratiques pour identifier la prise d'essai qui doit présenter une forme aussi régulière que possible du point de vue de sa planéité d'ensemble, de sa rugosité de surface et de sa structure physique connue.
- d) Documenter toutes les mesures prises pour le désassemblage d'un objet plus grand afin d'obtenir une prise d'essai.

6.4.2 Approche destructive

Les éléments suivants doivent être pris en compte dans le cadre de l'approche destructive:

- a) L'utilisateur doit élaborer et appliquer une instruction de travail documentée applicable à la destruction de la prise d'essai, dans la mesure où cette information est déterminante pour une interprétation correcte des résultats des mesures.
- b) Une procédure de pulvérisation doit produire un matériau présentant une granulométrie connue ou maîtrisée. Dans les cas où les particules présentent des compositions chimiques, de phase ou minéralogiques différentes, il est très important de réduire suffisamment leur taille afin de réduire au minimum les effets d'absorption différentielle.
- c) Lorsque la procédure utilisée donne lieu à un matériau dissous dans une matrice liquide, la quantité et les caractéristiques physiques du matériau à dissoudre doivent être maîtrisées et documentées. La solution résultante doit être complètement homogène. Des instructions doivent être données concernant les prises non dissoutes afin d'assurer une interprétation correcte des résultats des mesures. Des instructions doivent être données concernant la présentation de la prise d'essai de la solution au spectromètre à rayons X de manière reproductible, c'est-à-dire dans un récipient de liquide de construction et de dimensions spécifiées.
- d) Lorsque la procédure utilisée donne lieu à un matériau fondu ou comprimé dans une matrice solide, la quantité et les caractéristiques physiques du matériau à dissoudre doivent être maîtrisées et documentées. Le solide qui en résulte (pastille fondue ou comprimée) doit être complètement uniforme. Des instructions doivent être données concernant les prises non dissoutes afin d'assurer une interprétation correcte des résultats des mesures.

6.5 Mode opératoire

6.5.1 Généralités

Le mode opératoire couvre la préparation du spectromètre à rayons X, la préparation et le montage des prises d'essai ainsi que l'étalonnage. Certaines instructions sont données en termes généraux du fait de la grande variété d'équipements XRF et de l'extrême diversité des échantillons de laboratoire et d'essai auxquels cette méthode d'essai s'applique. Une règle cardinale s'appliquant sans exception à l'ensemble des spectromètres et des méthodes d'analyse doit toutefois être suivie. Cette règle veut que l'étalonnage et les mesures des échantillons soient effectués dans les mêmes conditions et en appliquant les mêmes procédures de préparation des échantillons.

Du fait de la grande variété des modèles de spectromètres XRF et de la gamme concomitante de capacités de détection, il est important de comprendre les limites de l'instrument choisi. Certains modèles peuvent s'avérer incapables de détecter ou de déterminer avec précision la composition d'échantillons de très petite surface ou très fins. Il est par conséquent impératif que les utilisateurs définissent avec le plus grand soin et documentent clairement les performances de la méthode d'essai telle qu'elle est appliquée dans leurs laboratoires. Un des objectifs recherchés est d'éviter les résultats d'essai négatifs erronés.

6.5.2 Préparation du spectromètre

Préparer le spectromètre de la manière suivante:

- a) Mettre l'instrument en marche et le préparer conformément au manuel du fabricant. Laisser l'instrument se stabiliser selon les directives données par le fabricant ou les instructions de travail du laboratoire.
- b) Etablir les conditions de mesure au niveau optimal précédemment déterminé par le fabricant ou le laboratoire.

NOTE De nombreux instruments disponibles sur le marché étant déjà optimisés et pré-réglés pour une application particulière, il est par conséquent possible que cette opération ne soit pas nécessaire. Dans le cas contraire, il convient que le laboratoire précise les conditions optimales d'utilisation pour chaque étalonnage. Il convient que les choix effectués permettent l'optimisation de la sensibilité et la réduction des interférences spectrales. Les

conditions d'excitation peuvent varier avec le matériau, l'analyte et l'énergie des raies de rayons X. Une liste des raies de rayons X recommandées pour les analytes est donnée dans le Tableau 7. Il convient que les réglages du système de détection permettent d'établir un compromis optimal entre la sensibilité et la résolution. En général, des instructions sont données dans le manuel de l'instrument et dans la littérature portant sur la spectrométrie des rayons X.

Tableau 7 – Raies de rayon X recommandées pour les analytes individuels

Analyte	Raie préférentielle	Raie secondaire
Plomb (Pb)	$L_2-M_4 (L\beta_1)$	$L_3-M_{4,5} (L\alpha_{1,2})$
Mercure (Hg)	$L_3-M_{4,5} (L\alpha_{1,2})$	
Cadmium (Cd)	$K-L_{2,3} (K\alpha_{1,2})$	
Chrome (Cr)	$K-L_{2,3} (K\alpha_{1,2})$	
Brome (Br)	$K-L_{2,3} (K\alpha_{1,2})$	$K-M_{2,3} (K\beta_{1,3})$

NOTE 1 D'autres choix de raies de rayon X peuvent permettre d'obtenir des performances appropriées. Toutefois, il convient que le choix de raies d'analyse alternatives tienne compte des interférences spectrales potentielles des autres éléments présents dans l'échantillon (par exemple BrK α sur des raies PbL α ou AsK α sur des raies PbL α ; voir D.1b) pour d'autres exemples typiques).

NOTE 2 K- $L_{2,3} (K\alpha_{1,2})$ signifie qu'il existe effectivement deux transitions à l'enveloppe K, à savoir l'une provenant de l'enveloppe L_2 qui génère les rayons K α_2 X, et l'autre provenant de l'enveloppe L_3 qui génère les rayons K α_1 X. Toutefois, les deux sources d'énergie étant très proches, les spectromètres de dispersion de l'énergie ne peuvent pas les différencier. Celles-ci sont donc analysées en tant qu'énergie K $\alpha_{1,2}$ combinée.

6.5.3 Prise d'essai

L'élaboration d'une prise d'essai est décrite au 6.4.

Dans le cas d'une préparation destructive de l'échantillon, mesurer la masse et les dimensions de la prise d'essai conformément à la méthode d'étalonnage et à l'instruction de travail établie par le laboratoire pour s'assurer de la reproductibilité de l'échantillonnage.

6.5.4 Vérification des performances du spectromètre

Les performances du spectromètre doivent être vérifiées de la manière suivante:

a) Les utilisateurs doivent fournir des preuves objectives des performances de la méthode mise en œuvre dans leurs laboratoires. Ceci est nécessaire pour permettre aux utilisateurs et à leurs clients de comprendre les limites de la méthode et de prendre les décisions nécessaires en fonction des résultats des analyses. Les aspects déterminants permettant l'évaluation des performances de la méthode sont les suivants:

- performances du spectromètre:
 - sensibilité pour chaque analyte,
 - résolution spectrale,
 - limite de détection,
 - démonstration de l'aire mesurée,
 - répétabilité de la préparation et de la mesure de l'échantillon,
 - précision de l'étalonnage, qui sera vérifiée conformément à 6.8.

Etant donnée la diversité des spectromètres et des logiciels d'exploitation associés, il est admis que les utilisateurs obtiennent ces informations dans leurs propres laboratoires, selon leurs propres procédures ou sous forme d'une prestation de service du fabricant. Il est important de vérifier le spectromètre et les performances de la méthode au moment de sa mise en œuvre. La preuve du maintien des performances peut être obtenue en s'aidant de diagrammes de contrôle ou en reproduisant les mesures et les calculs effectués lors de la mise en œuvre.

b) La sensibilité du spectromètre est utilisée comme indice de comparaison des spectromètres ainsi que pour s'assurer qu'un étalonnage probant est possible.

- c) La résolution spectrale est importante pour s'assurer que l'analyte et les raies spectrales interférentes sont traités correctement lors du recueil des données et de l'étalonnage. Pour les besoins de la présente norme, la correction des raies en chevauchement est considérée faire partie intégrante de l'étalonnage du spectromètre.
- d) Pour chaque ensemble de conditions de fonctionnement de la méthode d'essai, la limite de détection, LOD, doit être estimée en utilisant l'Equation (1) ci-dessous:

$$\text{LOD} = 3\sigma \quad (1)$$

où

LOD est la limite de détection (LOD), exprimée en unités de concentration;

σ est l'écart-type des résultats de multiples déterminations obtenues à l'aide d'un témoin. L'écart-type est habituellement estimé à partir d'un petit nombre (sept au minimum) de déterminations dans lesquelles le symbole, s (estimation non biaisée de l'écart-type, σ) remplace σ .

NOTE La limite de détection constitue un paramètre important qui indique à l'utilisateur si le spectromètre fonctionne dans des conditions permettant la détection d'un analyte à des niveaux suffisamment inférieurs aux limites admises pour les substances, et pouvant se révéler utiles pour prendre les décisions qui s'imposent. La limite de détection constitue une fonction du processus de mesure dont le matériau constitue une partie significative. Si le processus de mesure change avec le matériau, les limites de détection peuvent également changer. Pour des performances optimales, il convient que la limite de détection soit inférieure ou égale à 30 % des limites d'action propres du laboratoire retenues pour un niveau maximal admissible de risque de non-conformité.

- e) La démonstration de l'aire mesurée est importante pour s'assurer que la surface observée est connue dans le cas d'un spectromètre équipé d'éventuels accessoires de définition de la dimension, de la forme et de la localisation du faisceau de rayons X. Dans de nombreux cas, la dimension, la forme et la localisation du faisceau définissent la prise d'essai. Le laboratoire ou le fabricant doit prévoir un moyen de définition de la dimension et de la forme du faisceau et d'identification de sa localisation sur la prise d'essai.
- f) La répétabilité de la préparation et de la mesure de l'échantillon constitue un paramètre important pour démontrer que la méthode d'essai fait l'objet d'une maîtrise statistique. Si une préparation destructive de l'échantillon précède la mesure, la répétabilité doit être vérifiée par essai, y compris la préparation des échantillons. Dans le cas contraire, la répétabilité de la mesure doit être vérifiée par essai sur le même échantillon. La répétabilité correspond à l'écart-type d'au moins sept mesures sur un échantillon préparé, effectuées dans des conditions optimales de fonctionnement du spectromètre. La répétabilité doit être mesurée pour chaque analyte sur une prise d'essai contenant une concentration d'analyte supérieure à cinq fois la limite de détection estimée en 6.5.4.

6.5.5 Essais

Placer la prise d'essai en position correcte pour effectuer la mesure à l'aide du spectromètre XRF. Si nécessaire, établir l'atmosphère requise dans la chambre du spectromètre et la laisser se stabiliser.

NOTE Les mesures sont en général réalisées à la pression atmosphérique. Cependant, il peut être avantageux de les effectuer dans le vide ou dans l'hélium (A.3.b) si les éléments qui doivent être mesurés sont légers, par exemple le soufre, l'aluminium, etc.

Mesurer la prise d'essai en recueillant un nombre suffisant de comptes de rayons X pour atteindre une incertitude statistique de comptage inférieure à l'écart-type relatif établi pour assurer la répétabilité des mesures (voir 6.5.4). Les paramètres du spectromètre XRF utilisé pour l'analyse de la prise d'essai doivent être identiques à ceux utilisés pour les mesures d'étalonnage.

6.5.6 Etalonnage

La méthode d'analyse doit être étalonnée en tenant compte des effets de la matrice et des autres effets ayant une influence sur la détermination de l'intensité du rayonnement de la fluorescence. L'Annexe D donne une liste de ces effets.

Il existe deux options principales d'étalonnage pour la spectrométrie XRF:

- Approches des paramètres fondamentaux utilisant une gamme d'étalons:
 - éléments purs et composés purs, ou
 - mélanges synthétiques préparés à partir de substances pures, ou
 - matériaux de référence individuels représentant chaque matériau à analyser.
- Etalonnage empirique (traditionnel) à l'aide d'un modèle basé sur les coefficients d'influence obtenus
 - en utilisant des données empiriques tirées d'une suite d'étalons similaires aux inconnues, ou
 - en utilisant l'approche des paramètres fondamentaux.

Suivre les directives du manuel du fabricant pour choisir les options d'étalonnage disponibles dans le logiciel d'exploitation.

L'utilisateur, en fonction de l'instrument, peut ou non être obligé d'effectuer un étalonnage. Il existe, dans le commerce, des instruments déjà optimisés, étalonnés et préréglés pour des applications spécifiques. Il n'est pas nécessaire que l'analyste procède à l'étalonnage de ces instruments.

Le choix des étalons dépend en partie du choix du modèle d'étalonnage. Pour les options empiriques, les étalons doivent être semblables, par la composition de la matrice, aux matériaux à analyser. Dans l'ensemble d'étalons, les concentrations d'éléments doivent couvrir la plage de concentration attendue pour les échantillons et doivent varier indépendamment les uns des autres. Si l'étalonnage couvre de nombreux éléments sur une vaste plage de concentration, un nombre élevé d'échantillons d'étalonnage peut se révéler nécessaire. Le nombre minimal d'étalons pour une méthode empirique est $2(n+2)$, où n = nombre d'analytes.

Une approche d'étalonnage par les paramètres fondamentaux peut réduire significativement le nombre d'échantillons correspondants. Le logiciel des paramètres fondamentaux permet à l'utilisateur d'étalonner la sensibilité de chaque élément en utilisant des éléments et des composés purs. Le logiciel, en remplacement des étalons purs, permet normalement l'emploi d'un petit nombre de matériaux de référence plus semblables aux échantillons. La méthode peut être améliorée en utilisant un rayonnement dispersé pour corriger certains effets de la matrice ou de la morphologie de l'échantillon.

6.6 Calculs

Les calculs suivants doivent être effectués si nécessaire, lorsque cette méthode d'essai est utilisée:

- a) Les calculs, dans les instruments actuels, sont généralement effectués automatiquement par le logiciel du système d'exploitation du spectromètre. Si les calculs doivent être faits à la main, les algorithmes et tous les paramètres doivent alors être spécifiés dans les instructions opérationnelles de la méthode d'essai. Calculer le résultat pour chaque analyte, en pourcentage par masse, dans chaque prise d'essai en utilisant le modèle d'étalonnage établi pour le type d'échantillon.
- b) Si la prise d'essai a été préparée par dilution, calculer le résultat sur la base de l'échantillon pour essai d'origine en appliquant le facteur de dilution approprié.

Estimer l'incertitude des résultats en utilisant une des méthodes suivantes et comparer le résultat à la concentration maximale admise d'analyte dans le matériau.

- c) La méthode préférentielle consiste à créer un budget d'incertitude pour chaque étalonnage effectif de la méthode d'essai. Le budget d'incertitude doit être conforme au Guide ISO/CEI 98. Exprimer l'incertitude estimée élargie au niveau de confiance de 95 %.

NOTE 1 Il est trop simple de résumer l'incertitude à un multiple de l'écart-type de répétabilité de déterminations répétées. Dans certaines circonstances, les mesures XRF peuvent être beaucoup trop précises, ce qui donne une

incertitude estimée trop faible pour couvrir toutes les sources d'erreur. Cette approche ne tient pas compte de l'importante contribution des étalons, du modèle mathématique utilisé pour établir la courbe d'étalonnage, ainsi que du potentiel d'introduction d'une erreur systématique pendant la préparation des échantillons. Par ailleurs, la définition du budget d'incertitude ne relève pas du domaine d'application de la présente norme.

- d) La présente méthode reconnaît qu'il peut ne pas être pratique, voire impossible d'atteindre un budget d'incertitude correct. En conséquence, une autre alternative consiste à choisir un facteur de sécurité supérieur ou égal à l'incertitude élargie prévue pour chaque analyte au niveau de concentration maximale admise. Il a été convenu, dans le cadre de l'élaboration de la présente méthode d'essai, qu'il y a lieu de supposer une incertitude relative de 30 % pour un résultat obtenu sur un échantillon contenant la valeur maximale admise de teneur de l'élément dans le matériau en question. Dans la pratique, cette hypothèse peut servir à définir un intervalle de confiance autour de la valeur de concentration maximale admise, qui peut être utilisée comme base de décision eu égard à la pertinence éventuelle d'essais supplémentaires.

NOTE 2 L'utilisation d'un facteur de sécurité est trop simpliste, en partie du fait que dans la plupart des cas l'incertitude relative est fonction de la concentration. En général, l'incertitude relative augmente rapidement en fonction de la diminution de la concentration d'analyte. Il convient que l'analyste veille à ne pas interpréter le facteur de sécurité de 30 % comme une incertitude relative des résultats des déterminations. Il est conseillé également de veiller à réévaluer le facteur de sécurité si la limite de détection est supérieure de 20 % par rapport à la concentration maximale admise, ou si cette concentration maximale admise est réduite par l'autorité de réglementation.

6.7 Evaluation de la méthode

La synthèse détaillée pour chaque substance et chaque matériau soumis à l'essai à l'aide de la méthode XRF est donnée dans les Tableaux D.3 à D.7 (voir Annexe D). Seuls ces résultats doivent être utilisés comme base pour les éventuelles conclusions relatives aux performances de la méthode.

Les conclusions générales suivantes peuvent être tirées sur la base des résultats résumés dans les tableaux et de l'analyse des données de l'étude IIS2. La synthèse des conclusions des performances de cette méthode pour chaque substance et matériau soumis à l'essai, est fournie dans les paragraphes suivants:

- a) L'évaluation des résultats et des performances de la méthode ne peut être que fragmentaire du fait du manque de matériaux de référence certifié (MRC) permettant de couvrir pleinement les gammes requises de concentrations et de types de matériaux.
- b) Du fait de la quantité limitée de MRC disponibles, tous les laboratoires n'ont pas soumis à l'essai tous les échantillons; en conséquence, les résultats ne sont pas toujours directement comparables.
- c) Les échantillons ont été analysés «en l'état», ce qui signifie que la méthode n'impliquait aucune préparation d'échantillons.
- d) Les niveaux de précision rapportés par les différents laboratoires pour des résultats particuliers étaient en général bien inférieurs à un écart-type relatif (ETR) de 5 %.
- e) Les laboratoires participants ont utilisé diverses méthodes d'étalonnage, telles que les méthodes empiriques, les méthodes de normalisation Compton et d'autres méthodes fondées sur les paramètres fondamentaux.
- f) Il est impératif que les performances de la méthode fassent encore l'objet de recherches et d'essais dans le cadre d'études de comparaison inter-laboratoires.

6.7.1 Plomb

Le défaut d'exactitude moyen de la détermination du plomb dans les polymères au-dessus d'un niveau de 100 mg/kg était inférieur à une valeur relative de $\pm 13\%$ et l'imprécision était inférieure à une valeur relative de $\pm 19\%$. A une concentration de plomb de 10 mg/kg, les valeurs relatives de défaut d'exactitude et d'imprécision étaient respectivement de $\pm 30\%$ et de $\pm 70\%$. Pour les alliages d'aluminium, les défauts d'exactitude et d'imprécision avaient respectivement une valeur inférieure à $\pm 10\%$ et à $\pm 25\%$. Une concentration de plomb de 174 mg/kg dans un alliage d'étain a donné des résultats peu probants, allant de 60 mg/kg à 380 mg/kg. Une teneur de 30 mg/kg de plomb dans un acier allié n'a pas été détectée.

Les résultats correspondant aux cartes de circuits imprimés broyées font ressortir une non homogénéité possible du matériau comme étant la source d'une grande imprécision et des défauts d'exactitude des résultats.

6.7.2 Mercure

Le défaut d'exactitude moyen de la détermination du mercure dans les polymères à une concentration d'au plus 1 000 mg/kg, était inférieur à une valeur relative de $\pm 10 \%$ tandis que l'imprécision était inférieure à une valeur relative de $\pm 25 \%$. Aucun alliage n'a été soumis à l'essai pour le mercure.

6.7.3 Cadmium

Le défaut d'exactitude moyen de la détermination du cadmium dans les polymères à une concentration d'au moins 100 mg/kg, était d'une valeur relative de $\pm 10 \%$ tandis que l'imprécision était inférieure à une valeur relative de $\pm 15 \%$. A un niveau de cadmium de 20 mg/kg, le défaut d'exactitude variait d'une valeur relative de $\pm 10 \%$ à $\pm 50 \%$ et l'imprécision de 20 % à 100 %. Un niveau de cadmium de 3,3 mg/kg dans un alliage d'étain n'a été détecté par aucun instrument.

6.7.4 Chrome

Il a été observé un défaut d'exactitude moyen de détermination du Cr total dans des polymères à une concentration inférieure à 115 mg/kg, d'une valeur relative de 17 % tandis que l'imprécision était à une valeur relative d'environ $\pm 30 \%$. Pour un niveau de concentration similaire dans le verre, les défauts d'exactitude et d'imprécision du Cr total étaient respectivement d'une valeur relative inférieure à $\pm 20 \%$ et 35 %. Dans les alliages d'aluminium, à une concentration de chrome de 1 100 mg/kg, les défauts d'exactitude et d'imprécision étaient respectivement d'une valeur relative de $\pm 10 \%$ et inférieure à $\pm 41 \%$. Une concentration de Cr d'environ 100 mg/kg dans un alliage d'aluminium n'a pas été détectée.

6.7.5 Brome

Les analyses effectuées sur les MRC montrent que le défaut d'exactitude moyen de la détermination de la concentration de brome total dans des polymères d'au plus 1 000 mg/kg était inférieur à une valeur relative de $\pm 10 \%$, et l'écart-type était inférieur à une valeur relative de $\pm 13 \%$. A des concentrations élevées de Br (10 %), le défaut d'exactitude était inférieur à une valeur relative de $\pm 25 \%$ et l'imprécision se situait autour d'une valeur relative de $\pm 30 \%$. Ces derniers résultats reflètent l'inadéquation des étalonnages empiriques pour des concentrations élevées de brome.

En général, les défauts d'exactitude et d'imprécision de l'analyse pour l'ensemble des cinq éléments étaient inférieurs à une valeur relative de $\pm 20 \%$ pour des concentrations supérieures à 100 mg/kg dans des polymères et des alliages d'aluminium.

6.8 Contrôle de la qualité

6.8.1 Exactitude de l'étalonnage

L'exactitude de l'étalonnage est validée en se conformant aux étapes suivantes:

- a) L'exactitude de chaque étalonnage doit être validée par analyse d'un ou de plusieurs matériaux de référence représentatifs de chaque matériau utilisé dans l'application de cette méthode d'essai. Les niveaux de concentration d'analytes dans les matériaux de référence doivent se trouver dans les limites d'un ordre de grandeur des valeurs maximales admises pour l'analyte dans le matériau. Dans l'idéal, des matériaux de référence répondant aux valeurs maximales admises seront mis à disposition.

- b) Les résultats des mesures des matériaux de référence doivent être calculés et exprimés conformément au 6.6, y compris l'incertitude estimée.
- c) Soumettre les résultats et les valeurs certifiées ou de référence affectées aux matériaux de référence à un essai d'erreur systématique. L'essai d'erreur systématique doit tenir compte de l'incertitude de la valeur affectée.

NOTE Pour des instructions concernant les essais aux marges, se reporter à la publication spéciale 829 du National Institute of Standards and Technology ^[6] ou à des documents similaires.

- d) Si une erreur systématique est détectée, corriger l'étalonnage et répéter les déterminations.

6.8.2 Echantillons témoins

Les échantillons témoins doivent être préparés et utilisés comme suit:

- a) Désigner une quantité de matériau stable pour servir d'échantillon témoin pour chaque étalonnage. Cet échantillon doit, de préférence, être solide et de forme circulaire (pastille).
- b) Préparer une prise d'essai de l'échantillon témoin et la soumettre à chacun des étalonnages dès qu'ils ont été validés. Répéter cette opération au moins quatre fois. Calculer l'écart moyen et l'écart type et utiliser ces valeurs pour tracer un diagramme de contrôle pour chaque analyte dans chaque étalonnage. Les analystes peuvent élaborer les échantillons témoins. Certains fabricants d'instruments fournissent un (des) échantillon(s) témoin(s) avec leurs équipements.
- c) A des intervalles de temps appropriés, préparer une prise d'essai d'échantillon témoin et la soumettre à un essai en appliquant chaque étalonnage utilisé dans la méthode d'essai. Comparer les résultats aux limites des diagrammes de contrôle. Si les résultats ne respectent pas les règles de contrôle établies, soumettre les méthodes d'essai à une recherche de défauts, corriger le problème et effectuer un essai sur un nouvel échantillon témoin.

6.9 Cas spéciaux

6.9.1 Présentation d'un échantillon à mesurer

La procédure de présentation d'un échantillon à mesurer est la suivante :

- a) Si la mesure doit être effectuée avec un instrument comportant une chambre d'analyse, une section incluant l'échantillon à mesurer doit être placée dans la chambre à échantillons du spectromètre par fluorescence X. L'ensemble de l'échantillon doit être monté de manière à ce que la position de mesure de l'échantillon cible puisse être correctement localisée. Si l'échantillon n'entre pas correctement dans la chambre, il doit être découpé à la bonne dimension pour la mesure.
- b) Si la mesure est effectuée à l'aide d'un analyseur XRF portable tenu à la main, veiller à ce que son ouverture de mesure couvre la section à analyser.
- c) L'analyse des échantillons non plats ou pas suffisamment grands pour couvrir l'ouverture de mesure du spectromètre (par exemple des petites vis) peut être effectuée par certaines méthodes à paramètres fondamentaux conçues pour compenser les résultats d'échantillons de forme irrégulière. Dans ce cas, l'analyste doit positionner soigneusement, en respectant les recommandations du fabricant, un ou plusieurs articles sur le bon support avant de procéder aux mesures et obtenir une évaluation de la composition à l'aide des outils logiciels prévus par la méthode.
- d) L'analyse d'échantillons fins est compliquée par le fait que les taux de comptage mesurés sont dépendants de la concentration d'analyte dans l'échantillon et de l'épaisseur de ce dernier. L'analyste doit connaître la structure et la composition de l'article dans la zone de mesure.

6.9.2 Uniformité de l'échantillon

L'uniformité, du point de vue de l'analyse XRF, dépend de l'uniformité physique de la composition du matériau soumis à l'essai dans les limites du volume de matériau irradié par l'instrument pendant l'essai. Une ou plusieurs des trois catégories suivantes peuvent s'appliquer à la détermination de l'uniformité de l'échantillon:

a) Echantillons de surface de grande taille (s'applique à tous les échantillons):

L'uniformité du matériau soumis à l'essai, pour les besoins de l'analyse XRF, est évaluée par examen visuel en s'aidant des éventuelles informations supplémentaires. Par exemple, tout objet qui semble uniforme du point de vue de la couleur, de la forme et de l'aspect est très probablement uniforme et ne devrait pas nécessiter une destruction mécanique avant analyse. De grands objets étendus en plastiques, comme des boîtiers plastiques, les bandes épaisses, les alliages métalliques etc. en sont des exemples types. Toute information supplémentaire concernant l'objet soumis à l'essai doit servir à établir son uniformité. Par exemple, de nombreux boîtiers plastiques et, encore plus, métalliques, sont recouverts d'une couche de peinture. Les boîtiers plastiques peuvent être métallisés, souvent à l'intérieur. Dans ce cas, l'essai doit être réalisé sur un fragment non peint ou non métallisé qui peut exiger un certain niveau de désassemblage, mais pas la destruction de l'objet. Les pièces métalliques peuvent être plaquées d'un autre métal, tel que le zinc sur l'acier, le cadmium sur l'acier, ou le chrome sur l'acier et l'aluminium. Ceci sera indiqué par des valeurs observées relativement très élevées des métaux de plaquage, sauf probablement le Cr dont les revêtements sont habituellement très fins. Tous les revêtements doivent être retirés lorsqu'il s'agit d'analyser le matériau de base.

b) Echantillons de petite surface:

De petites pièces électroniques ou des segments individuels peuvent être analysés sur place, sans nécessité de désassemblage, dans la mesure où l'instrument utilisé a une résolution latérale et en profondeur suffisante pour mesurer uniquement le matériau prévu, sans étalement sur les zones adjacentes. L'échantillon doit être uniforme, tel qu'un encapsulage plastique, un fil de soudage individuel ou des zones isolées de polymère/époxy. Pour analyser le matériau de base, il faut veiller tout particulièrement à éviter les complications dues aux interférences de plaquages métalliques, de revêtements polymères ou de peinture. Les revêtements éventuels doivent être retirés physiquement.

c) Revêtements et échantillons fins:

Les échantillons trop petits ou très fins risquent de ne pas satisfaire aux conditions minimales d'épaisseur ou de masse de l'échantillon exigées pour que les résultats soient valides. Dans de tels cas, un certain nombre de petits objets de même nature (par exemple des petites vis) doit être placé dans une coupelle à échantillon avant d'être soumis à analyse. De la même manière, les échantillons fins de même nature doivent être rangés en une pile suffisamment épaisse pour satisfaire au critère d'épaisseur minimale de l'échantillon, puis analysés en conséquence. En règle générale, tous les échantillons doivent couvrir complètement la fenêtre/zone de mesure du spectromètre. L'échantillon doit avoir une épaisseur minimale de 5 mm dans le cas des polymères et des alliages légers tels que Al, Mg ou Ti, de 15 mm dans le cas des liquides et d'environ 1 mm pour tous les autres alliages.

Ces règles peuvent ne pas être applicables si le logiciel d'analyse de l'instrument permet de corriger efficacement les résultats en tenant compte des variations d'épaisseur, de forme et de taille des échantillons analysés.

L'isolation des fils fins et des câbles plats peut ne pas être considérée comme uniforme et doit être mesurée en extrayant en premier lieu le conducteur métallique. D'autre part, presque tous les cordons d'alimentation d'un diamètre supérieur à 5 mm, contenant des fils de cuivre, peuvent être considérés comme uniformes pour l'analyse de l'isolation. Le métal peut également être analysé après séparation. Certains revêtements métalliques peuvent être analysés si l'utilisateur connaît la structure du matériau et si le spectromètre est étalonné pour analyser un système de couches aussi complexe. Par exemple, on sait que le revêtement est un époxy SnAgCu (alliage étain-argent-cuivre) (plaqué) en cuivre (plaqué). L'alliage d'étain peut être analysé à condition que l'instrument soit étalonné pour ce type spécifique d'échantillon. Il est couramment admis que la plupart des instruments XRF ne détectent pas, avec une sensibilité suffisante, le Cr des revêtements de

conversion sauf s'ils sont épais d'au moins quelques centaines de nanomètres. La taille requise de l'échantillon variant d'un instrument à l'autre, il est recommandé à l'opérateur du spectromètre de toujours consulter le manuel de l'instrument ou le fabricant pour connaître les exigences de taille/masse/épaisseur minimales de l'échantillon.

- d) Les limites numériques de détection indiquées (voir le Tableau D.2) peuvent ne pas convenir à la détermination de la conformité réglementaire de tous les échantillons possibles, en particulier si l'échantillon est composé de matériaux de produits différents. Ceci peut notamment être le cas des échantillons qui ont été mélangés en un état «homogénéisé» ou de petites quantités de matériau homogène telles que des revêtements fins. Cette méthode fait référence à la notion d'uniformité pour que l'analyse XRF soit précise et ne cherche pas à déterminer «légalement» les exigences applicables à l'échantillonnage.
- e) Synthèse:
- L'objet soumis à l'essai peut être considéré comme uniforme et faire l'objet d'une analyse non destructive si
- Il n'est pas peint ou plaqué et semble, à l'œil nu, d'une même couleur et d'une même consistance uniforme,
 - Il n'est pas connu, par ailleurs, pour être de construction ou de conception non uniforme,
 - la couche supérieure d'un revêtement fin peut être analysée séparément du matériau de base dans une matrice connue uniquement, et l'instrument est étalonné pour cette matrice connue.
- f) Il est recommandé, quand on utilise un instrument XRF, de soumettre l'objet à l'essai en plusieurs points de sa surface si sa conception le permet. Les différences éventuelles entre les mesures, significatives du point de vue statistique, peuvent indiquer une éventuelle non-uniformité. En cas de doute sur l'uniformité du matériau soumis à l'essai, une analyse destructive est recommandée.

7 Détermination du mercure dans les polymères, métaux et produits électroniques par CV-AAS, CV-AFS, ICP-OES et ICP-MS

7.1 Présentation

Le présent article décrit la méthode d'essai permettant de déterminer le niveau de mercure (Hg) dans les matériaux utilisés dans les produits électrotechniques. Ces matériaux sont des polymères, des matériaux métalliques et des produits électroniques (par exemple cartes imprimées, lampes fluorescentes à cathode froide, interrupteurs à mercure). Les batteries contenant du mercure doivent être traitées comme décrit dans [22]. L'étude de comparaison inter-laboratoires a évalué uniquement ces méthodes d'essai pour les plastiques, les autres matrices n'ayant pas été évaluées.

L'article décrit l'utilisation de quatre méthodes, à savoir CV-AAS (spectrométrie d'absorption atomique à vapeur froide), CV-AFS (spectrométrie de fluorescence atomique à vapeur froide), ICP-OES (spectrométrie d'émission optique couplée à un plasma induit) et ICP-MS (spectrométrie de masse couplée à un plasma induit), ainsi que plusieurs procédures de préparation de la solution d'échantillon à partir de laquelle les experts peuvent choisir la méthode d'analyse la plus appropriée. La méthode CV-AAS représente la technique préférentielle du fait de sa sensibilité et de sa facilité d'emploi.

L'analyse par CV-AAS, CV-AFS, ICP-OES et ICP-MS permet de déterminer l'élément cible, le mercure, avec une grande justesse (incertitude dans la plage basse des pourcentages) et/ou une grande sensibilité (jusqu'au niveau du $\mu\text{g}/\text{kg}$). Les procédures d'essai décrites dans le présent article sont prévues pour donner le niveau le plus élevé d'exactitude et de justesse pour des concentrations de mercure dans une plage comprise entre 4 mg/kg et 1 000 mg/kg. Les procédures ne sont pas limitées pour les concentrations plus élevées.

Une masse appropriée d'échantillon broyé cryogéniquement et homogénéisé est digérée dans une solution acide concentrée dans des conditions fixes de température ou de pression. Après digestion, la solution d'échantillon doit être conservée à 4 °C pour réduire l'évaporation au minimum. Pour un stockage à plus long terme du mercure, il est recommandé de doper les solutions avec 1 à 2 gouttes d'une solution de permanganate de potassium.

Enfin, l'élément mercure est déterminé, dans la solution de digestion obtenue, par la méthode CV-AAS, CV-AFS, ICP-OES ou ICP-MS. Pour les méthodes ICP-OES et IPC-MS, la solution de digestion peut être analysée sans autre préparation des échantillons. Lorsque les méthodes CV-AAS et CV-AFS sont utilisées, le mercure est réduit à son état élémentaire avant analyse.

Les échantillons destinés à être analysés doivent être préparés au préalable par voie mécanique avant digestion chimique. Pour satisfaire aux exigences minimales d'exactitude de l'analyse, le rapport d'essai doit indiquer la taille minimale des particules et les quantités minimales d'échantillons. Il est très probable qu'après digestion, il reste des résidus solides. Il faut s'assurer que ces résidus ne contiennent pas d'élément cible. La présente norme recommande fortement l'emploi d'un digesteur chauffant, équipé non seulement de récipients et de réfrigérants à reflux, mais également de récipients d'absorption, ou d'un système de digestion par micro-ondes. Cet équipement évolué évite les pertes de mercure hautement volatil. Néanmoins, si l'utilisateur peut garantir l'adéquation d'une approche plus simple, il peut l'appliquer. Toute dérogation aux procédures décrites doit être évaluée et documentée dans le rapport d'essai.

Cette procédure est recommandée aux assistants et/ou techniciens de laboratoire travaillant sous la stricte surveillance de chimistes expérimentés dans l'élaboration des exigences relatives à la préparation des échantillons destinés à des analyses inorganiques et aux chimistes travaillant de manière indépendante.

Les points suivants doivent être pris en considération:

- De nombreux composés du mercure sont très toxiques s'ils sont ingérés, inhalés ou absorbés par la peau. Un soin extrême doit être apporté à la manipulation des réactifs concentrés au mercure. Du fait du risque présenté par le mercure dans certains environnements de laboratoire, tous les matériels de laboratoire et tous les outils de recueil d'échantillons doivent être entreposés dans un environnement propre, exempt de mercure.
- Toutes les opérations précédant l'analyse des instruments doivent être effectuées dans la hotte de captation des fumées.
- Un condenseur doit être utilisé pour prévenir la volatilité aux conditions d'essai.
- Le four à micro-ondes doit être utilisé en stricte conformité avec les instructions du fournisseur.

7.2 Appareillage, équipements et matériaux

En général, le rangement et le stockage du matériel en verre constituent la partie critique de l'analyse du mercure, indépendamment du type d'échantillon à analyser. Du fait de la sensibilité des techniques d'analyse du mercure décrites, chaque étape individuelle de l'échantillonnage doit être exécutée avec le plus grand soin. Tous les appareils d'échantillonnage, de stockage et de manipulation doivent être exempts de mercure. Tremper tous les matériels en verre dans de l'acide nitrique (7.3.c) à une fraction massique de 50 % (m/m) pendant 24 h à température ambiante, puis les rincer minutieusement avec de l'eau (7.3.a).

Le matériel suivant doit être utilisé:

- a) Balance d'analyse d'une précision de 0,000 1 g.

Pour la digestion par voie humide comme décrit en 7.4.2:

- b) Digesteur chauffant équipé de récipients à réaction, de réfrigérants à reflux et de récipients d'absorption (pour la digestion des métaux et des produits électroniques);
- c) Filtre en fibre de verre de 0,45 µm.

Pour la digestion aux micro-ondes comme décrit en 7.4.3:

- d) Système de préparation des échantillons à micro-ondes équipé d'un porte-échantillon et de récipients en polytétrafluoroéthylène/tétrafluoroéthylène modifié (PTFE/TFM) ou en résine polyester perfluoroalcoxy/tétrafluoroéthylène modifié (PFA/TFM) à haute pression, ou d'autres récipients en fluorocarbure (pour la digestion des métaux à teneur significative en silicium (Si), zirconium (Zr), hafnium (Hf), titane (Ti), tantale (Ta), niobium (Nb) ou tungstène (W), ainsi que pour les plastiques);
- e) Filtre en microfibre de verre (verre au borosilicate), taille des pores: 0,45 µm et un porte filtre adéquat.
- f) Flacons volumétriques, par exemple 25 ml, 250 ml, etc. (en PTFE/PFA ou en verre). Le cas échéant, d'autres types d'équipements volumétriques d'une précision et d'une exactitude acceptables peuvent être utilisés en lieu et place des flacons volumétriques.
- g) Pipettes, de par exemple 1 ml, 2 ml, 5 ml, 10 ml, etc. (en PTFE/PFA ou en verre).
- h) Micropipettes, de par exemple 200 µl, 500 µl, 1 000 µl, etc.
- i) Conteneurs en plastique pour les étalons et les solutions de digestion.
- j) Spectromètre d'absorption atomique à vapeur froide (CV-AAS).
- k) Spectrométrie de fluorescence atomique à vapeur froide (CV-AFS).
- l) Spectromètre d'émission atomique optique couplé à un plasma induit (ICP-OES).
- m) Spectromètre de masse couplé à un plasma induit (ICP-MS).
- n) Gaz argon d'une pureté d'au moins 99,99 % (v/v).

7.3 Réactifs

Les réactifs utilisés pour la détermination des éléments en traces doivent être d'une pureté adéquate. La contamination peut être une source majeure d'erreur lorsque l'on travaille dans la plage des 1 ng avec les instruments. Une manipulation attentive des appareils et une technique soigneuse permettront de réduire ce problème. Par conséquent, seule de l'eau de qualité 1 (7.3.a) doit être utilisée. On doit veiller à ce que tous les matériels en contact avec l'eau soient exempts de mercure.

Les produits chimiques utilisés pour la préparation des échantillons peuvent constituer une source majeure de contamination. Seuls des réactifs exempts de mercure doivent être utilisés. Il est, par conséquent, fortement recommandé de mesurer les valeurs à blanc des agents réducteurs et des autres produits chimiques avant de les utiliser pour la préparation des échantillons. Les béchers, les pipettes, les flacons volumétriques, etc. constituent tous des sources majeures de contamination métallique. Il est essentiel d'utiliser des plastiques exempts de mercure ou du matériel en verre de silice (quartz) pour manipuler l'échantillon.

Concernant les mesures par ICP-OES et ICP-MS, l'effet de mémoire se produit dans les cas où des concentrations élevées de mercure sont introduites. La dilution de la solution d'échantillon est nécessaire dans le cas de niveaux élevés de mercure. Si l'effet de mémoire n'est pas atténué par cette dilution, un nettoyage approfondi de l'équipement est alors requis.

- a) Eau: La qualité 1, telle que spécifiée par l'ISO 3696, doit être utilisée pour la préparation et la dilution de toutes les solutions d'échantillon.
- b) Acide nitrique (concentré): $\rho(\text{HNO}_3) = 1,4 \text{ g/ml}$, à une fraction massique de 65 % (m/m), de qualité «métaux en traces».
- c) Acide nitrique, à une fraction massique de 50 %, de qualité «métaux en trace»..
- d) Acide nitrique, 0,5 mol/l, de qualité «métaux en traces».
- e) Acide nitrique, à une fraction massique de 1 %, de qualité «métaux en traces».

- f) Acide nitrique, à une fraction massique de 1,5 %, de qualité «métaux en trace».
- g) Acide nitrique, à une fraction massique de 5 %, de qualité «métaux en trace».
- h) Acide fluoroborique: HBF₄ à une fraction massique de 50 %, de qualité «métaux en traces» (pour la digestion aux micro-ondes).
- i) Peroxyde d'hydrogène: H₂O₂ à une fraction massique de 30 %, de qualité «métaux en traces» (pour la digestion aux micro-ondes).
- j) Solution étalon contenant 1 000 mg/ml de mercure, de qualité «métaux en traces».
- k) Tétrahydridoborate de potassium (borohydrure de potassium): KBH₄, de qualité «métaux en traces».
- l) Permanganate de potassium: KMnO₄, solution à 5 % (m/v), de qualité «métaux en traces». Dissoudre 5 g de permanganate de potassium dans 100 ml d'eau (7.3.a).
- m) Tétrahydridoborate de sodium (borohydrure de sodium), NaBH₄, de qualité «métaux en traces».
- n) Hydroxyde de sodium, NaOH (de qualité «métaux en traces»).
- o) Solution étalon interne, de qualité «métaux en traces»:
 - Des éléments étalons internes qui n'interfèrent pas avec l'élément cible sont utilisés pour la ICP-OES et la ICP-MS. De même, la présence de ces éléments étalons internes dans la solution d'échantillon doit rester à des niveaux négligeables. Sc, In, Tb, Lu, Re, Rh, Bi et Y peuvent servir d'éléments étalons internes.
 - Il est recommandé d'utiliser Sc ou Y avec ICP-OES. La concentration recommandée est de 1 000 mg/l.
 - Il est recommandé d'utiliser Rh avec ICP-MS. La concentration recommandée est de 1 000 µg/l.
- p) Agent réducteur pour CV-AAS: 3 % (m/v) NaBH₄ dans 1 % (m/v) de NaOH.
Ajouter environ 800 ml d'eau (7.3.a) dans un flacon volumétrique d'un litre, puis ajouter 10,0 g de lessive de soude (hydroxyde de sodium) (7.3.n). Ajouter 30,0 g de poudre de tétrahydridoborate de sodium (7.3.m), mélanger jusqu'à dissolution complète, remplir d'eau jusqu'au repère (7.3 a) et filtrer. Préparer la solution quotidiennement.

NOTE 1 Une solution réductrice contenant du tétrahydridoborate de sodium dans une solution d'hydroxyde de sodium est recommandée. Si le système disponible à hydrure de mercure n'admet pas ce réducteur, du chlorure d'étain(II) peut être utilisé en remplacement. Il convient de suivre les instructions du manuel de l'opérateur de l'instrument.

- q) Agent réducteur pour CV-AFS: 1 % (m/v) KBH₄ dans 0,05 % (m/v) NaOH.

Ajouter environ 800 ml d'eau (7.3.a) dans un flacon volumétrique d'un litre, puis ajouter 0,50 g de lessive de soude (hydroxyde de sodium) (7.3.n). Ajouter 10,0 g de poudre de tétrahydridoborate de potassium (7.3.k), mélanger jusqu'à dissolution complète, remplir d'eau jusqu'au repère (7.3.a) et filtrer. Préparer la solution quotidiennement.

NOTE 2 Une solution réductrice contenant du tétrahydridoborate de potassium dans une solution d'hydroxyde de sodium est recommandée. Si le système disponible à hydrure de mercure n'admet pas ce réducteur, du chlorure d'étain(II) peut être utilisé en remplacement. Il convient de suivre les instructions du manuel de l'opérateur de l'instrument.

7.4 Préparation des échantillons

7.4.1 Prise d'essai

Les diverses méthodes d'essai, pouvant être utilisées en remplacement conformément à la présente norme, exigent des quantités différentes d'échantillon pour obtenir des résultats de la qualité requise.

Dans le cas de produits électroniques, l'échantillon doit d'abord être détruit mécaniquement par des moyens appropriés (par exemple meulage, broyage, découpe) avant de lancer la dissolution chimique de la poudre. Pour assurer une prise d'échantillon représentative à cette étape, une certaine taille de particules est requise, en fonction de la quantité de départ de l'échantillon (voir Article 5).

Les lampes fluorescentes à cathode froide (CCFL) et les échantillons contenant du mercure liquide doivent être gelés puis écrasés avant d'être traités comme décrit dans le présent article. Il est recommandé de suivre les instructions de la publication California EPA SOP n° 914-S^[21].

Pour la détermination du mercure dans des lampes fluorescentes à une seule extrémité (lampes fluorescentes compactes), se conformer aux instructions de l'Annexe E de la décision 2002/747/CE^[20].

Pour des lampes fluorescentes à deux extrémités (plus longues), il est presque impossible de congeler complètement la lampe. Dans ce cas, utiliser la procédure donnée dans le JEL303-2004, 4.1.3.1 ff^[19].

Les solutions concentrées résultantes peuvent être mesurées directement par ICP-OES et ICP-MS; en d'autres termes la solution de digestion peut être analysée sans autre préparation des échantillons. Lorsque les méthodes CV-AAS et CV-AFS sont utilisées, le mercure est réduit à son état élémentaire avant analyse.

7.4.2 Digestion par voie humide (digestion de produits électroniques)

La digestion par voie humide est recommandée pour les matériaux métalliques et les produits électroniques, sauf si les métaux contiennent des quantités significatives de silice (Si), zirconium (Zr), hafnium (Hf), titane (Ti), tantale (Ta), niobium (Nb) ou tungstène (W). Pour ces matériaux et pour les polymères, une digestion aux micro-ondes, décrite en 7.4.3, est recommandée.

- a) Un échantillon d'environ 1 g est pesé dans le récipient de réaction et 30 ml d'acide nitrique concentré (7.3.b) sont ajoutés. (Lorsque la quantité d'échantillon disponible est de 500 mg ou moins, se conformer aux instructions données en 7.4.3).

Le récipient est muni d'un réfrigérant à reflux et d'un récipient d'absorption (à la partie supérieure du réfrigérant - voir la Figure E.1 de l'Annexe E) contenant 10 ml d'acide nitrique à 0,5 mol/l (7.3.d). Un programme de chauffage est ensuite lancé afin de digérer les échantillons pendant 1 h à température ambiante, puis pendant 2 h à 90 °C.

Après refroidissement à la température ambiante, le contenu du tube d'absorption est placé dans le récipient de réaction et la solution obtenue est transférée dans un flacon volumétrique de 250 ml, rempli à une fraction massique de 5 % (m/m) d'acide nitrique (7.3.g) jusqu'au repère (si l'échantillon est complètement digéré).

- b) Pour les mesures par les méthodes ICP-OES et ICP-MS, la solution d'échantillon obtenue peut être diluée à l'eau (7.3 a) aux niveaux de concentration appropriés aux dites mesures. Ajouter 250 µl d'étalon interne (7.3.o) pour un volume de 250 ml avant de compléter jusqu'au repère.
- c) Si l'échantillon n'est pas complètement digéré (par exemple dans le cas de cartes de circuits imprimés), l'échantillon est filtré à travers un filtre (7.2.c) et le résidu solide est lavé quatre fois avec 15 ml d'acide nitrique à une fraction massique de 5 %. La solution obtenue est transvasée dans un flacon volumétrique de 250 ml complétée jusqu'au repère avec de l'acide nitrique (7.3.g) à une fraction massique de 5 %.
- d) Les résidus d'échantillon doivent être séparés par une centrifugeuse ou un filtre. Les résidus doivent être soumis à l'essai par des mesures appropriées (par exemple XRF) afin de confirmer l'absence d'éléments cibles.

7.4.3 Digestion aux micro-ondes

La digestion aux micro-ondes est recommandée pour les matériaux suivants:

- Métaux contenant des quantités significatives de silice (Si), zirconium (Zr), hafnium (Hf), titane (Ti), tantale (Ta), niobium (Nb) ou tungstène (W).
- Polymères.
- Dans les cas où la quantité disponible d'échantillon est inférieure à 0,5 g.

NOTE 1 Il est fortement recommandé de peser des quantités identiques d'échantillons et un même type d'échantillons en une seule session de digestion.

NOTE 2 Le mercure peut être déterminé dans la même solution avec le Pb et le Cd obtenus dans un circuit fermé pour la décomposition acide décrite dans les Articles 8 à 10.

- a) Peser environ 100 mg du matériau dans un récipient en PTFE-TFM ou PFA-TFM. Ajouter 5 ml d'acide nitrique concentré (7.3.b), 1,5 ml de solution HBF_4 (7.3.h) à 50 % de fraction massique, 1,5 ml de H_2O_2 (7.3.i) à 30 % de fraction massique et 1 ml d'eau (7.3.a). Fermer le récipient et laisser digérer l'échantillon dans le four à micro-ondes suivant un programme de digestion spécifié par avance. Un exemple de programme approprié de digestion aux micro-ondes est donné en Annexe E.
- b) Après refroidissement du récipient à la température ambiante (temps approximatif requis: 1 h), ce dernier est ouvert et la solution est filtrée à travers un filtre (7.2.e) dans un flacon de 25 ml, lavée et complétée jusqu'au repère avec de l'eau (7.2.a).
- c) Les résidus d'échantillon éventuels doivent être séparés par une centrifugeuse ou un filtre. Les résidus doivent être soumis à l'essai par des mesures appropriées (par exemple XRF) afin de confirmer l'absence d'éléments cibles.

NOTE 3 Si la pureté du HBF_4 disponible n'est pas suffisante, du HF peut être utilisé en remplacement.

7.4.4 Préparation du réactif témoin de laboratoire

La procédure est identique à celle de la préparation des échantillons et est exécutée de manière concomitante sans l'échantillon.

7.5 Procédure d'essai

7.5.1 Préparation des solutions d'étalonnage

Toutes les analyses nécessitent la préparation d'une courbe d'étalonnage pour couvrir la plage de concentration appropriée. Les étalons sont préparés en diluant la solution mère de métal (7.3.j) avec de l'acide nitrique (7.3.f) à une fraction massique de 1,5 %. Lorsque des méthodes d'étalon interne (ICP-OES et ICP-MS) sont utilisées, les quantités appropriées de solvants pour les solutions étalons internes (7.3.o) sont ajoutées.

Préparer un réactif témoin d'acide nitrique (7.3.f) à une fraction massique de 1,5 % et au moins trois étalons en quantité graduée dans la plage appropriée de la partie linéaire de la courbe d'étalonnage.

Les étalons doivent être conservés dans des conteneurs en matière plastique exempts de mercure. La solution mère (7.3.j) est habituellement stable pendant au moins une année, alors que les solutions étalons doivent être préparées chaque jour.

La stabilité des solutions étalons de mercure peut être gravement affectée par l'adsorption sur les parois du récipient de stockage. Par conséquent, il est recommandé de stabiliser les solutions étalons de mercure en ajoutant quelques gouttes de solution de KMnO_4 (7.3.l) à une fraction massique de 5 %.

NOTE Une solution d'or (Au) à 1 % (m/v) peut également être utilisée au lieu du permanganate de potassium.

7.5.2 Elaboration de la courbe d'étalonnage

Les spectromètres sont préparés pour quantification avec un réactif témoin et au minimum trois étalons.

a) CV-AAS

- Les valeurs d'absorbance de l'élément cible Hg sont relevées. La courbe d'étalonnage obtenue montre la relation entre l'absorbance du Hg et sa concentration.
- L'Annexe E fournit la longueur d'onde recommandée ainsi que des exemples de paramètres d'instruments utilisables.

b) CV-AFS

- Les valeurs de l'intensité de fluorescence de l'élément cible Hg sont relevées. La courbe d'étalonnage obtenue montre la relation entre l'intensité de fluorescence du Hg et sa concentration.
- L'Annexe E fournit la longueur d'onde recommandée ainsi que des exemples de paramètres d'instruments utilisables.

c) ICP-OES

- Les valeurs d'intensité d'émission de l'élément cible Hg ainsi que celles de l'étalon interne, sont relevées. La courbe d'étalonnage obtenue montre la relation entre le rapport des intensités d'émission de Hg et celles de l'étalon interne, avec la concentration en Hg.
- L'Annexe E fournit la longueur d'onde recommandée ainsi que des exemples de paramètres d'instruments utilisables.

d) ICP-MS

- Les valeurs d'intensité masse/charge (m/z) de l'élément cible Hg ainsi que celles de l'étalon interne, sont relevées. La courbe d'étalonnage obtenue montre la relation entre le rapport de m/z du Hg et celui de l'étalon interne, avec la concentration en Hg.
- L'Annexe E fournit les rapports m/z recommandés pour le Hg, ainsi que des exemples de paramètres d'instruments utilisables.

Une courbe de régression linéaire avec une corrélation (R^2) non inférieure à $<0,998$ doit être utilisée pour l'étalonnage initial. Dans le cas où le résultat obtenu avec l'étalon de vérification (par exemple substance étalon, étalon, etc.) diffère de la valeur prévue de plus de 20 %, l'étalonnage et tous les échantillons de la séquence doivent faire l'objet de nouvelles mesures.

7.5.3 Mesure de l'échantillon

Une fois la courbe d'étalonnage élaborée, le réactif témoin de laboratoire et la solution d'échantillon sont mesurés. Si la concentration d'échantillon se situe au-dessus de la courbe de concentration, la solution doit être diluée avec de l'acide nitrique à une fraction massique de 1% (7.3.e) pour s'inscrire dans la gamme de la courbe d'étalonnage, puis être mesurée une nouvelle fois.

La justesse des mesures est vérifiée au moyen d'une substance étalon, d'une solution d'étalonnage, etc. à intervalles réguliers (par exemple tous les 10 échantillons). Si nécessaire, une courbe d'étalonnage est de nouveau tracée.

NOTE Si l'échantillon est dilué à la plage d'étalonnage, il convient de s'assurer que la concentration d'étalon interne dans la solution d'échantillon diluée est ajustée à la solution étalon.

7.5.4 Calcul

La concentration mesurée en 7.5.3 est la concentration de mercure dans la solution d'échantillon. La concentration de mercure dans l'échantillon est calculée à partir de l'équation suivante:

$$c = \frac{(A_1 - A_2)}{m} \times V \quad (2)$$

où

c est la concentration de mercure dans l'échantillon en $\mu\text{g/g}$;

A_1 est la concentration de mercure dans la solution d'échantillon, en mg/l ;

A_2 est la concentration de mercure dans le réactif témoin de laboratoire, en mg/l ;

V est le volume total de la solution d'échantillon, en ml, qui dépend

- du type de digestion réalisée (250 ml pour une digestion par voie humide, 25 ml pour une digestion aux micro-ondes),
- du type de la série particulière de dilutions utilisée;

m est la quantité mesurée d'échantillon, en g.

7.6 Evaluation de la méthode

Des laboratoires bénévoles sélectionnés par le GT3 du CE 111 de la CEI ont participé à une étude internationale inter-laboratoires (IIS2) destinée à déterminer l'aptitude des procédures à fournir des résultats reproductibles (et fiables). En résumé, quatre matériaux de référence certifiés ont été fournis à différents laboratoires afin de déterminer les valeurs du mercure. Le rapport entre les valeurs assignées (ou certifiées) et les valeurs déterminées s'inscrivait entre 90 % et 97 %. Le Tableau 8 présente des résultats détaillés. L'Article 4 fournit des commentaires sur les limites de détection et de quantification.

Tableau 8 – Résultats moyens et taux de rétablissement pour le mercure obtenus au cours de l'étude IIS2

Numéro	Description de l'échantillon	Valeur certifiée de Hg mg/kg	Résultat moyen de Hg mg/kg	Ecart-type mg/kg	Taux de rétablissement %	Plage de taux de rétablissement %	Nombre de jeux de données utilisés
IIS2-C10	EC 680 (polyéthylène)	25,3	24,6	3,7	97	83 - 119	5 Trois analyses répétées chacune
IIS2-C11	EC 681 (polyéthylène)	4,5	4,4	0,4	97	84 - 106	5 Trois analyses répétées chacune; une observation aberrante éliminée
IIS2-C12	NMIJ CRM 8112-a (acrylonitrile butadiène styrène)	100	90	6	90	83 - 99	9 Trois analyses répétées chacune; trois observations aberrantes éliminées
IIS2-C13	NMIJ CRM 8113-a (acrylonitrile butadiène styrène)	941,5	893,0	53	95	89 - 103	9 Trois analyses répétées chacune; trois observations aberrantes éliminées

NOTE Un ensemble de données a été défini comme une observation aberrante lorsque le taux de rétablissement du jeu de données obtenu était inférieur à 50 % ou supérieur à 200 %.

8 Détermination du plomb et du cadmium dans des polymères par ICP-OES, ICP-MS et AAS

8.1 Présentation

Le présent article spécifie la procédure de détermination du plomb élémentaire (Pb) et du cadmium élémentaire (Cd) dans des polymères issus de produits électrotechniques. Trois méthodes sont décrites (ICP-OES, ICP-MS et AAS) ainsi que plusieurs procédures de

préparation des échantillons chimiques, c'est-à-dire la solution d'échantillon à partir de laquelle les experts peuvent choisir la méthode d'analyse la plus appropriée.

Les procédures d'essai décrites dans le présent article sont prévues pour donner le niveau le plus élevé d'exactitude et de précision pour des concentrations de substances réglementées dans une plage, dans le cas des méthodes ICP-OES et AAS, à partir de 10 mg/kg pour le Pb et le Cd et, dans le cas de la méthode ICP-MS, à partir de 0,1 mg/kg pour le Pb et le Cd. Les procédures ne sont pas limitées pour les concentrations plus élevées.

Les échantillons sont prédécoupés et/ou broyés à la taille voulue pour la méthode choisie conformément à la procédure décrite dans l'Article 5. Selon la méthode particulière de préparation de la solution d'essai, les quantités d'échantillons peuvent varier comme détaillé dans le présent article. La solution d'essai peut être préparée par incinération par voie sèche ou par digestion des échantillons par des acides tels que l'acide nitrique ou l'acide sulfurique. La digestion acide peut s'effectuer dans un système fermé à l'aide d'un récipient de digestion aux micro-ondes. Les détails particuliers de l'approche utilisée pour la digestion varient en fonction de la présence d'éléments particuliers – les procédures correspondantes sont décrites dans le présent article. Les informations relatives à la présence de ces éléments peuvent être obtenues par les expériences de détection décrites précédemment (voir Article 6). Enfin, le plomb et le cadmium, dans la solution de digestion obtenue, sont déterminés simultanément par ICP-OES, ICP-MS ou AAS.

L'analyse par ICP-OES, ICP-MS ou AAS permet généralement de déterminer les éléments cibles avec une grande justesse (incertitude dans la plage basse des pourcentages) et/ou une grande sensibilité (jusqu'au niveau du $\mu\text{g}/\text{kg}$). Il existe toutefois quelques limites: la procédure ne s'applique pas aux matériaux contenant des polymères polyfluorés du fait de leur stabilité. Si de l'acide sulfurique doit être utilisé dans la procédure d'analyse, il existe alors un risque de perdre le Pb et ainsi d'obtenir des valeurs faussement basses pour cet analyte. Il est fortement conseillé d'utiliser un équipement approprié et évolué, c'est-à-dire un système de digestion aux micro-ondes. Cependant, si les experts peuvent assurer leur adéquation, des solutions plus simples peuvent être retenues, comme par exemple l'addition d'acide borique au lieu d'un porte-échantillon résistant aux HF. Les interférences spectrales les plus fréquentes sont données dans le Tableau F.1.

Des limites et des risques découlent de l'étape de dissolution de l'échantillon, par exemple précipitation des éléments cibles ou d'autres éléments; dans ce cas, les résidus doivent être vérifiés séparément ou dissous selon une autre méthode, puis combinés à la solution d'échantillon d'essai.

Pour les résultats de l'évaluation des méthodes, voir 8.6.

Les travaux réalisés conformément à la présente norme impliquent l'utilisation de substances toxiques et dangereuses. Des avertissements détaillés sont donnés ci-dessous.

8.2 Appareillage, équipements et matériaux

Les éléments suivants doivent être utilisés pour l'analyse:

- a) ICP-OES: équipement consistant en un porte-échantillon, une torche à plasma, une chambre de pulvérisation, un nébuliseur, une unité optique, un détecteur, un dispositif de commande du système et un dispositif de restitution de données.
- b) ICP-MS: équipement consistant en un porte-échantillon, une torche à plasma, une chambre de pulvérisation, un nébuliseur, une interface, une unité de séparation de masse, un dispositif de commande du système et un dispositif de restitution des données.
- c) AAS: équipement consistant en un porte-échantillon, un système nébuliseur/brûleur avec tête de brûleur air/acétylène, des lampes à source de rayonnement, un détecteur et un système de commande et un système de traitement des données.
- d) Balance d'analyse: précision de mesure de 0,000 1 g.

- e) Système d'introduction des échantillons résistant aux HF: système dont la section d'insertion de l'échantillon et la torche ont été traitées pour résister à l'acide fluorhydrique.
- f) Gaz argon: gaz d'une pureté volumétrique supérieure à 99,99 %.
- g) Gaz acétylène: gaz d'une pureté volumétrique supérieure à 99,99 %.
- h) Matériel en verre: tout le matériel en verre doit être nettoyé à l'acide nitrique à une fraction massique de 10 % avant utilisation:
 - 1) Flacon Kjeldhal: 100 ml;
 - 2) Bêchers: par exemple d'une contenance de 100 ml, 200 ml, etc.;
 - 3) Flacons volumétriques: par exemple d'une contenance de 50 ml, 100 ml, 200 ml, etc.;Le cas échéant, d'autres types d'équipements volumétriques d'une précision et d'une exactitude acceptables peuvent être utilisés en remplacement des flacons volumétriques.
 - 4) Pipettes: par exemple d'une contenance de 1 ml, 5 ml, 10 ml, 20 ml, etc.;
 - 5) Entonnoir;
 - 6) Verre de montre;
- i) Creusets, en platine: par exemple d'une contenance de 50 ml, 150 ml, etc.;
- j) Creusets, en porcelaine: par exemple d'une contenance de 50 ml, 150 ml, etc.;
- k) Equipements en PTFE/PFA (polytétrafluoroéthylène (PTFE)/résine de polyester perfluoroalcoyl (PFA): tous les équipements doivent être nettoyés à l'acide nitrique (8.3 d) à une fraction massique de 10 % avant utilisation:
 - 1) Bêchers: par exemple d'une contenance de 100 ml, 200 ml, etc.;
 - 2) Flacons volumétriques: par exemple d'une contenance de 100 ml, 200 ml, 500 ml, etc.
- l) Micropipettes: par exemple de contenance 10 µl, 100 µl, 200 µl, etc.
- m) Conteneurs: pour la conservation de la solution étalon et de l'étalon.
- n) Les conteneurs en polyéthylène à haute densité (PE-HD) doivent servir à la mesure ordinaire de la concentration d'éléments. Des conteneurs en résine d'alcane perfluoroalcoyl (PFA) ou en plastique de perfluoro (éthylène-propylène) (FEP) doivent être utilisés pour déterminer le niveau des ultratrace. Dans les deux cas, l'utilisateur doit confirmer que le conteneur choisi convient.
- o) Plaque chauffante électrique ou bain de sable chauffé.
- p) Four à moufle: pouvant être maintenu à une température de 550 °C ± 25 °C.
- q) Bec Bunsen ou brûleur à gaz de type similaire.
- r) Système de digestion aux micro-ondes équipé d'un porte-échantillon et de récipients en polytétrafluoroéthylène/tétrafluoroéthylène modifié (PTFE/TFM) à haute pression, ou en résine d'alcane perfluoroalcoyl/tétrafluoroéthylène modifié (PFA/TFM), ou d'autres récipients en fluorocarbure.

NOTE Il existe de nombreuses recommandations de sécurité et de fonctionnement spécifiques au modèle et au fabricant du matériel à micro-ondes utilisé dans les différents laboratoires. L'analyste est prié de consulter le manuel de l'équipement particulier, le fabricant et la documentation pour utiliser correctement et en toute sécurité l'équipement à micro-ondes et les récipients.

- s) Récipient en PTFE de digestion aux micro-ondes: par exemple d'une contenance de 100 ml, etc.
- t) Plaque d'isolation thermique résistante à la chaleur.
- u) Filtre en papier.

8.3 Réactifs

Le réactif utilisé pour la détermination des éléments en traces doit être d'une pureté adéquate. La concentration de l'analyte ou de substances interférentes dans les réactifs et l'eau doit être négligeable par comparaison à la concentration la plus basse à déterminer.

Tous les réactifs servant à l'analyse par ICP-MS, y compris les acides ou les produits chimiques utilisés, doivent avoir un haut degré de pureté: les métaux en traces doivent être inférieurs à une fraction massique de 1×10^{-6} % au total.

- a) Eau: La qualité 1 spécifiée par l'ISO 3696 sert à la préparation et à la dilution de toutes les solutions d'échantillon.
- b) Acide sulfurique: $\rho(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1,84$ g/ml, à une fraction massique de 95 %, de qualité «métaux en traces».
- c) Acide nitrique: $\rho(\text{HNO}_3) = 1,40$ g/ml, à une fraction massique de 65 %, de qualité «métaux en traces».
- d) Acide nitrique, à une fraction massique de 10 %, (de qualité «métaux en traces»).
- e) Peroxyde d'hydrogène: $\rho(\text{H}_2\text{O}_2) = 1,10$ g/ml, à une fraction massique de 30 %, de qualité «métaux en traces».
- f) Acide chlorhydrique: $\rho(\text{HCl}) = 1,19$ g/ml, à une fraction massique de 37 %, de qualité «métaux en traces».
- g) Acide fluorhydrique: $\rho(\text{HF}) = 1,18$ g/ml, à une fraction massique de 40 %, de qualité «métaux en traces».
- h) Acide borique (HBO_3), à une fraction massique de 5 % (50 mg/ml), de qualité «métaux en traces».
- i) Solution étalon certifiée à 1 000 mg/kg de Pb.
- j) Solution étalon certifiée à 1 000 mg/kg de Cd.
- k) Solution étalon interne certifiée.
 - Des éléments étalons internes qui n'interfèrent pas avec l'élément cible doivent être utilisés. Par ailleurs, la présence de ces éléments étalons internes dans la solution d'échantillon doit rester à un niveau négligeable. Sc, In, Tb, Lu, Re, Rh, Bi et Y peuvent servir d'éléments étalons internes.
 - Il est recommandé d'utiliser Sc ou Y avec ICP-OES et Rh avec ICP-MS. La concentration utilisée doit être de 1 000 mg/kg.

NOTE 1 La toxicité de chaque réactif indiqué de b) à j) pour la présente méthode n'a pas été précisément définie; cependant, il convient que chaque composé chimique soit traité comme présentant un risque potentiel pour la santé. De ce point de vue, une exposition à ces produits chimiques au niveau le plus bas possible par tout moyen disponible est recommandée.

NOTE 2 Les méthodes de préparation impliquent l'emploi d'acides puissants corrosifs et causant des brûlures. Il convient de porter des vêtements et des gants de laboratoire, ainsi que des lunettes de sécurité, pour manipuler ces acides.

NOTE 3 L'acide nitrique dégage des fumées toxiques. Toujours effectuer la digestion, ainsi que l'addition d'acide aux échantillons (du fait du risque de dégagement de gaz toxiques) dans une armoire à fumées.

NOTE 4 Il convient de canaliser les gaz d'échappement du plasma par un système efficace d'extraction des fumées.

NOTE 5 Il convient de prendre des mesures de précaution spéciales lors de l'utilisation de l'acide fluorhydrique, c'est-à-dire un gel antidote HF (du gluconate de calcium à 2,5% dans un gel soluble dans l'eau) de première urgence pour les brûlures HF de la peau.

8.4 Préparation des échantillons

8.4.1 Prise d'essai

Les diverses procédures d'analyse pouvant être utilisées en remplacement, conformément à la présente norme, nécessitent des quantités différentes d'échantillon pour parvenir à la qualité de résultats requise. En général, il est conseillé de commencer par la quantité la plus élevée d'échantillon convenant à la procédure choisie. Certaines informations d'ordre général concernant les limites et les risques sont fournies en 8.1.

Pour la digestion acide, 400 mg d'échantillon broyé, concassé ou découpé sont mesurés précisément à 0,1 mg près. Pour la méthode d'incinération par voie sèche ou pour le système fermé de décomposition acide, 200 mg d'échantillon broyé, concassé ou découpé sont mesurés précisément à 0,1 mg près.

8.4.2 Préparation de la solution d'essai

8.4.2.1 Méthode d'incinération par voie sèche

Si l'échantillon ne contient pas de composés halogènes (l'information peut avoir été obtenue lors de détections précédentes), les opérations suivantes doivent être effectuées:

- a) Mesurer l'échantillon dans un creuset (8.2.j) monté dans l'orifice d'une plaque d'isolation thermique résistant à la chaleur (8.2.t).
- b) Chauffer le creuset (8.2.j) doucement à l'aide du brûleur (8.2.q) dans une hotte assurant la ventilation voulue, tout en veillant à ce que l'échantillon ne prenne pas feu.
- c) Lorsque l'échantillon s'est décomposé en une masse carbonisée, le chauffage est progressivement augmenté jusqu'à ce que les produits de décompositions volatils aient été expulsés et qu'il reste un résidu charbonneux.
- d) Transférer le creuset et son contenu dans le four à moufle (8.2.p) à $550\text{ °C} \pm 25\text{ °C}$ [27], avec la porte entrouverte, afin d'amener suffisamment d'air pour oxyder le carbone.
- e) Le chauffage se poursuit jusqu'à ce que le carbone soit complètement oxydé et laisse une cendre propre.
- f) Sortir le creuset (8.2.j) et son contenu du four (8.1.p) et laisser refroidir à la température ambiante.
- g) Ajouter 5 ml d'acide nitrique (8.3.c), transférer la solution obtenue dans un flacon volumétrique de 50 ml (8.2.h.3) et compléter avec de l'eau (8.3.a) jusqu'au repère. Il s'agit de la solution d'échantillon concentrée. Diluer cette solution avec de l'eau (8.3.a) au niveau de concentration approprié pour chaque appareil de mesure. Si un étalon interne (8.3.k) doit être utilisé, il doit être ajouté avant le remplissage de complément. Pour un volume final de 50 ml, ajouter 500 µl d'étalon interne (8.3.k) pour les méthodes ICP-OES et ICP-MS (après une phase de dilution à 1:1 000) avant le remplissage.

Si l'échantillon contient des quantités significatives de composés halogènes (l'information peut avoir été obtenue lors de détections précédentes), les opérations suivantes doivent être effectuées:

- 1) Mesurer l'échantillon dans un creuset (8.2.j).
- 2) Ajouter de 5 ml à 15 ml d'acide sulfurique (8.3.b), puis chauffer le creuset (8.2.j) et son contenu lentement sur une plaque chaude ou dans un bain de sable (8.2.o) jusqu'à ce que le plastique fonde et noircisse.
- 3) Après refroidissement, ajouter 5 ml d'acide nitrique (8.3.c) et poursuivre le chauffage jusqu'à ce que le plastique se dégrade entièrement et que des fumées blanches se dégagent.
- 4) Après refroidissement, le creuset (8.2.j) est placé dans un four à moufle (8.2.p) maintenu à $550\text{ °C} \pm 25\text{ °C}$ et l'échantillon est évaporé, séché et réduit en cendres jusqu'à ce que le carbone ait été complètement incinéré.
- 5) Après réduction de l'échantillon en cendres, ajouter 5 ml d'acide nitrique (8.3.c), transférer la solution obtenue dans un flacon volumétrique de 50 ml (8.2.h.3) et compléter avec de l'eau (8.3.a) jusqu'au repère. La solution obtenue est la solution d'échantillon concentrée. Diluer cette solution avec de l'eau (8.3.a) au niveau de concentration approprié pour chaque appareil de mesure. Si un étalon interne doit être utilisé, il doit être ajouté avant le remplissage. Pour un volume final de 50 ml, 500 µl d'étalon interne (8.3.k) pour les méthodes ICP-OES et ICP-MS (après une phase de dilution à 1:1 000) doivent être ajoutés avant le remplissage.

- 6) Les résidus d'échantillon éventuels doivent être séparés par une centrifugeuse ou un filtre. Les résidus doivent être soumis à l'essai par des mesures appropriées (par exemple XRF) afin de confirmer l'absence d'éléments cibles.

NOTE Cette méthode ne s'applique pas aux fluorocarbures (voir 8.1.).

8.4.2.2 Méthode de la digestion acide

Cette méthode est utilisée pour déterminer le cadmium uniquement. Elle ne permet pas de déterminer le plomb, dans la mesure où l'acide sulfurique peut entraîner une perte de Pb dans l'échantillon du fait de la formation de $PbSO_4$.

- a) Mesurer l'échantillon dans un flacon (8.2.h.1). Ajouter 5 ml d'acide sulfurique (8.3.b) et 1 ml d'acide nitrique (8.3.c) et chauffer le flacon jusqu'à ce que l'échantillon soit réduit en cendres et que des fumées blanches se dégagent. Après arrêt du chauffage, de petites quantités d'acide nitrique (8.3.c) sont ajoutées (environ 0,5 ml), le chauffage reprenant jusqu'à ce que des fumées blanches se dégagent. Le chauffage et la décomposition à l'acide nitrique (8.3.c) sont répétés jusqu'à ce que la solution décomposée devienne jaune pâle.
- b) Laisser l'échantillon refroidir pendant plusieurs minutes. Ajouter du peroxyde d'hydrogène (8.3.e) en petites quantités, plusieurs millilitres à la fois, et chauffer l'échantillon jusqu'à ce que des fumées blanches se dégagent. Après refroidissement, transférer la solution dans un flacon volumétrique de 100 ml (8.2.h.3) et compléter avec de l'eau (8.3.a) jusqu'au repère. La solution obtenue est la solution d'échantillon concentrée. Diluer cette solution avec de l'eau (8.3.a) au niveau de concentration approprié pour chaque appareil de mesure. Si un étalon interne doit être utilisé, il doit être ajouté avant le remplissage. Pour un volume final de 100 ml, ajouter 1 000 μ l d'étalon interne (8.2.k) pour les méthodes ICP-OES et ICP-MS (après une phase de dilution à 1:1 000) avant le remplissage.
- c) Lorsque la digestion générale ne convient pas ou lorsque l'échantillon contient des quantités significatives de Si, de Ti, etc. (l'information peut avoir été obtenue lors de détections précédentes), les opérations suivantes doivent être effectuées:
- Mesurer l'échantillon dans un flacon. Ajouter 5 ml d'acide sulfurique et 1 ml d'acide nitrique et chauffer le flacon jusqu'à ce que l'échantillon soit réduit en cendres et que des fumées blanches se dégagent. Arrêter le chauffage, ajouter de petites quantités d'acide nitrique (8.3.c) (environ 0,5 ml), et reprendre le chauffage jusqu'à ce que des fumées blanches se dégagent. Le chauffage et la décomposition à l'acide nitrique (8.3.c) sont répétés jusqu'à ce que la solution décomposée devienne jaune pâle.
 - Laisser l'échantillon refroidir pendant plusieurs minutes. Ajouter du peroxyde d'hydrogène en petites quantités, plusieurs millilitres à la fois, et chauffer l'échantillon jusqu'à ce que des fumées blanches se dégagent. Après refroidissement, transférer la solution dans un récipient en résine fluorocarbonée. Ajouter 5 ml d'acide sulfurique (8.3.g) et chauffer le flacon jusqu'à ce que des fumées blanches se dégagent. Ajouter de l'acide borique (8.3.h), selon la quantité souhaitée, pour permettre la complexation du fluorure et protéger la torche à plasma en quartz (si aucun système d'introduction de l'échantillon résistant à l'acide n'est disponible). Après refroidissement, transférer la solution dans un flacon volumétrique de 100 ml en PTFE/PFA (8.2.k.2) et compléter avec de l'eau (8.3.a) jusqu'au repère. La solution obtenue est la solution d'échantillon concentrée. Diluer cette solution avec de l'eau (8.3.a) au niveau de concentration approprié pour chaque appareil de mesure. Si un étalon interne doit être utilisé, il doit être ajouté avant le remplissage de complément. Pour un volume final de 100 ml, ajouter 1 000 μ l d'étalon interne (8.3.k) pour les méthodes ICP-OES et ICP-MS (après une phase de dilution à 1:1 000) avant le remplissage.
- d) Les résidus d'échantillon éventuels doivent être séparés par une centrifugeuse ou un filtre. Les résidus doivent être soumis à l'essai par des mesures appropriées (par exemple XRF) afin de confirmer l'absence d'éléments cibles.

8.4.2.3 Système fermé pour la décomposition à l'acide

Si un système fermé est utilisé, les opérations suivantes doivent être exécutées:

- a) Mesurer l'échantillon dans un récipient de digestion aux micro-ondes et ajouter 5 ml d'acide nitrique (8.3.c). Ajouter du peroxyde d'hydrogène (8.3.e) en petites quantités ou en quantités catalytiques (par exemple de 0,1 ml à 1 ml), selon la quantité souhaitée, pour aider à l'oxydation complète de la matière organique. Recouvrir le récipient d'un couvercle et le placer dans un appareil de digestion aux micro-ondes (8.2.r). Laisser l'échantillon être digéré dans un four à micro-ondes suivant un programme de décomposition spécifié par avance. Laisser l'échantillon refroidir, transférer la solution dans un flacon volumétrique de 50 ml (8.2.h.3) et le compléter ensuite avec de l'eau (8.3.a) jusqu'au repère. La solution obtenue est la solution d'échantillon concentrée. Diluer cette solution avec de l'eau (8.3.a) au niveau de concentration approprié pour chaque appareil de mesure. Si un étalon interne doit être utilisé, il doit être ajouté avant le remplissage de complément. Pour un volume final de 50 ml, ajouter 500 µl d'étalon interne (8.3.k) pour les méthodes ICP-OES et ICP-MS (après une phase de dilution à 1:1 000) avant le remplissage.

NOTE 1 Il convient de ne procéder à l'addition de peroxyde d'hydrogène que si les composants réactifs de l'échantillon sont connus. Le peroxyde d'hydrogène pouvant réagir rapidement et violemment avec des matériaux facilement oxydables, il convient de ce fait de ne pas l'ajouter si l'échantillon contient de grandes quantités de constituants organiques facilement oxydables.

- b) Lorsque la décomposition ne convient pas ou lorsque l'échantillon contient des quantités significatives de Si, de Ti, etc. (l'information peut avoir été obtenue lors de détections précédentes), les opérations suivantes doivent être effectuées:

- Mesurer l'échantillon dans un récipient de digestion aux micro-ondes. Ajouter 5 ml d'acide nitrique (8.3.c) et 1 ml d'acide fluorhydrique (8.3.g). Ajouter du peroxyde d'hydrogène (8.3.e) en petites quantités ou en quantités catalytiques (par exemple de 0,1 ml à 1 ml), pour aider à l'oxydation complète de la matière organique. Recouvrir le récipient d'un couvercle et le placer dans un appareil de digestion aux micro-ondes (8.2.r). Laisser l'échantillon être digéré dans un four à micro-ondes suivant un programme de décomposition spécifié par avance. Ajouter de l'acide borique (8.2.h), selon la quantité souhaitée, pour permettre la complexation du fluorure et protéger la torche à plasma en quartz (si aucun système d'introduction de l'échantillon résistant à l'acide n'est disponible). Laisser l'échantillon refroidir, transférer la solution dans un flacon volumétrique de 50 ml (8.2.k.2) en PTFE/PFA et le compléter ensuite avec de l'eau (8.3.a) jusqu'au repère. La solution obtenue est la solution d'échantillon concentrée. Diluer cette solution avec de l'eau (8.3.a) au niveau de concentration approprié pour chaque appareil de mesure. Si un étalon interne doit être utilisé, il doit être ajouté avant le remplissage de complément. Pour un volume final de 50 ml, ajouter 500 µl d'étalon interne (8.3.k) pour les méthodes ICP-OES et ICP-MS (après une phase de dilution à 1: 1 000) avant le remplissage.

NOTE 2 Il convient de ne procéder à l'addition de peroxyde d'hydrogène que si les composants réactifs de l'échantillon sont connus. Le peroxyde d'hydrogène pouvant réagir rapidement et violemment avec des matériaux facilement oxydables, il convient de ce fait de ne pas l'ajouter si l'échantillon contient de grandes quantités de constituants organiques facilement oxydables.

- c) Les résidus d'échantillon éventuels doivent être séparés par une centrifugeuse ou un filtre. Les résidus doivent être soumis à l'essai par des mesures appropriées (par exemple XRF) afin de confirmer l'absence d'éléments cibles.

8.4.3 Préparation du réactif témoin de laboratoire

La procédure est identique à celle de la préparation des échantillons et est exécutée de manière concomitante mais sans l'échantillon.

8.5 Procédure d'essai

La composition de l'échantillon est supposée être inconnue, auquel cas la méthode de l'étalon interne (méthode de comparaison des intensités) est recommandée. Si nécessaire, une méthode des additions d'étalons peut être utilisée. En l'absence d'éléments de matrice interférents ou si la composition de l'échantillon est connue, la méthode de la courbe d'étalonnage peut être appliquée.

NOTE Dans tous les cas, il convient également d'ajuster l'acide à la concentration de l'échantillon.

8.5.1 Préparation de la solution d'étalonnage

Après dilution progressive de chacune des solutions d'éléments étalons, les solutions ainsi diluées contenant de 0 µg à 100 µg de chaque élément sont transvasées dans un flacon volumétrique de 100 ml (8.2.h.3). Ajouter ensuite chaque réactif, et dans le cas de la méthode de l'étalon interne, les quantités appropriées de solution pour les solutions étalons internes (8.3.k) de manière à obtenir des concentrations de réactifs identiques à celles présentes dans la solution d'échantillon. La solution résultante est la solution mixte d'étalonnage.

8.5.2 Elaboration de la courbe d'étalonnage

Les spectromètres sont préparés pour la quantification. Une partie de la solution obtenue comme décrit en 8.5.1 est nébulisée dans le plasma d'argon ou par la flamme acétylène/air. Un système d'introduction d'échantillon résistant à l'acide fluorhydrique doit être utilisé lorsque la solution de l'échantillon en contient.

a) ICP-OES

- Les valeurs d'intensité d'émission des éléments cibles (ainsi que, le cas échéant, celles de l'étalon interne) sont relevées. Dans la méthode de la courbe d'étalonnage, la courbe montrant la relation entre l'intensité des émissions des éléments cibles et leurs concentrations sert de courbe d'étalonnage. Dans la méthode de l'étalon interne, la courbe montrant la relation entre le rapport d'intensité et la concentration des éléments cibles par rapport à la courbe des éléments étalons internes sert de courbe d'étalonnage.
- Les longueurs d'onde recommandées et les éléments interférents sont présentés dans le Tableau F.1.

b) ICP-MS

- Les valeurs de masse/charge (m/z) des éléments cibles (ainsi que, le cas échéant, celles de l'élément étalon interne) sont relevées. Dans la méthode de la courbe d'étalonnage, la courbe montrant la relation entre les intensités m/z des éléments cibles et leur concentration sert de courbe d'étalonnage. Dans la méthode de l'étalon interne, la courbe montrant la relation entre le rapport d'intensité et la concentration des éléments cibles par rapport à la courbe des éléments étalons internes sert de courbe d'étalonnage.
- Le rapport m/z peut être défini sur la base des données indiquées dans le Tableau F.2.

c) AAS

- Les valeurs d'absorbance des éléments cibles sont relevées. Dans la méthode d'étalonnage, la courbe montrant la relation entre l'absorbance des éléments cibles et la concentration sert de courbe d'étalonnage.
- Dans la méthode des additions d'étalons, les étalons sont ajoutés dans la solution d'échantillon et la concentration non connue est déterminée par extrapolation de la courbe des additions à une absorbance nulle.
- Les longueurs d'onde doivent être choisies eu égard aux longueurs d'onde de mesure typiques applicables aux éléments donnés dans le Tableau F.3. il convient d'appliquer la méthode des additions d'étalons en cas d'interférence due aux substances présentes conjointement.

Une courbe de régression linéaire avec une corrélation (R^2) non inférieure à $<0,998$ doit être utilisée pour l'étalonnage initial. Dans le cas où le résultat obtenu avec l'étalon de vérification (par exemple substance étalon, solution d'étalonnage, etc.) diffère de la valeur prévue de plus de 20 %, l'étalonnage et tous les échantillons de la séquence doivent faire l'objet de nouvelles mesures.

8.5.3 Mesure de l'échantillon

Une fois la courbe d'étalonnage élaborée, le réactif témoin de laboratoire et la solution d'échantillon sont mesurés. Si la concentration d'échantillon se situe au-dessus de la plage de la courbe de concentration, la solution doit être diluée pour revenir dans cette plage assurant une acidification appropriée des étalons et mesurée une nouvelle fois.

La justesse des mesures est vérifiée au moyen d'une substance étalon, d'une solution d'étalonnage, etc. à intervalles réguliers (par exemple tous les 10 échantillons). Si nécessaire, une courbe d'étalonnage est de nouveau tracée.

Dans le cas où le résultat obtenu avec l'étalon diffère de la valeur prévue de plus de 20 %, l'étalonnage et tous les échantillons de la séquence doivent faire l'objet de nouvelles mesures.

NOTE Si l'échantillon est dilué à la plage d'étalonnage, il faut s'assurer que la concentration d'étalon interne dans la solution d'échantillon diluée est ajustée à la solution étalon.

8.5.4 Calcul

La concentration mesurée en 8.5.3 est la concentration de chaque élément de la solution d'échantillon. La concentration de chaque élément dans l'échantillon est calculée à l'aide de l'équation:

$$c = \frac{(A_1 - A_2)}{m} \times V \quad (3)$$

où

c est la concentration de plomb ou de cadmium dans l'échantillon, en $\mu\text{g/g}$;

A_1 est la concentration de plomb ou de cadmium dans la solution d'échantillon, en mg/l ;

A_2 est la concentration de plomb ou de cadmium dans le réactif témoin de laboratoire, en mg/l ;

V est le volume total de la solution d'échantillon, en ml , qui dépend de la série particulière de dilutions effectuées;

m est la quantité mesurée d'échantillon, en g .

8.6 Evaluation de la méthode

Comme décrit de manière détaillée au 4.5, les limites de détection des instruments sont en général relativement faibles (parfois très faibles), mais elles ne représentent pas les LOD vraies d'une méthodologie appliquée à l'analyse d'échantillons réels. Pour aller au-delà de cette approche quelque peu théorique (voir 8.1), le GT3 du CE 111 de la CEI a réalisé plusieurs études internationales inter-laboratoires (IIS).

Dans le cadre de ces études, des MRC, des échantillons fournis de composition connue, ainsi que des échantillons réels, ont été analysés conformément aux procédures d'analyse décrites dans le présent article. Les résultats ont donné un aperçu des LOD réalisables dans la pratique et, ce qui est encore plus important, de la justesse et de l'exactitude des procédures d'analyse lorsqu'elles sont utilisées dans des opérations de routine.

Pour les méthodes décrites dans le présent article, l'étude IIS a révélé que la précision et la justesse s'inscrivaient toujours dans des valeurs de $\pm 20\%$ pour des quantités de plomb et de cadmium supérieures à 10 mg/kg , indépendamment de la méthode ou des équipements particuliers choisis.

9 Détermination du plomb et du cadmium dans les métaux par ICP-OES, ICP-MS et AAS

9.1 Présentation

Le présent article spécifie la procédure de détermination du plomb (Pb) et du cadmium (Cd) dans les métaux issus de produits électrotechniques. Il décrit l'utilisation de trois méthodes, à savoir ICP-OES, ICP-MS et AAS. Les échantillons sont digérés par des acides tels que l'acide chlorhydrique ou l'acide nitrique. Le plomb et le cadmium contenus dans les solutions ainsi obtenues sont déterminés par ICP-OES, par ICP-MS ou par AAS. Les procédures détaillées dépendent de la matrice ainsi que de la présence d'éléments particuliers; elles sont également décrites dans le présent article. Des procédures sont prévues pour des échantillons inconnus ainsi que pour les échantillons dont la composition qualitative a déjà été indiquée par des méthodes de détection.

Les procédures d'essai décrites dans le présent article sont destinées à donner le niveau le plus élevé d'exactitude et de justesse pour des concentrations de substances réglementées dans une plage, pour les méthodes ICP-OES et AAS, de 10 mg/kg pour le plomb et le cadmium, et, pour la méthode ICP-MS, de 0,1 mg/kg pour le plomb et le cadmium. Les procédures ne sont pas limitées aux concentrations plus élevées.

Il existe des limites et des risques découlant de l'étape de dissolution de l'échantillon. En premier lieu, il peut y avoir précipitation des éléments cibles ou d'autres éléments (risque de coprécipitation), auquel cas les résidus doivent être vérifiés séparément ou dissous selon une autre méthode, puis combinés à la solution d'échantillon d'essai. En second lieu, il peut y avoir évaporation de la solution d'échantillon du fait de réactions chimiques fortes, notamment lorsque des verres de montre sont utilisés pour couvrir le volume de réaction. Il est fortement conseillé d'utiliser un équipement approprié et évolué, c'est-à-dire un système de digestion aux micro-ondes. Cependant, si les experts peuvent s'assurer qu'elles conviennent, des solutions de remplacement simples peuvent être utilisées. Le présent article donne des informations détaillées à ce sujet.

Le paragraphe 9.7 résume les résultats de l'évaluation de la justesse, de l'exactitude et des LOD des méthodes.

Les travaux réalisés conformément à la présente norme impliquent l'utilisation de substances toxiques et dangereuses. Le présent article donne à cet égard des avertissements détaillés.

9.2 Appareillage, équipements et matériaux

Les éléments suivants doivent être utilisés pour l'analyse:

- a) ICP-OES: équipement consistant en un porte-échantillon, une torche à plasma, une chambre de pulvérisation, un nébuliseur, une unité optique, un détecteur, un dispositif de commande du système et de sortie de données.
- b) ICP-MS: équipement consistant en un porte-échantillon, une torche à plasma, une chambre de pulvérisation, un nébuliseur, une interface, une unité de séparation de masse, un dispositif de commande du système et de sortie de données.
- c) AAS: équipement consistant en un porte-échantillon, un système nébuliseur/brûleur avec tête de brûleur air/acétylène, des lampes à source de rayonnement, un détecteur et un système de traitement et de commande des données.
- d) Balance d'analyse d'une précision de mesure de 0,000 1 g.
- e) Matériel en verre: tout le matériel en verre doit être nettoyé à l'acide nitrique à une fraction massique de 10 % avant utilisation:
 - 1) Bêchers: par exemple d'une contenance de 100 ml, 200 ml, 500 ml, etc.;
 - 2) Flacons volumétriques: par exemple d'une contenance de 100 ml, 200 ml, 500 ml, etc.;

- 3) Pipettes: par exemple d'une contenance de 1 ml, 5 ml, 10 ml, 20 ml, etc.;
- 4) Verre de montre.
- f) Micropipettes: par exemple d'une contenance de 200 μ l, 500 μ l, 1 000 μ l, etc.
- g) Equipements en (poly)tétrafluoroéthylène (PTFE)/ résine d'alcane perfluoroalcoyl (PFA): tous les équipements doivent être nettoyés à l'acide nitrique à une fraction massique de 10 % avant utilisation:
 - a) Bêchers: par exemple d'une contenance de 100 ml, 200 ml, 500 ml, etc.;
 - b) Couvercles pour bêchers;
 - c) Flacons volumétriques: par exemple d'une contenance de 100 ml, 200 ml, 500 ml, etc.;
- h) Flacons volumétriques en polyéthylène haute densité: par exemple d'une contenance de 100 ml, 200 ml, 500 ml, etc. Le cas échéant, d'autres types d'équipements volumétriques d'une précision et d'une exactitude acceptables peuvent être utilisés en remplacement des flacons volumétriques.
- i) Conteneurs: pour la conservation de la solution étalon et de l'étalon.
Conteneurs en polyéthylène haute densité (PE-HD) ou bouteilles en PFA.
- j) Plaque chaude électrique ou bain de sable chauffé.
- k) Porte-échantillons résistant à l'acide fluorhydrique: Porte-échantillons dont la section d'insertion de l'échantillon et la torche ont été traitées pour résister à l'acide fluorhydrique.
- l) Gaz argon: gaz d'une pureté volumétrique supérieure à 99,99 %.
- m) Gaz acétylène: gaz d'une pureté volumétrique supérieure à 99,99 %.
- n) Filtre en papier.

9.3 Réactifs

Le réactif utilisé pour la détermination des éléments en traces doit être d'une pureté adéquate. La concentration de l'analyte ou de substances interférentes dans les réactifs et l'eau doit être négligeable par comparaison à la concentration la plus basse à déterminer.

Tous les réactifs servant à l'analyse par ICP-MS, y compris les acides ou les produits chimiques utilisés, doivent être d'un haut degré de pureté et la quantité totale des métaux en traces doit être inférieure à une fraction massique de 1×10^{-6} %.

- a) Eau: La qualité 1 spécifiée par l'ISO 3696 sert à la préparation et à la dilution de toutes les solutions d'échantillon.
- b) Acide nitrique: $\rho(\text{HNO}_3) = 1,40$ g/ml, à une fraction massique de 65 %, de qualité «métaux en traces».
- c) Acide nitrique: dilution (1:2): diluer 1 volume d'acide nitrique concentré (9.3 b) dans 2 volumes d'eau (9.3.a).
- d) Acide fluoroborique: HBF_4 à une fraction massique de 50 %, de qualité «métaux en traces».
- e) Peroxyde d'hydrogène: $\rho(\text{H}_2\text{O}_2) = 1,10$ g/ml, à une fraction massique de 30 %, de qualité «métaux en traces».
- f) Acide perchlorique: $\rho(\text{HClO}_4) = 1,67$ g/ml, à une fraction massique de 70 %, de qualité «métaux en traces».
- g) Acide phosphorique: $\rho(\text{H}_3\text{PO}_4) = 1,69$ g/ml, à une fraction massique supérieure à 85 %, de qualité «métaux en traces».
- h) Acide sulfurique: $\rho(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1,84$ g/ml, à une fraction massique de 95 %, de qualité «métaux en traces».
- i) Acide sulfurique: dilution (1:2): diluer 1 volume d'acide sulfurique concentré (9.3 h) dans 2 volumes d'eau (9.3.a).

- j) Acide fluorhydrique: $\rho(\text{HF}) = 1,18 \text{ g/ml}$, à une fraction massique de 40 %, de qualité «métaux en traces».
- k) Acide chlorhydrique: $\rho(\text{HCl}) = 1,16 \text{ g/ml}$, à une fraction massique de 37 %, de qualité «métaux en traces».
- l) Acide hydrobromique: $\rho(\text{HBr}) = 1,48 \text{ g/ml}$, à une fraction massique de 47 % à 49 %, de qualité «métaux en traces».
- m) Acide borique (HBO_3), à une fraction massique de 5 % (m/m) (50 mg/ml), de qualité «métaux en traces».
- n) Acide mélangé 1 (deux parties d'acide chlorhydrique (9.3.k), une partie d'acide nitrique (9.3.b) et deux parties d'eau (9.3.a)).
- o) Acide mélangé 2 (une partie d'acide nitrique (9.3.b) et trois parties d'acide fluorhydrique (9.3.j)).
- p) Acide mélangé 3 (trois parties d'acide chlorhydrique (9.3.k) et une partie d'acide nitrique (9.3.b)).
- q) Solution étalon à 1 000 mg/kg de Pb.
- r) Solution étalon à 1 000 mg/l de Cd.
- s) Solution étalon interne.

Les éléments étalons internes qui n'interfèrent pas avec l'élément cible sont utilisés. La présence de ces éléments étalons internes dans la solution d'échantillon doit également rester à des niveaux négligeables. Sc, In, Tb, Lu, Re, Rh, Bi et Y peuvent servir d'éléments étalons internes.

NOTE 1 La toxicité de chaque réactif utilisé dans cette méthode n'a pas été définie de manière précise; cependant, il convient que chaque composé chimique soit traité comme présentant un risque potentiel pour la santé. De ce point de vue, une exposition à ces produits chimiques au niveau le plus bas possible par tout moyen disponible est recommandée.

NOTE 2 Les méthodes de préparation impliquent l'emploi d'acides puissants corrosifs et causant des brûlures. Il convient de porter des vêtements et des gants de laboratoire, ainsi que des lunettes de sécurité, pour manipuler ces acides.

NOTE 3 L'acide nitrique dégage des fumées toxiques. Toujours effectuer la digestion, ainsi que l'addition d'acide aux échantillons (du fait du risque de dégagement de gaz toxiques) dans une armoire à fumées.

NOTE 4 Il convient de canaliser les gaz d'échappement du plasma par un système efficace d'extraction des fumées.

NOTE 5 Il convient de prendre des mesures spéciales de précaution avec l'acide fluorhydrique ou l'acide perchlorique (il est nécessaire de disposer d'une hotte spéciale du fait du risque d'explosion ainsi que d'un gel antidote HF (du gluconate de calcium à 2,5 % dans un gel soluble dans l'eau) de première urgence pour les brûlures HF de la peau).

9.4 Préparation des échantillons

9.4.1 Prise d'essai

1 g d'échantillon est mesuré précisément à 0,1 mg près et placé dans un bécher de verre ou, quand on utilise de l'acide fluorhydrique (9.3.j), un bécher en PTFE/PFA (9.2.g.1).

9.4.2 Préparation de la solution d'échantillon d'essai

La préparation d'une solution d'échantillon d'essai telle que décrite ici, ne couvre pas nécessairement tous les métaux et leurs composés. En général, la préparation d'une solution à l'acide chlorhydrique, à l'acide nitrique ou un mélange de ces derniers est recommandée. Si nécessaire, de l'acide perchlorique, de l'acide sulfurique, etc., doivent être ajoutés aux échantillons difficiles à dissoudre avec ces acides. Il faut garder à l'esprit que l'utilisation de l'acide sulfurique est critique pour la détermination du plomb à cause du risque de perte d'une partie de l'élément cible. Les échantillons doivent être dissous entièrement sans qu'il ne subsiste de résidus par un chauffage à hautes températures. Un échantillon peut également être dissous à l'acide phosphorique.

La dissolution de métaux ou plus particulièrement de mélanges de ces mêmes métaux dans des acides forts, génère toujours un risque de précipitation (par exemple Pb et Ba avec l'acide sulfurique, et Ag avec l'acide chlorhydrique. Al peut former des oxydes/oxyhydrates et similaires). Même si ces éléments ne sont pas couverts par la législation, il existe un risque de perte de l'élément cible par coprécipitation. Pour les besoins du présent article, il faut s'assurer qu'aucun élément cible n'est perdu dans la solution d'échantillon d'essai. Les restes éventuels doivent être vérifiés par une méthode différente pour déterminer s'ils contiennent des éléments cibles ou si les résidus, après dissolution acide, doivent être dissous complètement par d'autres méthodes (par exemple la fusion alcaline ou l'utilisation d'un récipient sous pression étanche à l'air). Les résidus ainsi traités sont alors combinés à la solution dissoute à l'acide puis soumis à la mesure.

a) Méthodes communes de digestion de l'échantillon

Un bécher en verre (9.2.e.1) contenant l'échantillon est couvert d'un verre de montre (9.2.e.4). Ajouter 20 ml d'acide mélangé 1 (9.3.n) et chauffer le bécher jusqu'à la dissolution de l'échantillon. Laisser refroidir à la température ambiante et rincer la face inférieure du verre de montre et la paroi intérieure du bécher à l'eau (9.3.a). Transférer la solution dans un flacon volumétrique de 100 ml (9.2.e.2) et compléter avec de l'eau (9.3.a) jusqu'au repère. La solution obtenue est la solution d'échantillon concentrée. Diluer cette solution avec de l'eau (9.3.a) au niveau de concentration approprié pour chaque appareil de mesure. Si nécessaire, ajouter une solution étalon interne (9.3.s), par exemple contenant du Rh, avant de remplir le flacon (9.2.e.2) avec de l'eau (9.3.a). Le type d'élément et la quantité correspondante dépendent de la méthode d'analyse sélectionnée. Les moyens particuliers de dilution doivent être pris en compte dans le calcul des résultats. La dilution et l'addition de l'étalon interne doivent être documentées dans le rapport d'essai.

b) Si l'échantillon contient du Zr, Hf, Ti, Ta, Nb ou W

Recouvrir (9.2.g.2) un bécher en PTFE/PFA (9.2.g.1) contenant l'échantillon. Ajouter 20 ml d'acide mélange 2 (9.3.o) et chauffer le bécher (9.2.g.1) jusqu'à ce que l'échantillon soit dissous. Après refroidissement à la température ambiante, la face inférieure du couvercle (9.2.g.2) et la paroi intérieure du bécher (9.2.g.1) sont rincées à l'eau (9.3.a), et le couvercle (9.2.g.2) est enlevé. Transférer la solution dans un flacon volumétrique de 100 ml (9.2.g.3) et compléter avec de l'eau jusqu'au repère. La solution obtenue est la solution d'échantillon concentrée. Diluer cette solution avec de l'eau (9.3.a) au niveau de concentration approprié pour chaque appareil de mesure. Si nécessaire, ajouter une solution étalon interne (9.3.s), par exemple contenant du Rh, avant de remplir le flacon (9.2.g.3) avec de l'eau (9.3.a) jusqu'au repère. Du fait de l'utilisation de l'acide fluorhydrique (9.3.j), la solution étalon interne (9.3.s) ne doit contenir aucun élément de terre rare. L'élément choisi et la quantité correspondante dépendent de la méthode d'analyse sélectionnée. Les moyens particuliers de dilution doivent être pris en compte dans le calcul des résultats. La dilution et l'addition de l'étalon interne doivent être documentées dans le rapport d'essai.

c) Si l'échantillon contient de l'étain

– Recouvrir un bécher (9.2.e.1) contenant l'échantillon. Ajouter 10 ml d'acide mélangé 3 (9.3.p) en petites quantités. Lorsque la réaction violente est terminée, le bécher (9.2.e.1) est chauffé lentement jusqu'à dissolution complète de l'échantillon. Après refroidissement, la face inférieure du couvercle et la paroi intérieure du bécher (9.2.e.1) sont rincées à l'eau (9.3.a) et le couvercle est enlevé. 10 ml d'acide sulfurique (9.3.h) sont ajoutés et le bécher (9.3.e.1) est chauffé jusqu'à ce que des fumées blanches de SO_3 soient générées. Après un refroidissement de plusieurs minutes, 20 ml d'acide bromhydrique (9.3.l) sont ajoutés et le bécher (9.2.e.1) est chauffé jusqu'à ce que des fumées blanches apparaissent. Ce processus se répète trois fois. Après refroidissement à la température ambiante, 10 ml d'acide nitrique (9.3.b) sont ajoutés pour dissoudre les sels. Transférer la solution dans un flacon volumétrique de 100 ml (9.2.e.2) et le remplir ensuite avec de l'eau (9.3.a) jusqu'au repère. La solution obtenue est la solution d'échantillon concentrée. Diluer cette solution avec de l'eau (9.3.a) au niveau de concentration approprié pour chaque appareil de mesure. Si nécessaire, ajouter au flacon (9.2.e.2) une solution étalon interne (9.3.s), par exemple contenant du Rh, avant de le remplir avec de l'eau (9.3.a). L'élément choisi et la quantité correspondante dépendent de la méthode d'analyse

sélectionnée. Les moyens particuliers de dilution doivent être pris en compte dans le calcul des résultats. La dilution et l'addition de la solution étalon interne (9.3.s) doivent être documentées dans le rapport d'essai.

- Autrement, 1 g d'échantillon est dissous par addition de 40 ml d'eau (9.3.a), de 12 ml d'acide nitrique (9.3.b) et 6 ml d'acide fluoroborique fraîchement préparé (9.3.d) (200 ml de d'acide fluorhydrique (9.3.j) à une fraction massique de 40 % avec 75 g d'acide borique (9.3.m). Un bécher en PTFE/PFA (9.2.g.1) et un flacon volumétrique (9.2.g.3) en polyéthylène haute densité ou en PTFE/PFA doivent être utilisés.
- d) Les éventuels résidus d'échantillon sont séparés par une centrifugeuse ou un filtre. Les résidus doivent être soumis à l'essai par des mesures appropriées (par exemple XRF) afin de confirmer l'absence d'éléments cibles.

NOTE Si une grande quantité d'étain se trouve en présence d'argent, c'est-à-dire une soudure sans étain, il est recommandé que l'acide de dissolution soit l'acide chlorhydrique suivi d'une addition de 10 ml de peroxyde d'hydrogène jusqu'à digestion complète.

9.5 Préparation du réactif témoin de laboratoire

Une procédure identique à celle de la préparation de la solution d'échantillon d'essai est exécutée de manière concomitante mais sans l'échantillon.

9.6 Procédure d'essai

La méthode de la courbe d'étalonnage est utilisée pour la mesure de l'échantillon. Si la composition de ce dernier peut être clairement identifiée, la méthode d'étalonnage (méthode d'appariement à la matrice) est utilisée. Si elle est inconnue, la méthode de l'étalon interne (méthode de comparaison de l'intensité) est utilisée (ne convient pas à la méthode AAS). Si nécessaire, la méthode des additions d'étalons peut également être utilisée.

NOTE 1 Il est recommandé d'utiliser la méthode d'appariement à la matrice pour les échantillons à concentration élevée de la matrice. Dans tous les cas, il convient d'ajuster l'acide à la concentration de l'échantillon.

NOTE 2 Si l'effet de la matrice ne peut pas être corrigé, il convient d'éliminer les éléments de ladite matrice par une méthode de séparation comme l'extraction au solvant, l'échange d'ions, etc.

9.6.1 Préparation de l'étalon

Deux méthodes différentes sont utilisées pour la préparation de l'étalon.

a) Méthode d'étalonnage (méthode d'appariement à la matrice)

- Après dilution progressive de chacune des solutions d'éléments étalons, les solutions étalons diluées contenant de 0 µg à 100 µg de chaque élément sont transférées dans un flacon volumétrique de 100 ml (9.2.e.2). La méthode d'appariement à la matrice nécessite un appariement étroit à la matrice de la solution étalon. Dans ce cas, les éléments de la matrice doivent être connus (par exemple sur la base de spécifications documentées précédentes) ou avoir été évalués par des opérations précédentes de détection XRF. Chaque réactif et la matrice (éléments) sont ajoutés afin de préparer des étalons mixtes d'étalonnage équivalents à ceux de la solution d'échantillon.
- En cas d'emploi de l'acide fluorhydrique, un bécher en PTFE/PFA (9.2.g.1) et un flacon volumétrique en polyéthylène haute densité ou en PTFE/PFA (9.2.g.3) doivent être utilisés.

b) Méthode de l'étalon interne

- Afin d'obtenir des concentrations équivalentes à celle de la solution d'échantillon, des réactifs et des éléments étalons internes sont ajoutés pour préparer des solutions mixtes d'étalonnage.
- En cas d'emploi de l'acide fluorhydrique, un bécher en PTFE/PFA et un flacon volumétrique en polyéthylène haute densité ou en PTFE/PFA doivent être utilisés.

9.6.2 Mesure de l'étalon

La mesure de l'étalon dépend de l'équipement utilisé.

a) ICP-OES

- Dans la méthode ICP-OES, une partie des solutions d'étalonnage préparées, comme décrit en 9.6.1, est introduite dans le plasma d'argon dans des conditions optimisées afin de mesurer les intensités des raies spectrales atomiques de chaque élément cible. Dans la méthode d'étalonnage (méthode d'appariement à la matrice), la courbe montrant la relation entre les intensités des raies spectrales atomiques et la concentration sert de courbe d'étalonnage. Dans la méthode de l'étalon interne, la courbe montrant la relation entre le taux d'intensité et la concentration de l'élément cible par rapport à l'élément étalon interne sert de courbe d'étalonnage.
- Un porte-échantillon et une torche résistant à l'acide fluorhydrique doivent être utilisés si la solution contient de l'acide fluorhydrique.
- La longueur d'onde recommandée est sélectionnée à partir des raies spectrales de chaque élément. La longueur d'onde doit être choisie eu égard aux longueurs d'onde de mesure typiques pour les éléments données dans le Tableau G.1. La limite de détection, la précision des mesures, etc. doivent faire l'objet d'une étude approfondie. S'il y a interférence de substances coprésentes, une longueur d'onde qui n'interfère pas avec la plage d'étalonnage doit être choisie, ou des ajustements de l'intensité d'interférence doivent être effectués à l'aide d'une méthode appropriée.

b) ICP-MS

- Le spectromètre ICP-MS est préparé pour la quantification. Une partie de la solution obtenue conformément au 9.6.1 est nébulisée dans le plasma d'argon à travers le porte-échantillon. Un porte-échantillon résistant à l'acide fluorhydrique doit être utilisé lorsque la solution contient ledit acide. Les valeurs m/z des éléments cibles et de l'élément étalon interne sont relevées et le rapport entre la valeur relevée de l'élément cible et celle de l'élément étalon interne fait l'objet d'un calcul. Les rapports masse/charge peuvent être définis sur la base des nombres de masse mesurés, présentés dans le Tableau G.2.

c) AAS

- Des prises de solutions d'étalonnage, préparées comme décrit en 9.6.1, sont introduites dans la flamme air-acétylène dans l'AAS dans des conditions optimisées afin de mesurer l'absorption de la longueur d'onde de chaque élément cible. Dans la méthode d'étalonnage (méthode d'appariement à la matrice), la courbe montrant la relation entre l'absorption de la longueur d'onde et la concentration sert de courbe d'étalonnage.
- Les longueurs d'onde doivent être choisies eu égard aux longueurs d'onde de mesure typiques pour les éléments présentées dans le Tableau G.3. En cas d'interférence de substances coprésentes, une longueur d'onde qui n'interfère pas avec la plage d'étalonnage doit être utilisée, ou des ajustements de l'intensité d'interférence doivent être effectués à l'aide d'une méthode appropriée.

Une courbe de régression linéaire avec une corrélation (R^2) non inférieure à $<0,998$ doit être utilisée pour l'étalonnage initial. Dans le cas où le résultat obtenu avec l'étalon de vérification (par exemple substance étalon, étalon, etc.) diffère de la valeur prévue de plus de 20 %, l'étalonnage et tous les échantillons de la séquence doivent faire l'objet d'une nouvelle mesure.

9.6.3 Mesure de l'échantillon

Une fois la courbe d'étalonnage développée, le témoin d'étalonnage et la solution d'échantillon sont mesurés. Si la concentration d'échantillon se situe au-dessus de la plage de la courbe de concentration, la solution doit être diluée pour revenir dans cette plage assurant une acidification appropriée des étalons et mesurée une nouvelle fois.

La justesse des mesures est vérifiée au moyen de substances étalons, de solutions d'étalonnage, etc. à intervalles réguliers (par exemple tous les 10 échantillons). Si nécessaire, une courbe d'étalonnage doit être créée à nouveau.

NOTE Si l'échantillon est dilué à la plage d'étalonnage, il convient de s'assurer que la concentration d'étalons internes dans la solution d'échantillon diluée est ajustée à la solution étalon.

9.6.4 Calcul

Les lectures du spectromètre pour chaque échantillon, obtenues en 9.6.3, et la courbe d'étalonnage créée en 9.6.2, servent à déterminer l'intensité spectrale nette de chaque élément cible. La teneur de chaque élément dans l'échantillon est calculée par l'équation suivante:

$$c = \frac{(A_1 - A_2)}{m} \times V \quad (4)$$

où

c est la concentration de plomb ou de cadmium dans l'échantillon, en $\mu\text{g/g}$;

A_1 est la concentration de plomb ou de cadmium dans la solution d'échantillon, en mg/l ;

A_2 est la concentration de plomb ou de cadmium dans le réactif témoin de laboratoire, en mg/l ;

V est le volume total de la solution d'échantillon, en ml , qui dépend de la série particulière de dilutions effectuées;

m est la quantité mesurée d'échantillon, en g .

9.7 Evaluation de la méthode

Comme décrit de manière détaillée au 4.5, les limites de détection des instruments sont en général relativement faibles (parfois très faibles), mais elles ne représentent pas les LOD vraies d'une méthodologie appliquée à l'analyse d'échantillons réels. Pour aller au-delà de cette approche quelque peu théorique (voir 9.1), le GT3 du CE 111 de la CEI a réalisé plusieurs études internationales inter-laboratoires (IIS).

Dans le cadre de ces études, des MRC, des échantillons fournis de composition connue, ainsi que des échantillons réels, ont été analysés conformément aux procédures d'analyse décrites dans le présent article. Le résultat a donné un aperçu des LOD réalisables dans la pratique et, ce qui est encore plus important, de la justesse et de l'exactitude des procédures d'analyse lorsqu'elles sont utilisées dans des opérations de routine.

Pour les méthodes décrites dans le présent article, l'étude IIS a révélé que la précision et la justesse s'inscrivaient toujours dans des valeurs de $\pm 20\%$ pour des quantités de plomb et de cadmium supérieures à 10 mg/kg , indépendamment de la méthode ou des équipements particuliers choisis.

10 Détermination du plomb et du cadmium dans les produits électroniques par ICP-OES, ICP-MS et AAS

10.1 Présentation

Le présent article spécifie la procédure de détermination du plomb (Pb) et du cadmium (Cd) dans les produits électroniques (cartes à circuits imprimés ou composants uniques provenant d'équipements électriques et électroniques). Trois méthodes sont décrites (ICP-OES, ICP-MS et AAS) ainsi que plusieurs procédures de préparation de la solution d'échantillon, à partir de laquelle les experts peuvent choisir la méthode d'analyse la plus appropriée.

Les échantillons à analyser doivent être disponibles sous forme de produits électroniques broyés comme décrit dans l'Article 5. La poudre est digérée à l'eau régale ou potentialisée aux micro-ondes au HNO_3 , HBF_4 , H_2O_2 , et au HCl . La procédure de digestion à l'eau régale est réalisée conformément à la norme ISO 5961. Les éléments plomb et cadmium, dans la solution de digestion, sont soit déterminés simultanément par ICP-OES ou par ICP-MS, soit déterminés l'un après l'autre par AAS.

NOTE Si la pureté du HBF_4 disponible n'est pas suffisante, du HF peut être utilisé à la place.

Les procédures d'essai décrites dans le présent article sont destinées à donner le niveau le plus élevé d'exactitude et de justesse pour des concentrations de substances réglementées dans une plage, pour les méthodes ICP-OES et AAS, de 10 mg/kg pour le plomb et le cadmium, et, pour la méthode ICP-MS, de 0,1 mg/kg pour le plomb et le cadmium. Les procédures ne sont pas limitées aux concentrations plus élevées.

Les analyses par ICP-OES, ICP-MS ou AAS permettent généralement de déterminer les éléments cibles avec une grande justesse (incertitude dans la plage basse des pourcentages) et/ou une grande sensibilité. Les avantages de ces méthodes peuvent être limités lorsque les échantillons à analyser ont une composition très complexe. Les échantillons doivent être détruits par des moyens mécaniques appropriés avant la digestion chimique. La taille correcte des particules en fonction de la quantité de matériau initial est essentielle. Pour satisfaire aux exigences minimales d'une analyse correcte, la taille maximale des particules et les quantités minimales d'échantillon sont précisées dans le présent article. Il est très probable que l'application des méthodes de digestion laisse des résidus solides. Il faut s'assurer (par exemple par XRF) que les résidus ne contiennent pas d'éléments cibles en quantités considérables. Dans ce cas, ils doivent être dissous au moyen de différentes méthodes chimiques en combinaison avec la solution d'échantillon d'essai. La présente norme recommande fortement l'emploi d'un équipement évolué, par exemple un système de digestion aux micro-ondes pour ce qui concerne les méthodes de digestion. Néanmoins, si l'utilisateur peut garantir l'adéquation d'une approche plus simple, il peut l'appliquer. Toute dérogation aux procédures décrites doit être évaluée et documentée dans le rapport d'essai.

Pour les résultats d'évaluation de la justesse, de l'exactitude et des LOD des méthodes décrits dans le présent article, voir 10.6.

Les travaux décrits dans la présente norme impliquent l'utilisation de substances toxiques et dangereuses. Des avertissements détaillés sont fournis.

10.2 Appareillage, équipements et matériaux

Les éléments suivants doivent être utilisés pour l'analyse:

- a) ICP-OES: équipement consistant en un porte-échantillon, une torche à plasma, une chambre de pulvérisation, un nébuliseur, une unité optique, un détecteur, un dispositif de commande du système et un dispositif de sortie de données.
- b) ICP-MS: équipement consistant en un porte-échantillon, une torche à plasma, une chambre de pulvérisation, un nébuliseur, une interface, une unité de séparation de masse, un dispositif de commande du système et un dispositif de sortie de données.
- c) AAS: équipement consistant en un porte-échantillon, un système nébuliseur/brûleur avec tête de brûleur air/acétylène, des lampes à source de rayonnement, un détecteur et un système de traitement de données et un système de commande.
- d) Porte-échantillons résistant à l'acide fluorhydrique: porte-échantillon dont la section d'insertion de l'échantillon et la torche sont traitées pour résister à l'acide fluorhydrique.
- e) Gaz argon: gaz d'une pureté volumétrique supérieure à 99,99 %.
- f) Gaz acétylène: gaz d'une pureté volumétrique supérieure à 99,99 %.
- g) Digestion à l'eau régale: appareil de digestion, équipé d'un microcontrôleur de temps et de température, d'un thermostat du bloc de chauffage, d'un jeu de récipients, chacun étant équipé de réfrigérants à reflux et de récipients d'absorption.

- h) Système de digestion aux micro-ondes: système de préparation des échantillons aux micro-ondes équipé d'un porte-échantillon et de récipients en polytétrafluoroéthylène/tétrafluoroéthylène modifié (PTFE/TFM) à haute pression, ou en résine polyester de perfluoroalcoyl/tétrafluoroéthylène modifié (PFA/TFM), ou d'autres récipients en fluorocarbure d'une capacité de 40 ml.

NOTE Il existe de nombreuses recommandations de sécurité et de fonctionnement spécifiques au modèle et au fabricant du matériel à micro-ondes utilisé dans les différents laboratoires. L'analyste est prié de consulter le manuel de l'équipement particulier, le fabricant et la documentation pour utiliser correctement et en toute sécurité l'équipement à micro-ondes et les récipients.

- i) Balance d'analyse d'une précision de mesure de 0,000 1 g.
- j) Matériel en verre: tout le matériel en verre doit être nettoyé à l'acide nitrique (10.3.h) à une fraction massique de 10 % avant utilisation.
- 1) Bêchers: par exemple d'une contenance de 100 ml, 200 ml, 500 ml, etc.
 - 2) Flacons volumétriques: par exemple d'une contenance de 100 ml, 200 ml, 500 ml, etc.
Le cas échéant, d'autres types d'équipements volumétriques d'une précision et d'une exactitude acceptables peuvent être utilisés en remplacement des flacons volumétriques.
 - 3) Pipettes: par exemple d'une contenance de 1 ml, 5 ml, 10 ml, 20 ml, etc.
 - 4) Cylindre gradué: par exemple d'une contenance de 1 ml, 5 ml, 50 ml etc.
 - 5) Verre de montre.
- k) Micropipettes: par exemple d'une contenance de 200 µl, 500 µl, 1 000 µl, etc.
- l) Conteneurs en PTFE/PFA: tous les équipements doivent être nettoyés à l'acide nitrique (10.3.h) à une fraction massique de 10 % avant utilisation.
- 1) Bêchers: par exemple d'une contenance de 100 ml, 200 ml, 500 ml, etc.
 - 2) Flacons volumétriques: par exemple d'une contenance de 100 ml, 200 ml, etc.
- m) Conteneurs: pour la conservation de la solution étalon et de l'étalon.
Les conteneurs en polyéthylène à haute densité doivent servir à la mesure ordinaire de la concentration d'éléments. Des conteneurs en résine polyester perfluoroalcoyl (PFA) ou en plastique de perfluoro(éthylène-propylène) (FEP) doivent être utilisés pour déterminer le niveau des ultratracés. Dans les deux cas, l'utilisateur doit confirmer que le conteneur choisi convient.
- n) Plaque chauffante électrique ou bain de sable chauffé.
- o) Récipient de digestion aux micro-ondes: par exemple d'une contenance de 40 ml, 100 ml, etc.
- p) Filtre en microfibre de verre (verre au borosilicate), taille des pores de 0,45 µm, et une coupelle filtre adéquate.

10.3 Réactifs

Le réactif utilisé pour la détermination des éléments en traces doit être d'une pureté adéquate. La concentration de l'analyte ou de substances interférentes dans les réactifs et l'eau doit être négligeable par comparaison à la concentration la plus basse à déterminer.

Tous les réactifs servant à l'analyse par ICP-MS, y compris les acides ou les produits chimiques utilisés, doivent avoir un haut degré de pureté: la quantité totale des métaux en traces doit être inférieure à une fraction massique de 1×10^{-6} %.

- a) Eau: La qualité 1, telle que spécifiée par l'ISO 3696, doit être utilisée pour la préparation et la dilution de toutes les solutions d'échantillon.
- b) Acide chlorhydrique: $\rho(\text{HCl}) = 1,16 \text{ g/ml}$, à une fraction massique de 37 %, de qualité «métaux en traces».
- c) Acide chlorhydrique: dilution (1:2): une partie d'acide chlorhydrique (10.3.b) diluée dans deux parties d'eau (10.3.a), de qualité «métaux en traces».

- d) Acide chlorhydrique, à une fraction massique de 5 %, de qualité «métaux en traces».
- e) Acide chlorhydrique, à une fraction massique de 10 %, de qualité «métaux en traces».
- f) Acide nitrique: $\rho(\text{HNO}_3) = 1,40 \text{ g/ml}$, à une fraction massique de 65 %, de qualité «métaux en traces».
- g) Acide nitrique, 0,5 mol/l, de qualité «métaux en traces».
- h) Acide nitrique, à une fraction massique de 10 %, de qualité «métaux en trace».
- i) Acide mélangé (3 parties d'acide chlorhydrique (10.3.b) et une partie d'acide nitrique (10.3. f)).
- j) Acide fluoroborique: HBF_4 à une fraction massique de 50 %, de qualité «métaux en trace».
- k) Peroxyde d'hydrogène H_2O_2 à une fraction massique de 30 %, de qualité «métaux en trace».
- l) Solution étalon à 1 000 mg/kg de plomb.
- m) Solution étalon à 1 000 mg/kg de cadmium.
- n) Solution étalon à 10 000 mg/kg de cuivre.
- o) Solution étalon à 10 000 mg/kg de fer.
- p) Solution étalon interne: des éléments étalons internes qui n'interfèrent pas avec l'élément cible doivent être utilisés. Par ailleurs, la présence de ces éléments étalons internes dans la solution d'échantillon doit rester à un niveau négligeable. Sc, In, Tb, Lu, Re, Rh, Bi et Y peuvent servir d'éléments étalons internes pour cette spectrométrie spécifique.

NOTE 1 La toxicité de chaque réactif utilisé dans cette méthode n'a pas été définie de manière précise; cependant, il convient que chaque composé chimique soit traité comme présentant un risque potentiel pour la santé. De ce point de vue, une exposition à ces produits chimiques au niveau le plus bas possible par tout moyen disponible est recommandée.

NOTE 2 Les méthodes de préparation impliquent l'emploi d'acides puissants corrosifs et causant des brûlures. Il convient de porter des vêtements et des gants de laboratoire, ainsi que des lunettes de sécurité, pour manipuler ces acides.

NOTE 3 L'acide nitrique dégage des fumées toxiques. Toujours effectuer la digestion, ainsi que l'addition d'acide aux échantillons (du fait du risque de dégagement de gaz toxiques) dans une armoire à fumées.

NOTE 4 Il convient de canaliser les gaz d'échappement du plasma par un système efficace d'extraction des fumées.

NOTE 5 Il convient de prendre des mesures spéciales de précaution avec l'acide fluorhydrique ou l'acide perchlorique (il est nécessaire de disposer d'une hotte spéciale du fait du risque d'explosion ainsi que d'un gel antidote HF (du gluconate de calcium à 2,5 % dans un gel soluble dans l'eau) de première urgence pour les brûlures HF de la peau).

10.4 Préparation des échantillons

La préparation d'une solution d'échantillon d'essai telle que décrite ici, ne couvre pas nécessairement tous les produits électroniques et leurs composés. En général, la préparation d'une solution à l'acide chlorhydrique, à l'acide nitrique ou un mélange de ces derniers est recommandée. Des acides HClO_4 , H_2SO_4 , etc. doivent être ajoutés si nécessaire aux échantillons difficilement solubles dans l'acide chlorhydrique et l'acide nitrique. Garder à l'esprit que l'utilisation de l'acide sulfurique est critique pour la détermination du plomb à cause du risque de perte d'une partie de l'élément cible. Les échantillons doivent être dissous entièrement sans qu'il ne subsiste de résidus par un chauffage à hautes températures.

La dissolution de métaux ou plus particulièrement de mélanges de ces mêmes métaux dans des acides forts, génère toujours un risque de précipitation (par exemple le Pb et le Ba dans l'acide sulfurique, l'argent dans l'acide chlorhydrique et l'aluminium peuvent former des oxydes/oxyhydrates et similaires). Bien que ces éléments ne soient souvent pas couverts par la législation, il existe un risque de perte de l'élément cible par coprecipitation. Pour le présent article, il faut s'assurer qu'aucun élément cible n'est perdu dans la solution d'échantillon d'essai. Les résidus éventuels doivent être vérifiés par une méthode différente

pour déterminer s'ils contiennent des éléments cibles ou si les résidus, après dissolution acide, doivent être complètement dissous par d'autres méthodes (par exemple fusion alcaline ou utilisation d'un récipient sous pression étanche à l'air). Les résidus ainsi traités sont alors combinés à la solution dissoute à l'acide et la procédure de mesure est effectuée.

10.4.1 Prise d'essai

Les diverses procédures d'analyse pouvant être utilisées en remplacement conformément au présent article exigent des quantités différentes d'échantillon pour obtenir des résultats de la qualité requise. Dans le cas de produits électroniques, l'échantillon doit d'abord être détruit mécaniquement par des moyens appropriés (par exemple meulage, broyage, découpe) avant de démarrer la digestion chimique de la poudre. Pour s'assurer, à cette étape, que l'échantillon prélevé est représentatif, une certaine grosseur de particule est préconisée en fonction de la quantité initiale d'échantillon (voir norme correspondante de préparation des échantillons). Les solutions concentrées résultantes peuvent être directement utilisées avec les méthodes ICP-OES ou AAS ou être diluées pour être utilisées avec la méthode ICP-MS.

10.4.2 Digestion à l'eau régale

Environ 2 g d'échantillon broyé (grosseur maximale de grain: 250 μm) sont pesés dans le récipient de réaction et 22,5 ml de HCl (10.3.b) et 7,5 ml de HNO₃ (10.3.f) sont ajoutés. Le récipient est muni d'un réfrigérant à reflux et d'une cellule d'absorption contenant 10 ml de HNO₃ (10.3.g) à 0,5 mol/l. Un programme de chauffage est ensuite lancé afin de digérer les échantillons pendant 12 h à la température ambiante, puis pendant 2 h à 120 °C. Après refroidissement à la température ambiante, le contenu du tube d'absorption est placé dans le récipient de réaction, l'échantillon est filtré à travers un filtre en microfibrilles de verre de 0,45 μm (10.2.p) et le résidu solide est lavé quatre fois dans 15 ml de HCl (10.3.d) à une fraction massique de 5 %. La solution obtenue est transvasée dans un flacon volumétrique de 250 ml (10.2.j.2) et complétée jusqu'au repère avec du HCl (10.3.d) à une fraction massique de 5 %.

La solution obtenue est la solution d'échantillon concentrée. Cette solution peut être diluée à l'eau au niveau de concentration requis pour chaque appareil de mesure. Si un étalon interne est utilisé, il doit être ajouté avant le remplissage de complément. Pour un volume final de 100 ml, un étalon interne de 1 000 μl pour les méthodes ICP-OES et ICP-MS (après une phase de dilution à 1:1 000) doit être ajouté.

Les résidus éventuels d'échantillons présents sur le filtre doivent être vérifiés par des mesures adaptées (par exemple XRF) afin de confirmer l'absence d'éléments cibles.

Si le laboratoire ne dispose pas de l'équipement recommandé décrit ci-dessus, il a la possibilité de recourir à une approche plus simple si l'utilisateur est en mesure d'assurer son adéquation. Les divergences par rapport à la procédure décrite ci-dessus doivent être évaluées et documentées dans le rapport d'essai. Cette approche simple peut être basée sur la procédure suivante: Recouvrir d'un verre de montre (10.2.j.5) un bécher en verre (10.2.j.1) contenant l'échantillon. Ajouter de l'acide mélangé (10.3.i) et chauffer le bécher (10.2.j.1) pendant 2 h à 120 °C, puis le laisser reposer pendant 12 h à la température ambiante. La face inférieure du verre de montre (10.2.j.5) et la paroi intérieure du bécher (10.2.j.1) sont rincées à l'eau (10.3.a), et le verre de montre (10.2.j.5) est enlevé. Après refroidissement, l'échantillon est filtré à travers un filtre en microfibrilles de verre de 0,45 μm (10.2.p). Les résidus sont rincés dans de l'acide chlorhydrique (10.3.d) à une fraction massique de 5 %. La solution obtenue est transvasée dans un flacon volumétrique (10.2.j.2) et complétée jusqu'au repère avec de l'eau (10.3.a). La solution résultante est utilisée pour les autres mesures.

10.4.3 Digestion aux micro-ondes

200 mg d'échantillon broyé (grosseur maximale de grain: 250 μm) sont pesés dans un récipient en PTFE/TFM, en PTFE/PFA ou dans tout récipient en fluorocarbure (10.2.l). 4 ml de HNO₃ (10.3.f), 2 ml de HBF₄ (10.3.j), 1 ml de H₂O₂ (10.2.k) et 1 ml d'eau (10.3.a) sont ajoutés. Les récipients sont agités soigneusement pendant environ 10 s, avant d'être obturés,

pour permettre l'échappement des gaz immédiatement formés. L'échantillon est alors digéré dans un four à micro-ondes (10.2.h) suivant un programme de digestion spécifié par avance. Pendant la première phase de la digestion (étape A), des composants organiques comme le chlorure de polyvinyle, ainsi que certains éléments métalliques, sont dissous.

NOTE 1 Si la pureté du HBF_4 disponible n'est pas suffisante, du HF peut être utilisé à la place.

Le récipient est ouvert après refroidissement à la température ambiante (temps approximatif requis: 1 h) et 4 ml de HCl (10.3.b) sont ajoutés. Après nouvelle obturation du récipient, d'autres éléments sont dissous dans le HCl (10.3.b) au cours d'une seconde phase de digestion potentialisée aux micro-ondes (étape B). Un exemple de programme approprié de digestion aux micro-ondes (étapes A et B) est donné dans le Tableau H.1.

Après refroidissement du récipient à la température ambiante (temps approximatif requis: 1 h), ce dernier est ouvert et la solution est filtrée à travers un filtre en microfibrilles de verre (10.2.p) dans un flacon de 25 ml (10.2.j.2), puis lavée et complétée jusqu'au repère avec du HCl (10.3 d) à une fraction massique de 5 %. Les résidus éventuels d'échantillons présents sur le filtre doivent être vérifiés par des mesures adaptées (par exemple XRF) afin de confirmer l'absence d'éléments cibles.

La procédure décrite ci-dessus fournit les exigences minimales applicables au système de digestion aux micro-ondes. Il est fortement recommandé d'effectuer l'analyse en double ou en triple pour chaque échantillon d'une même session.

NOTE 2 Il est fortement recommandé de ne pas peser plus de 200 mg d'échantillon broyé dans le récipient de digestion. Les produits électroniques en poudre combinés à des mélanges d'acide nitrique (HNO_3), de tétrafluoroborate (HBF_4), de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et d'acide chlorhydrique (HCl) peuvent réagir rapidement et violemment et former un gaz (CO_2 , NO_x , etc.). Ceci fait augmenter la pression dans le récipient fermé. Du fait de ce développement soudain de la pression, le système de sécurité du four à micro-ondes peut réagir et ouvrir le récipient. Des éléments cibles peuvent alors être perdus et, dans le cas le plus défavorable, une explosion risque de se produire.

NOTE 3 Peser les mêmes quantités des mêmes types d'échantillon pour les analyses en double ou en triple lors d'une même session.

Dans les cas où une quantité d'échantillon supérieure à 200 mg est nécessaire pour obtenir une portion représentative de l'équipement à soumettre à l'essai, utiliser la procédure suivante. Diviser l'échantillon en portions de masses approximativement égales. Peser chaque portion dans un récipient de digestion distinct, suivre la procédure de digestion avec chaque récipient et combiner les solutions de digestion obtenues.

EXEMPLE Pour la digestion d'une carte à circuits imprimés, une quantité minimale d'échantillon de 1,2 g est nécessaire. Il convient par conséquent de peser 6×200 mg d'échantillon broyé dans six récipients. Après refroidissement, à la fin de l'étape B aux micro-ondes, les récipients sont ouverts, les solutions sont combinées par un filtrage à travers un filtre en microfibrilles de verre de $0,45 \mu\text{m}$ (10.2.p) dans un flacon volumétrique de 100 ml (10.2.j.2), puis lavées, et le flacon est complété jusqu'au repère avec du HCl (10.3.d) à une fraction massique de 5 %.

Les résidus éventuels d'échantillons présents sur le filtre doivent être vérifiés par des mesures adaptées (par exemple XRF) afin de confirmer l'absence d'éléments cibles.

10.5 Procédure d'essai

La méthode de la courbe d'étalonnage est utilisée pour la mesure de l'échantillon. Pour les méthodes d'analyse définies dans le présent article, les produits électroniques (cartes à circuits imprimés, composants séparés) constituent des échantillons à matrice complexe, même après préparation des échantillons. Après digestion (eau régale ou micro-ondes), les solutions présentent, par exemple, des concentrations élevées de cuivre, fer, etc. Si la composition de l'échantillon peut être identifiée clairement, la méthode d'étalonnage (méthode d'appariement à la matrice) est utilisée pour les méthodes ICP-OES et AAS. La méthode de l'étalon interne (méthode de comparaison des intensités) est recommandée pour la méthode ICP-MS.

NOTE 1 La méthode des additions d'étalons peut être utilisée pour accroître la fiabilité de la méthode d'essai.

NOTE 2 Si l'effet de la matrice ne peut pas être corrigé, il convient d'éliminer les éléments de ladite matrice par une méthode de séparation comme l'extraction au solvant, l'échange d'ions, etc.

10.5.1 Préparation d'une solution d'étalonnage

Deux méthodes différentes sont utilisées pour la préparation d'une solution d'étalonnage.

a) Méthode d'étalonnage (méthode d'appariement à la matrice)

- Après dilution progressive de chacune des solutions d'éléments étalons, les solutions étalons diluées contenant de 0 µg à 100 µg de chaque élément sont transférées dans des flacons volumétriques de 100 ml (10.2.j.2). La méthode d'appariement à la matrice nécessite un appariement étroit à la matrice de la solution étalon. Les éléments de la matrice sont identifiés par une détection XRF préalable. Afin d'obtenir une concentration équivalente à celle de la solution d'échantillon, des réactifs et des éléments de matrice sont ajoutés pour préparer des solutions mixtes d'étalonnage. La solution résultante est la solution mixte d'étalonnage.
- Un flacon volumétrique en polyéthylène haute densité ou en PTFE/PFA (10.2.i.2) doit être utilisé avec le tétrafluoroborate.

b) Méthode de l'étalon interne

- Afin d'obtenir des concentrations équivalentes à celle de la solution d'échantillon, des réactifs et des éléments étalons internes sont ajoutés pour préparer des solutions mixtes d'étalonnage.
- Un flacon volumétrique en polyéthylène haute densité ou en PTFE/PFA (10.2.i.2) doit être utilisé avec le tétrafluoroborate.

c) ICP-OES et AAS: La teneur élevée en fer et en cuivre exige un appariement étroit à la matrice des solutions étalons et une sélection appropriée des raies. L'étalonnage doit par conséquent être effectué à l'aide de solutions d'étalonnage ajustées à la matrice. Les longueurs d'ondes recommandées sont énumérées dans le Tableau H.2.

d) ICP-MS: L'emploi d'un étalon interne approprié est recommandé dans le cas présent. Le Tableau H.3 fournit les rapports m/z recommandés pour les mesures ainsi que les interférences potentielles.

10.5.2 Préparation de l'étalon

La préparation de l'étalon dépend de l'équipement utilisé.

a) ICP-OES et AAS:

- Les solutions d'échantillon obtenues par digestion à l'eau régale ont une matrice d'une composition différente de celle des solutions résultant d'une digestion aux micro-ondes. Ceci nécessite par conséquent un appariement différent à la matrice pour l'étalonnage. Les étalons préparés pour la méthode ICP-OES peuvent également servir pour la mesure par AAS tant que les concentrations d'éléments cibles de Pb et de Cd, demeurent dans la plage linéaire. Un témoin d'étalonnage et quatre étalons sont préparés comme solutions d'étalonnage.
- Etalons de digestion à l'eau régale
 - Témoin d'étalonnage: 100 ml de HCl, à une fraction massique de 10 % (10.3.e).
 - Etalons d'étalonnage 1 à 3 (100 ml dans chaque cas): Solutions contenant 1 500 µg/ml de Fe et 1 500 µg/ml de Cu, 24 ml de HCl (10.3.b) et les éléments cibles Pb et Cd à différentes concentrations. 1,0 µg/ml d'élément cible dans la solution correspond à 125 µg/g d'élément cible dans le produit électronique.
- Etalons de digestion aux micro-ondes
 - Témoin d'étalonnage: Mélange de 92 ml de HCl (10.3.e) à une fraction massique de 10 % et de 8 ml de HBF₄ à une fraction massique de 50 % (10.3.j).

- Etalons d'étalonnage 1 à 3 (100 ml dans chaque cas): solutions contenant 1 500 mg/ml de Fe et 1 500 mg/ml de Cu, 24 ml de HCl (10.3.e), 8 ml de HBF₄ à une fraction massique de 50% (10.3.j) et les éléments cibles Pb et Cd à différentes concentrations. 1,2 µg/g d'élément cible dans la solution correspond à 100 µg/g d'élément cible dans le produit électronique.

NOTE Si la pureté du HBF₄ disponible n'est pas suffisante, du HF peut être utilisé à la place.

b) ICP-MS

- Le témoin d'étalonnage et trois étalons sont préparés comme des solutions d'étalonnage.
- Après avoir dilué progressivement chaque solution d'élément étalon, les solutions sont transvasées dans des flacons volumétriques de 100 ml (10.2.j.2) avec de 0 µg à 5 µg de chaque élément. Ensuite, chaque réactif et 1 µg de solvant au rhodium sont ajoutés pour obtenir des concentrations de réactif identiques à celle de la solution d'échantillon et la solution mixte d'étalonnage est préparée.

10.5.3 Etalonnage

L'étalonnage dépend de l'équipement utilisé.

a) ICP-OES et AAS:

- Le témoin d'étalonnage et les solutions étalons sont mesurés par ICP-OES ou AAS, et des tracés d'étalonnage linéaire sont effectués pour le plomb et le cadmium.

b) ICP-MS

- Le spectromètre de masse ICP est préparé pour la quantification. Une partie de la solution obtenue en 10.5.1 est nébulisée dans le plasma d'argon à travers le porte-échantillon. Les valeurs de m/z des éléments cibles et du rhodium sont relevées et le rapport entre la valeur relevée de l'élément cible et celle du rhodium est calculé.
- Le système d'introduction d'échantillon résistant à l'acide fluorhydrique doit être utilisé lorsque l'échantillon contient du HBF₄ ou du HF.

10.5.4 Elaboration de la courbe d'étalonnage

La création de la courbe dépend de l'équipement utilisé.

a) ICP-OES

- Dans la méthode ICP-OES, une partie des solutions d'étalonnage préparées comme décrit en 10.5.1, est introduite dans le plasma d'argon dans des conditions optimisées afin de mesurer les intensités des raies spectrales atomiques de chaque élément cible. Dans la méthode d'étalonnage (méthode d'appariement à la matrice), la courbe montrant la relation entre les intensités des raies spectrales atomiques et la concentration sert de courbe d'étalonnage. Dans la méthode de l'étalon interne, la courbe montrant la relation entre le taux d'intensité et la concentration de l'élément cible par rapport à l'élément étalon interne sert de courbe d'étalonnage.
- Un système d'introduction d'échantillon et une torche résistant à l'acide fluorhydrique doivent être utilisés lorsque la solution contient de l'acide fluorhydrique.
- La longueur d'onde recommandée est sélectionnée à partir des raies spectrales de chaque élément. La longueur d'onde doit être choisie eu égard aux longueurs d'onde de mesure typiques pour les éléments données dans le Tableau H.2. La limite de détection, la précision des mesures, etc. doivent faire l'objet d'une étude approfondie. En cas d'interférence de substances coprésentes, une longueur d'onde qui n'interfère pas avec la plage d'étalonnage doit être choisie, ou des ajustements de l'intensité d'interférence doivent être effectués à l'aide d'une méthode appropriée.

b) ICP-MS

- Le spectromètre ICP-MS est préparé pour la quantification. Une partie de la solution obtenue en 10.5.1 est nébulisée dans le plasma d'argon à travers le porte-échantillon.

Un porte-échantillon résistant à l'acide fluorhydrique doit être utilisé lorsque la solution contient ledit acide. Les valeurs m/z des éléments cibles et de l'élément étalon interne sont relevées et le rapport entre la valeur relevée de l'élément cible et celle de l'élément étalon interne est calculé. Les rapports masse/charge peuvent être définis sur la base des nombres de masse mesurés, énumérés à l'Annexe H.

c) AAS

- Des prises de solutions d'étalonnage, préparées comme décrit en 10.5.1, sont introduites dans la flamme air-acétylène de l'AAS dans des conditions optimisées afin de mesurer l'absorption de la longueur d'onde de chaque élément cible. Dans la méthode d'étalonnage (méthode d'appariement à la matrice), la courbe montrant la relation entre l'absorption de la longueur d'onde et la concentration sert de courbe d'étalonnage.
- Les longueurs d'onde doivent être choisies eu égard aux longueurs d'onde de mesure typiques pour les éléments présentées dans le Tableau H.4. En cas d'interférence de substances coprésentes, une longueur d'onde qui n'interfère pas avec la plage d'étalonnage doit être utilisée, ou des ajustements de l'intensité d'interférence doivent être effectués à l'aide d'une méthode appropriée.

10.5.5 Mesure de l'échantillon

Une fois la courbe d'étalonnage tracée, le témoin d'étalonnage et la solution d'échantillon sont mesurés. Si la concentration d'échantillon se situe au-dessus de la courbe d'étalonnage, la solution doit être diluée pour revenir dans la plage de la courbe d'étalonnage et mesurée une nouvelle fois.

La justesse des mesures est vérifiée au moyen de la substance étalon, d'une solution d'étalonnage, etc. à intervalles réguliers (par exemple tous les 10 échantillons). Si nécessaire, une courbe d'étalonnage est de nouveau tracée.

Une courbe de régression linéaire avec une corrélation (R^2) non inférieure à $<0,998$ doit être utilisée pour l'étalonnage initial. Dans le cas où le résultat obtenu avec l'étalon diffère de la valeur prévue de plus de 20 %, l'étalonnage et tous les échantillons de la séquence doivent faire l'objet de nouvelles mesures.

10.5.6 Calcul

Les valeurs lues au spectromètre pour chaque échantillon, obtenues en 10.5.3, et la courbe d'étalonnage tracée en 10.5.4, servent à déterminer l'intensité spectrale nette de chaque élément cible. La teneur de chaque élément dans l'échantillon est calculée par l'équation suivante:

$$c = \frac{(A_1 - A_2)}{m} \times V \quad (5)$$

où

c est la concentration de plomb ou de cadmium dans l'échantillon, en $\mu\text{g/g}$;

A_1 est la concentration de plomb ou de cadmium dans la solution d'échantillon, en mg/l ;

A_2 est la concentration de plomb ou de cadmium dans le réactif témoin de laboratoire, en mg/l ;

V est le volume total de la solution d'échantillon, en ml , qui dépend de la série particulière de dilutions effectuées;

m est la quantité mesurée d'échantillon, en g .

NOTE Du fait de la variation potentielle des méthodes d'analyse conformément au présent article, qui permet des dilutions individuelles de la solution initiale d'échantillon d'essai, l'Equation (5) ne donne qu'une approche générale. Il faut s'assurer au cas par cas que toutes les dilutions ont été prises en compte dans le calcul du résultat.

10.6 Evaluation de la méthode

Comme décrit de manière détaillée au 4.5, les limites de détection des instruments sont en général relativement faibles (parfois très faibles), mais elles ne représentent pas les LOD vraies d'une méthodologie appliquée à l'analyse d'échantillons réels. Pour aller au-delà de cette approche quelque peu théorique (voir 10.1), le GT3 du CE 111 de la CEI a réalisé plusieurs études internationales inter-laboratoires (IIS).

Dans le cadre de ces études, des MRC, des échantillons fournis de composition connue ainsi que des échantillons réels ont été analysés conformément aux procédures décrites dans le présent article. Le résultat a donné un aperçu des LOD réalisables dans la pratique et, ce qui est encore plus important, de la justesse et de l'exactitude des procédures d'analyse lorsqu'elles sont utilisées dans des opérations de routine.

Pour les méthodes décrites dans le présent article, très peu d'échantillons étaient disponibles. Il n'a pas été possible d'effectuer une évaluation statistique précise de l'exactitude, de la justesse et de la LOD. L'étude IIS a révélé que, comme indiqué pour les Articles 8 et 9, une justesse et une exactitude à $\pm 20\%$ constituaient une bonne estimation pour les quantités de plomb et de cadmium supérieures à 10 mg/kg, indépendamment de la méthode ou des équipements particuliers choisis.

Annexe A (informative)

Détermination du PBB et du PBDE présents dans les polymères par la méthode GC-MS

A.1 Remarques préliminaires

La présente annexe spécifie une méthode d'essai par chromatographie en phase gazeuse et spectrométrie de masse (GC-MS), pour la détermination des diphényles monobromés à décabromés (PBB) et des diphényléthers monobromés à décabromés (PBDE) dans des polymères de produits électrotechniques ayant une teneur en PBB et PBDE dans une plage comprise entre 100 mg/kg et 2 000 mg/kg et allant jusqu'à 100 000 mg/kg pour le diphényléther décabromé (décaBDE).

La présente méthode d'essai a été évaluée pour le PS-HI (polystyrène choc), le PC+ABS (un mélange de polycarbonate/acrylonitrile butadiène styrène) et l'ABS (acrylonitrile butadiène styrène). L'utilisation de la présente méthode pour d'autres types ou pour des plages de concentration ne relevant pas de celles spécifiées ci-dessus n'a pas fait l'objet d'une évaluation.

Les composés PBB et PBDE sont déterminés par extraction Soxhlet des polymères avec séparation par chromatographie en phase gazeuse et spectrométrie de masse (GC-MS), qualitativement et quantitativement, à l'aide d'une surveillance sélective (ou à ion unique) des ions (SIM).

A.2 Appareillage, équipements et matériaux

A.2.1 Appareils

Les éléments suivants doivent être utilisés pour l'analyse:

- a) Balance d'analyse d'une précision de mesure de 0,000 1 g.
- b) Flacons volumétriques de 1 ml, 5 ml, 10 ml, 100 ml.
- c) Extracteurs Soxhlet:
 - extracteurs Soxhlet de 30 ml;
 - ballon de 100 ml;
 - bouchon rodé NS 29/32;
 - condensateur de Dimroth NS 29/32;
 - pierres facilitant l'ébullition (par exemple perles de verre ou anneaux Raschig).
- d) Cartouche à extraction (cellulose, 30 ml, DI 22 mm, hauteur 80 mm).
- e) Laine de verre (pour la cartouche à extraction).
- f) Doublure à injecteur désactivée (pour la méthode GC-MS).
- g) Chemises de chauffage.
- h) Entonnoir.
- i) Feuille aluminium.
- j) Anneaux de liège.
- k) Seringue à graduation en microlitres ou micropipettes automatiques.
- l) Pipette Pasteur.

- m) Flacons d'échantillon de 1,5 ml avec douille de verre de 100 µl et bouchon vissé à joint en polytétrafluoroéthylène (PTFE) ou récipient comparable en fonction du système d'analyse.
- n) Mini-agitateur secoueur (également connu sous le nom d'agitateur-mélangeur vortex ou d'agitateur vortex).

A.2.2 Equipement

Un chromatographe en phase gazeuse à colonne capillaire couplé à un détecteur spectrométrique de masse (ionisation par impact électronique, EI) est utilisé pour l'analyse. Le détecteur spectrométrique de masse doit être capable d'effectuer une surveillance sélective des ions et doit présenter une plage de masse supérieure d'au moins 1000 m/z. La masse de plage supérieure est nécessaire pour identifier sans aucune ambiguïté le DécaBDE et le nonaBDE. L'utilisation d'un échantillonneur automatique est fortement recommandée pour assurer la répétabilité.

Une colonne d'environ 15 m de long dispose d'une séparation suffisamment efficace des composés PBB et PBDE.

A.3 Réactifs

Tous les produits chimiques doivent être soumis à l'essai pour déceler une éventuelle contamination et déterminer les valeurs à blanc avant application.

- a) Toluène (qualité GC ou supérieure).
- b) Hélium (pureté supérieure à 99,999 % (v/v)).
- c) Qualité technique BDE-209 avec BDE-209 ~ solution à 96,9 % et BDE-206 ~ solution à 1,5 %.
- d) Étalons d'étalonnage PBB et PBDE (voir Article A.10).
- e) Étalons succédanés et internes:
 - Étalon succédané utilisé pour surveiller le rétablissement de l'analyte conformément à A.5.1, A.5.3, A.6.1, A.6.2 et Article A.8, par exemple DBOFB (4, 4'-dibromooctafluorobiphényle) (n) ou étalon PentaBDE ou OctaBDE marqué ¹³C.
 - Étalon interne utilisé pour corriger les erreurs d'injection, conformément à A.5.1, A.5.4, A.6.2, et Article A.8, par exemple CB209 (2,2',3,3',4,4',5,5',6,6'- décachlorobiphényle).

NOTE 1 Les étalons sont acceptables lorsqu'il est utilisé un spectromètre de masse de type quadripolaire. Un spectromètre de masse à haute résolution nécessitera l'utilisation d'autres substances étalon appropriées ayant une masse et un temps d'élution similaires à ceux de l'analyte. Le NonaBDE marqué ¹³C et le décaBDE marqué ¹³C sont recommandés pour les PBDE de masse élevée.

NOTE 2 Les étalons proposés conviennent à la mesure des concentrations de monoBDE à octaBDE. Du fait de leur faible masse et de leur volatilité «élevée», ces étalons peuvent ne pas convenir pour mesurer des concentrations de décaBDE et de nonaBDE. Pour ces analytes spécifiques, le meilleur étalon serait, sans conteste, le décaBDE marqué ¹³C ou l'un des nonaBDE marqués ¹³C. Il est possible que certains laboratoires, fonctionnant sur le principe de l'économie d'échelle, considèrent ces matériaux étiquetés trop onéreux pour leur plan d'activité. Le decaBB (BB 209) peut être un substitut potentiel de faible coût, le BB 209 a une masse élevée (943,1 g/mol contre 959,1g/mol pour le décaBDE ou 864,2 g/mol pour le nonaBDE), et son élution se produit juste avant les trois nonaBDE sur une colonne DB-5 type. La présence de quantités significatives de décaBB dans l'échantillon proprement dit peut facilement être déterminée en surveillant la zone de pointe définie dans la présente norme, et en la comparant à ce qui est attendu de la quantité ajoutée de décaBB. Il convient de limiter l'utilisation des étalons marqués suggérés ou de décaBB aux analyses dont les seuls analytes d'intérêt sont le décaBDE et/ou les nonaBDE. Des expérimentations supplémentaires permettraient d'identifier d'autres étalons ayant la masse élevée et la faible volatilité nécessaires à la quantification des nonaBDE et des décaBDE.

A.4 Instructions générales pour l'analyse

Les instructions générales suivantes doivent être suivies:

- a) Afin de réduire les valeurs à blanc, s'assurer que l'ensemble du matériel en verre (à l'exception des flacons volumétriques) est propre et désactiver la laine de verre (A.2.1.e) à 450 °C pendant au moins 30 min. Pour éviter la décomposition (débromuration) des

PBDE par la lumière UV pendant l'extraction et l'analyse, des appareils en verre marron doivent être utilisés dans toute la mesure du possible. Si aucun verre marron n'est disponible, une feuille aluminium peut être utilisée comme protection contre la lumière.

- b) Si la quantité de Br déterminée par XRF est considérablement supérieure à la plage de 0,1 %, il sera nécessaire d'effectuer l'analyse sur une taille d'échantillon ajustée ou en recommençant l'analyse en utilisant un extrait correctement dilué avant ajout de l'étalon interne.

A.5 Préparation des échantillons

Les échantillons doivent être broyés pour passer à travers un tamis de 500 µm avant extraction. Il est fortement recommandé d'utiliser un broyage cryogénique avec refroidissement à l'azote liquide.

A.5.1 Solutions mères

Les solutions mères suivantes doivent être préparées:

- a) Etalon succédané (pour surveiller le rétablissement de l'analyte): 50 µg/ml dans le toluène (A.3.a) (par exemple DBOFB).
- b) Etalon interne (pour la correction de l'erreur d'injection). 10 µg/ml dans le toluène (A.3.a) (par exemple CB209).
- c) Solution de diphényle polybromé (PBB): 50 µg/ml dans un solvant organique.
- d) Solution de diphényléther polybromé (PBDE): 50 µg/ml dans un solvant organique.
- e) Solution de dopage de la matrice: Contenant au total 4 étalons congénères d'étalonnage dans du toluène (A.3.a) ou autre solvant approprié (voir A.5.3) comme indiqué dans le Tableau A.1.

Tableau A.1 – Solution de dopage de la matrice

Bromuration	Nombre de congénères PBDE	Nombre de congénères PBB
Mono à penta	1	1
Hexa- à déca-	1	1

L'ajout de 1 ml d'une solution de dopage de la matrice contenant chacun les quatre congénères à une concentration de 10 µg/ml suffit pour apporter les 10 µg requis (voir A.8.1.b) dans l'échantillon de dopage de la matrice.

A.5.2 Pré-extraction des extracteurs Soxhlet

Le nettoyage des extracteurs Soxhlet (A.2.1.c) exige une pré-extraction de 2 h avec 70 ml de solvant approprié (voir A.5.3). Le solvant de lavage est éliminé.

A.5.3 Extraction de l'échantillon

Les étapes suivantes doivent être suivies pour l'extraction de l'échantillon:

- a) Transvaser 100 mg ± 10 mg d'échantillon dans les cartouches à extraction (A.2.1.d). Noter le poids à 0,1 mg près.
Le toluène (A.3.a) doit être utilisé comme solvant d'extraction.
- b) L'échantillon est transvasé dans la cartouche d'extraction (A.2.1.d) à travers un entonnoir (A.2.1.h). Pour obtenir un transvasement quantitatif, l'entonnoir (A.2.1.h) est rincé avec environ 10 ml de solvant.
- c) 200 µl d'étalon succédané (A.5.1.a) (50 µg/ml) sont ajoutés (conformément à A.5.1).

- d) Pour éviter tout flottement de l'échantillon, la cartouche (A.2.1.d) est fermée à l'aide de la laine de verre (A.2.1.e). Environ 60 ml de solvant sont placés dans le ballon de 100 ml (A.2.1.c). L'équipement est recouvert d'une feuille d'aluminium (A.2.1.i) pour occulter la lumière et l'échantillon est extrait pendant au moins 2 h et chaque cycle dure environ 2 min à 3 min. Des temps d'extraction plus courts risquent d'entraîner de moindres rétablissements des analytes, notamment les PBDE de masse moléculaire plus élevée.
- e) L'extrait est placé dans un flacon volumétrique de 100 ml et le ballon (A.2.1.c) est rincé avec environ 5 ml de solvant.

NOTE Si la solution est troublée du fait de la matrice, ceci peut être atténué en ajoutant 1 ml de méthanol. Dans ce cas, la différence entre la densité du méthanol et celle du toluène (A.3.a) peut ne pas être prise en compte pour le calcul.

- f) Le flacon volumétrique est rempli de 100 ml de solvant.

Dans le cas d'un échantillon de polymère soluble, la procédure d'extraction de remplacement peut être appliquée comme décrit à l'Article A.11.

A.5.4 Addition de l'étalon interne (IS)

Préparer une aliquote de 1 ml de chaque échantillon et chaque étalon à analyser, et la placer dans un tube d'échantillonneur automatique de 1 ml. Ajouter 20 µl de solution étalon interne (A.5.1.b) au tube et le boucher. Retourner le tube deux fois pour mélanger.

Injecter 1 µl de solution d'échantillon dans le GC/MS et l'analyser en fonction des paramètres décrits à l'Article A.7.

A.6 Etalonnage

Une courbe d'étalonnage doit être tracée pour l'analyse quantitative. Au moins cinq solutions d'étalonnage doivent être préparées par incréments équidistants de concentration. La quantification est effectuée sur la base d'une mesure des surfaces des pics. Il est nécessaire d'effectuer un ajustement par régression linéaire de chaque courbe d'étalonnage pour obtenir un écart-type relatif (RSD) inférieur ou égal à 15 % de la fonction d'étalonnage linéaire.

NOTE Si la valeur limite du RSD de 15 % est dépassée, du point de vue de l'assurance qualité, un ajustement de la courbe du second ordre ne garantit pas un ajustement notablement meilleur. Seuls des essais statistiques, tels que l'essai F, satisfont à ces exigences en réalisant une comparaison entre ajustement linéaire et ajustement du 2nd ordre. Cela signifie que, bien que la valeur RSD soit dépassée, l'étalonnage est linéaire.

A.6.1 Solution mère de PBB (1 µg/ml pour chaque congénère), de PBDE (1 µg/ml pour chaque congénère) et d'étalon succédané (1 µg/ml)

100 µl de chaque solution mère (50 µg/ml) de PBB (A.5.1.c) et de chaque solution mère de PBDE (A.5.1.d), ainsi que 100 µl de solution mère succédanée (A.5.1.a) (50 µg/ml) sont placés dans un flacon volumétrique de 5 ml (A.2.1.b) conformément à A.5.1 et sont complétés de solvant jusqu'au repère.

A.6.2 Etalonnage

Les solutions d'étalonnage suivantes sont produites à partir de la solution mère de PBB (1 µg/ml pour chaque congénère), de PBDE (1 µg/ml pour chaque congénère) et d'étalon succédané (0,2 µg/ml) (voir A.6.1). Les volumes indiqués dans le Tableau A.2 sont placés dans un flacon volumétrique de 1 ml (A.2.1.b) au moyen d'une pipette et complétés de solvant jusqu'au repère, puis 20 µl de solution étalon interne à 10 µg/ml (A.5.1.b) sont ajoutés.

NOTE Pour le décaBDE, il peut être nécessaire de modifier la plage d'étalonnage suggérée dans le Tableau A.2. Lors de l'établissement d'une courbe d'étalonnage pour le décaBDE, il convient de régler la plage inférieure en fonction de la sensibilité de l'instrument. Une concentration plus élevée peut être utilisée pour la plage supérieure afin de tenir compte des niveaux en général élevés (d'une fraction massique de 10 % à 12 % (m/m)) de décaBDE normalement présents dans les échantillons.

Tableau A.2 – Solutions d'étalonnage de PBB et PBDE

N°	Volume PBB+PBDE+ succédané µl (voir A.6.1)	Volume Etalon interne µl (voir A.5.1)	c(PBB) c(PBDE) ng/ml par congénère	c(Succédané) ng/ml
1	50	20	50	50
2	150	20	150	150
3	250	20	250	250
4	350	20	350	350
5	450	20	450	450

L'étalon interne sert à la correction de l'erreur d'injection. Par conséquent, l'évaluation du facteur ou rapport de réponse est effectuée par A/A_{IS} .

Pour produire les lignes droites d'étalonnage, la réponse A/A_{IS} est tracée en fonction du rapport de concentration c/c_{IS} .

L'Equation (A.1) est utilisée pour effectuer une régression linéaire:

$$\frac{A}{A_{IS}} = a \times \frac{c}{c_{IS}} + b \quad (A.1)$$

où

A est la surface des pics de PBB, PBDE ou du succédané dans la solution d'étalonnage;

A_{IS} est la surface des pics de l'étalon interne;

c est la concentration de PBB, PBDE ou de succédané par congénère en ng/ml;

c_{IS} est la concentration de l'étalon interne (ng/ml).

NOTE 1 La pratique courante consiste à établir la concentration d'étalons internes à 1,00 ng/ml pour les méthodes d'étalons internes lorsque la quantité et la concentration d'étalons internes ajoutés à l'échantillon et aux étalons avant injection sont identiques.

a est la pente de la courbe d'étalonnage;

b est le segment sur l'axe des ordonnées de la courbe d'étalonnage.

NOTE 2 Une régression polynomiale (par exemple de second ordre) peut être appliquée dans le cas où les exigences concernant la courbe d'écart-type relatif ne peuvent pas être satisfaites par régression linéaire. Toutes les exigences relatives au contrôle de la qualité restent valables dans le cas de l'utilisation de la régression polynomiale.

A.6.3 Calcul de la concentration de PBB et de PBDE

Quantifier les échantillons en utilisant la courbe d'étalonnage. En général, la quantification est réalisée par le logiciel de l'instrument. Dans la pratique, le niveau d'étalonnage de l'étalon interne pour l'ensemble des cinq niveaux d'étalonnage est réglé sur 1 dans la méthode de l'instrument, mais il est également possible d'effectuer cette opération manuellement en utilisant l'équation d'ajustement de l'étalonnage.

Pour un ajustement linéaire, l'équation prend la forme suivante:

$$y = ax + b \quad (\text{A.2})$$

où

- y est le facteur ou rapport de réponse (A/A_{IS}) pour le congénère dans l'échantillon;
- a est la pente de la ligne qui est la mieux ajustée à l'étalonnage obtenu dans l'Equation (A.1);
- x est le résultat instrumental (c/c_{IS} où c_{IS} est en général = 1) exprimé en ng/ml (la concentration du congénère dans l'extrait);
- b est le segment de l'axe des ordonnées ou la concentration lorsque le facteur de réponse est égal à 0, obtenu à partir de l'Equation (A.1).

Pour un ajustement quadratique, l'équation prend la forme suivante:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (\text{A.3})$$

où

- y est le facteur ou rapport de réponse (A/A_{IS}) pour le congénère dans l'échantillon;
- a et b sont des constantes qui correspondent à la courbe qui est la mieux ajustée à l'étalonnage;
- x est le résultat instrumental en ng/ml (la concentration du congénère dans l'extrait);
- c est le segment de l'axe des ordonnées ou la concentration lorsque le facteur de réponse est égal à 0.

L'Equation (A.1), qui se présente sous la forme d'une équation linéaire, peut être réécrite sous la forme de l'Equation (A.4):

$$c = \left(\frac{A}{A_{IS}} - b \right) \left(\frac{c_{IS}}{a} \right) \quad (\text{A.4})$$

où

- A est la surface des pics de PBB, PBDE ou du succédané;
- A_{IS} est la surface des pics de l'étalon interne;
- c est la concentration (intermédiaire) de PBB, PBDE ou de succédané par congénère en ng/ml;
- c_{IS} est la concentration de l'étalon interne en ng/ml.

NOTE 1 La pratique courante consiste à établir la concentration d'étalons internes à 1,00 ng/ml pour les méthodes d'étalons internes lorsque la quantité et la concentration d'étalons internes ajoutés à l'échantillon et aux étalons avant injection sont identiques.

- a est la pente de la courbe d'étalonnage;
- b est le segment sur l'axe des ordonnées de la courbe d'étalonnage.

NOTE 2 Une régression polynomiale (par exemple de second ordre) peut être appliquée dans le cas où les exigences concernant la courbe d'écart-type relatif ne peuvent pas être satisfaites par régression linéaire. Toutes les exigences relatives au contrôle de la qualité restent valables dans le cas de l'utilisation de la régression polynomiale.

Si la concentration de chaque congénère dans un échantillon ne s'inscrit pas dans la plage de ses étalons respectifs, préparer une dilution d'échantillon en série qui placera la concentration du congénère au point médian de l'étalonnage. Analyser la dilution et utiliser le facteur de dilution pour quantifier la concentration des congénères qui ne s'inscrivaient pas dans la plage d'étalonnage de l'analyse initiale. Le facteur de dilution (D) peut être calculé en divisant le volume final de la dilution par le volume de l'aliquote :

$$D = \frac{V_f}{V_a} \quad (\text{A.5})$$

où

D est le facteur de dilution;

V_f est le volume final en ml;

V_a est le volume de l'aliquote, en ml.

L'Equation (A.4) ne donne pas la concentration finale comme le volume du solvant organique, la masse de l'échantillon et le volume de l'extrait. Tout facteur de dilution doit par ailleurs être pris en compte. Il est également nécessaire d'utiliser un facteur de conversion (F) pour les unités de ng à μg . La concentration finale de PBB, de PBDE ou de succédané par congénère dans l'échantillon peut être calculée au moyen de l'Equation (A.6) :

$$c_{\text{final}} = \left(\frac{A}{A_{\text{IS}}} - b \right) \times \frac{c_{\text{IS}}}{a} \times \frac{V}{m} \times F \quad (\text{A.6})$$

où

c_{final} est la concentration de PBB, PBDE ou de succédané par congénère dans l'échantillon en $\mu\text{g/g}$;

V est le volume final d'extraction (100 ml);

m est la masse de l'échantillon, en grammes;

F est un facteur de conversion pour les unités de ng à μg (1×10^{-3}).

NOTE 3 Sur la base de l'expérience de la comparaison inter-laboratoires, il convient, lors du calcul des concentrations de PBDE dans l'échantillon, de tenir compte d'une valeur à blanc potentielle (conformément à 7.6.1.a).

NOTE 4 Le calcul indiqué ci-dessus s'applique uniquement à l'étalonnage par régression linéaire. Un calcul séparé est nécessaire dans le cas d'un étalonnage par régression polynomiale.

Les résultats représentent la somme de la concentration de chaque PBB (PBB totaux) et la somme des concentrations de chaque PBDE (PBDE totaux).

Les PBDE totaux ou les PBB totaux peuvent être calculés en additionnant les concentrations mesurées de tous les signaux qui satisfont aux exigences d'identification d'un PBDE ou d'un PBB. Les PBB et les PBDE inclus dans le total doivent comprendre tous les signaux qui satisfont aux exigences d'identification (masse appropriée, temps de rétention adéquat, rapports ioniques corrects) applicables à un PBB ou à un PBDE. Les PBB et les PBDE inclus dans les totaux ne doivent pas se limiter uniquement à ceux utilisés dans les solutions d'étalonnage, dans la mesure où la plupart des entités s'intéressent à la concentration des PBB totaux et des PBDE totaux et non à des isomères spécifiques.

Les solutions d'étalonnage peuvent être utilisées pour établir un facteur de réponse moyen pour chaque degré de bromuration dans les PBDE et les PBB. Les facteurs de réponse moyens peuvent alors être utilisés dans le calcul de la concentration mesurée des congénères détectés dans l'échantillon qui ne sont pas inclus dans l'étalonnage (par exemple composés identifiés provisoirement ou «TICS», voir également la fin de l'Article A.7). L'intégration automatique des signaux qui satisfont aux critères pour un PBB ou un PBDE est une fonction ordinaire du logiciel utilisé en analyse des traces GC-MS et par conséquent, le fait de rendre compte de tous les PBB et PBDE dans les totaux, ne constitue pas une charge particulièrement onéreuse.

Les PBDE isolés de l'extraction d'échantillon spécifiée en A.5.3 sont quantifiés en ajoutant l'étalon interne (CB 209) (A.5.1.b) à une aliquote d'extrait, en injectant la solution dans le GC/MS, en mesurant la surface du (des) pic(s) de l'analyte et la surface du pic CB 209, et en

calculant la concentration de l'analyte conformément à la formule donnée en A.6.3. Les données relatives à l'étalon succédané (DBOFB) (A.5.1.a) ne sont pas utilisées dans la formule et ne servent en aucune manière à calculer la (les) concentration(s) d'analytes.

Seules les valeurs quantifiables doivent être additionnées. Il est inutile d'inclure des limites de détection pour des concentrations d'analytes non détectées ou non quantifiables, dans la mesure où ces valeurs seraient si faibles que les résultats obtenus n'auraient aucune signification. Dans le cas où il n'est détecté aucun PBDE ou PBB dans l'échantillon, le PBDE (ou PBB) total doit être indiqué en fonction du (des) congénère(s) en utilisant les limites de détection de la méthode les plus élevées, comme défini en A.8.2. Par exemple, si la limite de détection de la méthode est de 20 mg/kg pour décaBB et de 10 mg/kg pour tous les autres PBB, et si aucun PBB n'est trouvé dans l'échantillon, le PBB total doit être indiqué comme étant <20 mg/kg.

Il est important de noter que la concentration mesurée de décaDBE doit être mentionnée séparément des PBDE totaux, dans la mesure où il ne s'agit pas d'une substance réglementée et où sa concentration est déterminée à des fins d'information uniquement.

A.7 GC-MS

Différentes conditions peuvent être nécessaires pour optimiser un système GC-MS spécifique afin d'effectuer une séparation effective de tous les congénères d'étalonnage et de satisfaire aux exigences de CQ et de MDL. Les paramètres suivants se sont révélés appropriés et sont présentés à titre d'exemple:

- a) Colonne GC: non polaire (phényl-arylène-polymère équivalent à 5 % de phényl-méthylpolysiloxane), longueur 15 m; diamètre intérieur de 0,25 mm; épaisseur de pellicule égale à 0,1 µm. Une colonne à haute température (maximum = 400 °C) doit être utilisée pour les conditions GC indiquées dans la méthode.
- b) Un injecteur PTV, à refroidissement sur colonne, de type split/splitless ou des systèmes d'injection comparables peuvent être utilisés. Les paramètres suivants sont recommandés/facultatifs:
 - Programme PTV: 50 °C à 90 °C (0 min) à 300 °C/min jusqu'à 350 °C (15 min); mode opératoire: temps de purge splitless 1 min; débit de purge 50 ml/min.

NOTE 1 Il convient de régler la température initiale par l'opérateur en fonction du point d'ébullition du solvant utilisé.

NOTE 2 L'utilisation d'un injecteur sur colonne peut également être suggérée comme autre moyen d'introduction de l'échantillon. Ceci peut être particulièrement avantageux pour la sensibilité de congénères plus lourds tels que octaBDE et nNonabDE. Cependant, la sensibilité aux effets de matrice requiert une attention toute particulière.

- Programme split/splitless: 280 °C, 1,0 µl splitless, temps splitless 0,5 min. Débit total = 54,2 ml/min à 0,5 min.

- c) Doublure de l'injecteur: 4 mm, en verre, unique, conique et de fond, avec de la laine de verre (désactivée) disposée au fond.

NOTE 3 La doublure désactivée d'un injecteur acheté dans le commerce peut faire l'objet d'une désactivation supplémentaire. Ceci est plus particulièrement important si les exigences relatives au contrôle de la qualité «PR-206» spécifiées dans l'Article A.8 ne peuvent pas être satisfaites. Exemple de procédure de désactivation chimique: prendre une doublure de qualité commerciale, désactivée en usine (à cône unique, de type split/splitless et avec laine de verre au fond) et l'immerger pendant 15 min dans du dichlorométhane (DMDCS) ou du toluène (A.3.a) contenant 5 % de diméthylchlorosilane. Récupérer la doublure avec des pinces, l'égoutter puis l'immerger trois fois de suite dans le DMDCS pour s'assurer que la laine de verre a été entièrement imprégnée et rincée. Egoutter une fois encore et éponger la solution résiduelle sur un chiffon propre. Immerger la doublure dans du méthanol pendant 10 min à 15 min et recommencer trois fois le cycle d'égouttage/immersion. Rincer l'intérieur et l'extérieur de la doublure avec une pissette de méthanol, puis rincer avec une pissette de dichlorométhane. Transvaser la doublure dans une étuve à vide purgée à l'azote et la sécher à 110 °C pendant au moins 15 min. Une fois sèche, elle est prête à être utilisée.

- d) Gaz vecteur: hélium (A.3.b), 1,0 ml/min, débit constant.
- e) Etuve: 110 °C pendant 2 min, rampe de 40 °C/min jusqu'à 200 °C; rampe de 10 °C/min jusqu'à 260 °C; rampe de 20 °C/min jusqu'à 340 °C pendant 2 min.

- f) Ligne de transfert: 300 °C, directe.
- g) Température de la source d'ions: 230 °C.
- h) Méthode d'ionisation: Ionisation par impact électronique (EI), 70 eV.
- i) Temps de séjour: 80 ms.

NOTE 4 Afin d'obtenir la qualité de données requise pour un pic PBB ou PBDE GC, il est recommandé d'acquérir 3 à 4 balayages des ions de quantification sélectionnés par seconde. Ceci donnera le temps de séjour approprié pour chaque ion (m/z) à surveiller. Le taux de balayage générera un temps de séjour de l'ordre de 80 ms par ion. Il convient de noter que certains paramètres logiciels règlent, par défaut, le temps de séjour en fonction du taux de balayage L'analyse des PBB et PBDE est effectuée en mode SIM (surveillance à ion unique) avec les traces massiques (les traces en gras ont été utilisées pour la quantification) données dans les Tableaux A.3 et A.4. Ces valeurs ont été jugées adéquates et sont données à titre d'exemples.

Tableau A.3 – Masses de référence pour la quantification des PBB

	Ions (m/z) ^a surveillés dans l'extrait		
Mono-BB	231,9^b	233,9	
Di-BB	309,8	311,8	<u>313,8^c</u>
Tri-BB	387,8	389,8	<u>391,8</u>
Tétra-BB	307,8	309,8	<u>467,7</u>
Penta-BB	385,7	387,7	<u>545,6</u>
Hexa-BB	465,6	467,6	<u>627,5</u>
Hepta-BB	543,6	545,6	<u>705,4</u>
Octa-BB	623,5	625,5	<u>627,5</u>
Nona-BB	701,4	703,4	<u>705,4 (863,4)</u>
Déca-BB	781,3	783,3	<u>785,3 (943,1;215,8, 382,6; 384,5)</u>
^a Les parenthèses () = ions optionnels. ^b En gras = ions de quantification. ^c Soulignés = ions d'identification.			

Tableau A.4 – Masses de référence pour la quantification des PBDE

	Ions (m/z) ^a surveillés dans l'extrait		
Mono-BDE	247,9	249,9	
Di-BDE	325,8	327,8	<u>329,8^c</u>
Tri-BDE	403,8	405,8	<u>407,8</u>
Tétra-BDE	323,8	325,8	<u>483,7</u>
Penta-BDE	401,7	403,7	<u>561,6</u>
Hexa-BDE	481,6	483,6	<u>643,5</u>
Hepta-BDE	559,6	561,6	<u>721,4</u>
Octa-BDE	639,5	641,5	<u>643,5 (801,3)</u>
Nona-BDE	717,4	719,4	<u>721,4 (879,2)</u>
Déca-BDE	797,3	799,3	<u>959,1</u>
^a Les parenthèses () = ions optionnels. ^b En gras = ions de quantification. ^c Soulignés = ions d'identification.			

Un cycle de balayage complet utilisant une méthode de spectrométrie de masse à courant d'ionisation totale («balayage complet») pour chaque échantillon est également recommandé pour vérifier l'existence de pics/congénères non présents dans l'étalonnage (composés identifiés provisoirement ou «TICS») ou non observés dans la fenêtre SIM. Si le pic est présent, l'identifier et déterminer la classe de composé (par exemple octabromodiphényle, pentabromodiphényléther, etc.) par évaluation des spectres ioniques totaux.

A.8 Contrôle de la qualité

Au moins une fois par an (ou à chaque fois que les paramètres des instruments sont modifiés), une solution de 5 µg/ml de décaBDE technique (BDE-209, par exemple Cat. # TBDE-83R fabriqué par les laboratoires Wellington ou équivalent avec BDE-209 ~ 96,9 % et BDE-206 ~ 1,5 %) associée à un étalon interne doit être analysée afin de confirmer que le système GC-MS ainsi que les paramètres correspondants conviennent à une détermination exacte des nonaBDE, en présence de BDE-209 et de démontrer qu'il n'y a pas de dégradation de congénères. Une fois mesurée la concentration (en µg/ml) des BDE 206 et 209 dans la solution d'injection, le rapport en pourcentage 206 / (206 + 209) («PR – 206») est calculé comme indiqué ci-dessous.

$$PR = \frac{c_A}{c_A + c_B} \times 100 \quad (\text{A.7})$$

où

PR est le rapport en pourcentage, «PR-206»;

c_A est la concentration mesurée de BDE-206, en µg/ml;

c_R est la concentration mesurée de BDE-209, en µg/ml;

Le Tableau A.5 donne un exemple de calcul.

Tableau A.5 – Exemple de calcul

Congénère BDE	Concentration d'injection théorique µg/ml	Concentration mesurée µg/ml	PR-206 %
BDE-209	4,845	5,200	$(0,107 / 5,307) \times 100 = 2,01$
BDE-206	0,076	0,107	
Total		5,307	

Un rapport PR-206 mesuré dans l'injection <4,0 est acceptable et les échantillons peuvent être soumis à l'essai. Un rapport PR-206 mesuré >4,0 est inacceptable et les échantillons ne seront soumis à l'essai qu'une fois la situation corrigée. Des procédures de correction efficaces consistent à remplacer la doublure d'injection, à réduire la température d'injection ou encore la température et la durée de maintien dans l'étuve, etc. De nouvelles déterminations des limites MDL sont nécessaires si les paramètres des instruments sont modifiés.

A.8.1 Méthode de contrôle de la qualité

Les étapes suivantes sont appliquées pour le contrôle de la qualité:

- Un réactif témoin doit être extrait avec chaque séquence d'échantillons. Le réactif témoin consiste en 60 ml de solvant uniquement prélevé tout au long de la procédure d'extraction, conformément à A.5.3 ou A.5.4.
- Un échantillon par séquence ou un échantillon toutes les dix séquences, en fonction de la charge, doit être dopé avec 10 µg de chaque congénère, dans la solution de dopage de la matrice (voir A.5.1.e). La formule suivante doit être utilisée pour le calcul:

$$R = \frac{C_m - c}{C_s} \times 100 \quad (A.8)$$

où

R est le taux de rétablissement de chaque congénère PBB ou PBDE, en %;

c_m est la concentration de chaque congénère PBB ou PBDE dans la matrice dopée, en ng/ml;

c est la concentration de chaque congénère PBB ou PBDE dans l'échantillon initial, en ng/ml;

C_s est la concentration de la solution de dopage de PBB ou PBDE, en ng/ml.

Le taux de rétablissement en pourcentage, pour chaque congénère, doit se situer entre 50 % et 150 %. Le pourcentage de rétablissement pour chaque matrice dopée doit être enregistré et suivi sur une feuille d'analyse afin de déterminer les effets possibles de la matrice dans l'analyse.

- c) Après chaque dixième cycle d'analyse d'échantillons et à la fin de chaque jeu d'échantillons, analyser un étalon de vérification continue de l'étalonnage (CCC). Un CCC est un étalon à mi-gamme, non extrait, analysé comme un échantillon. Le taux de rétablissement en pourcentage, pour chaque congénère, doit se situer entre 70 % et 130 %. Si le taux de rétablissement en pourcentage pour tout congénère relevant de l'étalon CCC ne se situe pas dans cette plage, il convient de réinjecter le CCC dans un délai de 12 h. Si, après la réinjection de l'étalon CCC, le rétablissement se situe toujours en dehors de la plage, l'analyse est arrêtée et le système doit faire l'objet d'une maintenance pour le ramener dans les conditions optimales de fonctionnement. Tous les échantillons injectés avant le dernier étalon CCC qui s'est révélé satisfaisant peuvent être consignés dans le rapport d'essai, mais tous les échantillons injectés après l'étalon CCC défectueux doivent faire l'objet d'une nouvelle analyse au moyen d'un nouvel étalonnage.
- d) Le taux de rétablissement du succédané doit être surveillé pour chaque échantillon. Le taux de rétablissement du succédané en pourcentage (%) peut être calculé de la manière suivante:

$$SR = \frac{ms}{10 \mu g} \times 100 \quad (A.9)$$

où

SR est le taux de rétablissement du succédané, en pourcentage (%);

ms est la masse totale µg du succédané, mesurée dans la solution d'échantillon finale.

Le taux de rétablissement acceptable doit se situer entre 70 % et 130 %. Si le taux de rétablissement du succédané, pour tout échantillon, se trouve en dehors de ces limites, l'échantillon doit faire l'objet d'une nouvelle analyse. Si, après cette nouvelle analyse, le taux de rétablissement du succédané ne s'inscrit pas dans ces limites, l'échantillon doit faire l'objet d'une nouvelle extraction et d'une nouvelle analyse.

- e) A partir des résultats des cinq étalons (obtenus conformément à A.6.2, Tableau A.2), calculer la réponse moyenne (zone de pointe) pour l'étalon interne. La réponse de l'étalon interne (IS) pour chaque échantillon (conformément à A.5.4) doit être surveillée pendant toute la durée de l'analyse et comparée à la moyenne. Si, à un moment quelconque de l'analyse, la réponse IS fluctue au-dessous de 50 % ou au-dessus de 150 % de la moyenne, l'échantillon est considéré non maîtrisé et doit être réanalysé. Si la réponse IS ne relève toujours pas de la plage, vérifier les résultats de l'extrait dupliqué. Si les deux résultats se situent hors de la plage et sont faussés dans le même sens, consigner les données comme étant suspectes du fait des effets de la matrice.

- f) Dans les échantillons comportant des concentrations significatives de décaBDE (BDE-209), le BDE-206 sera le NonaBDE dominant. Ces échantillons ne présenteront toutefois que des traces du nonaBDE, BDE-208. Ces concentrations qualitatives de nonaBDE peuvent être utilisées comme indication du fonctionnement correct du système GC-MS. S'il est observé que le BDE-206 n'est pas le nonaBDE dominant ou s'il est observé que le BDE-208 est présent dans des quantités supérieures à des traces par rapport aux autres nonaBDE, ceci indique que des mesures correctives sont nécessaires afin que l'instrumentation soit adaptée à une détermination exacte des nonaBDE en présence de concentrations significatives de décaBDE.
- g) Il est recommandé d'effectuer un essai à blanc au solvant entre chaque injection afin de s'assurer qu'il n'y a pas de transfert d'analyte entre échantillons. Ceci est notamment important lorsqu'il s'agit d'analyser des échantillons comportant des niveaux élevés de décaBDE et/ou des retardateurs de flammes bromés susceptibles d'engendrer des interférences. S'il n'est pas possible de s'assurer que l'instrument est exempt d'analytes contaminants, les résultats obtenus peuvent être faussement élevés. Il est recommandé que le solvant contienne une faible quantité d'agent de silylation (BSA, BSTFA) pour maintenir l'inertie de la doublure de l'injecteur.
- h) La durée de rétention d'analytes ayant une masse d'identification correspondant à BDE-209 et BDE-206 doit être de ± 20 s par rapport aux étalons BDE-209 et BDE-206 utilisés dans les solutions d'étalonnage afin de confirmer qu'il s'agit bien de BDE-209 et/ou BDE-206. Les pics d'élution hors de cette plage ne peuvent pas être identifiés comme des BDE-209 et/ou BDE-206. (Dans les échantillons contenant décaBDE, le BDE-206 sera le nonaBDE dominant.) Il est très courant d'utiliser les temps de rétention comme critère de confirmation.

A.8.2 Limite de détection de la méthode et limite du rapport

Une étude de la limite de détection de la méthode (MDL) doit être effectuée avant de réaliser ces essais et avant chaque changement significatif de la méthode ou du type d'instrument. Les MDL sont définies comme la concentration minimale d'une substance qui peut être mesurée et rapportée à une limite de confiance à 99 %, à partir de laquelle il est admissible de procéder à une détection qualitative d'un échantillon dans une matrice donnée correspondant à l'analyte. La MDL est obtenue en calculant l'écart-type sur un minimum de sept analyses de réplicats. L'écart-type est alors multiplié par la valeur *t* de Student pour le nombre total de réplicats (*n*) pour *n*-1 degrés de liberté.

NOTE 1 Il convient que toutes les analyses servant au calcul d'une MDL soient réalisées consécutivement.

- a) Broyer environ 2 g d'un polymère convenable provenant d'une source pure connue pour ne pas contenir de retardateurs de flammes bromés ou d'autres composants qui peuvent interférer avec l'analyse (par exemple un matériau polyéthylène BCR-681 ou autre).
- b) Peser 100 mg du polymère broyé et le placer dans une cartouche d'extraction neuve (A.2.1.d). Répéter cette opération six autres fois.
- c) Placer la cartouche d'extraction (A.2.1.d) dans l'appareil d'extraction Soxhlet (A.2.1.c).
- d) Doper la cartouche (A.2.1.d) avec 5 µg de chaque congénère d'étalonnage en s'approchant de la concentration de l'étalon ayant la concentration la plus faible.
- e) Utiliser la procédure (extraction conformément à A.5.3 ou A.5.4) pour extraire chaque échantillon. Effectuer l'analyse en conséquence.
- f) Le taux de rétablissement en pourcentage, pour chaque congénère, doit se situer entre 70 % et 130 %. Si le rétablissement se situe au-dessus ou en dessous de ces limites, l'analyse doit être répétée. Si le rétablissement se situe hors de ces limites une seconde fois, la procédure d'extraction et d'analyse doit être répétée dans son intégralité.
- g) Chaque congénère doit avoir une valeur MDL calculée inférieure ou égale à 100 mg/kg. Si la MDL calculée pour chaque congénère se situe au-dessus de ces limites, la procédure d'extraction et d'analyse doit être recommencée pour ce(s) congénère(s).
- h) La limite de rapport pour chaque congénère doit être, au minimum, égale à trois fois la MDL respective. Contrairement à la MDL, qui ne concerne que la détection, la limite de

rapport est une concentration qui peut être quantifiée avec exactitude pour un composé donné.

NOTE 2 Si la MDL exigée ne peut pas être obtenue, une étape de concentration peut être ajoutée à la procédure d'extraction. Dans la mesure où cette étape de concentration contribue également à l'augmentation de la concentration de résine dans l'extrait, une étape de nettoyage est également recommandée pour chaque échantillon. Cette étape prolonge la durée de vie de la colonne et réduit la fréquence de maintenance des instruments. Si elles sont intégrées à l'analyse, il convient que les étapes de concentration et de nettoyage soient également utilisées pour les échantillons MDL.

A.9 Evaluation de la méthode

La justesse et l'exactitude des méthodes, la limite de détection de la méthode et la manière d'assurer la qualité des données, ainsi que du processus de détermination, seront actualisés dès que les laboratoires participants choisis par le GT3 du CE 111 de la CEI fourniront les quantités de données appropriées.

A.10 Etalons PBB et PBDE

Toutes les espèces bromées du diphenyle mono à décabromé (PBB) et du diphenyléther mono à décabromé (PBDE) doivent être incluses dans l'étalonnage. La disponibilité d'étalons de congénères pour un PBB ou PBDE particulier (par exemple pentaBDE) peut varier d'une région à l'autre. La liste suivante constitue un exemple type de congénères d'étalonnage généralement disponibles et considérés appropriés pour la présente analyse.

Tableau A.6 – Exemple de liste de congénères d'étalonnage disponibles dans le commerce et considérés appropriés pour la présente analyse

PBB^a	Nom du composé
BB-003	4-Bromo biphényle
BB-015	4,4'-Dibromo biphényle
BB-029	2,4,5-Tribromo biphényle
BB-049	2,2',4,5'-Tetrabromo biphényle
BB-077	3,3',4,4'-Tetrabromo biphényle
BB-103	2,2',4,5',6-Pentabromo biphényle
BB-153	2,2',4,4',5,5'-Hexabromo biphényle
BB-169	3,3',4,4',5,5'-Hexabromo biphényle
Dow FR-250	Mélange technique de nonabromodiphényle, d'octabromodiphényle (80%) et d'heptabromodiphényle
BB-209	Décabromo biphényle
PBDE^a	Nom du composé
BDE-003	4-Bromodiphényléther
BDE-015	4,4'-Dibromodiphényléther
BDE-033	2',3,4-Tribromodiphényléther
BDE-028	2,4,4'-Tribromo diphenyle éther
BDE-047	2,2',4,4'-Tétrabromodiphényléther
BDE-099	2,2',4,4',5-Pentabromodiphényléther
BDE-100	2,2',4,4',6-Pentabromodiphényléther
BDE-153	2,2',4,4',5,5'-Hexabromodiphényléther
BDE-154	2,2',4,4',5,6'-Hexabromodiphényléther
BDE-183	2,2',3,4,4',5',6-Heptabromodiphényléther

BDE-203	2,2',3,4,4',5,5',6-Octabromodiphényléther
BDE-206	2,2',3,3',4,4',5,5',6-Nonabromodiphényléther
BDE-209	Décabromodiphényléther
^a Les numéros de classification de Ballschmiter et Zell ont été utilisés pour les PBB et PBDE.	

A.11 Procédures d'extraction alternatives des polymères solubles

Pour un échantillon de polymère soluble, notamment HIPS, la procédure d'extraction alternative suivante peut être appliquée:

- a) Peser 100 mg d'échantillon à 0,1 mg près dans un tube de verre ambre (d'un volume d'au moins 2 ml).

NOTE 1 D'autres quantités d'échantillon peuvent être utilisées dans le cas d'échantillons ayant des concentrations de PBB ou PBDE potentiellement très basses ou très élevées.

- b) Transvaser 9,8 ml du solvant approprié dans le tube et relever la masse du mélange.

NOTE 2 Le volume de solvant peut être ajusté en conséquence pour les échantillons ayant des concentrations de PBB ou PBDE potentiellement très basses ou très élevées.

- c) Ajouter 200 µl de l'étalon succédané DBOFB (A.5.1.a) (50 µg/ml) dans le tube et relever la nouvelle masse. Relever la masse totale de l'échantillon, du solvant et du tube muni de son bouchon.
- d) Boucher hermétiquement le tube d'échantillon. Le placer dans un bain ultrasonique et appliquer les ultrasons pendant 30 min jusqu'à ce que l'échantillon soit dissous. Un petit morceau de bande adhésive peut être utilisé pour éviter le desserrage du bouchon par les vibrations. Une fois l'échantillon dissous, laisser le tube refroidir et relever la masse. Vérifier que la masse est identique à celle relevée au cours de l'étape c) ci-dessus.
- e) Transvaser 1,0 ml de la solution dans un nouveau tube de verre ambre (d'un volume d'au moins 12 ml) et peser l'aliquote à 0,1 mg près.
- f) Choisir pour le polymère un non-solvant qui est un bon solvant pour PBB/PBDE. Transvaser 9,0 ml du non-solvant dans le tube et relever la masse du tube et de son contenu à 0,1 mg près.
- g) Laisser le polymère se déposer ou filtrer le mélange à travers une membrane en PTFE de 0,45 µm. Il est également possible de transvaser une aliquote de solution de 1,0 ml dans un flacon volumétrique de 10 ml et de peser l'aliquote avec exactitude à 0,1 mg près. Compléter de solvant neuf jusqu'au repère, enregistrer la masse finale et bien mélanger.

NOTE 3 Dissoudre, par exemple, un échantillon de HIPS dans du toluène (A.3.a), puis diluer une aliquote de la solution de 1,0 ml avec 9,0 ml d'isooctane.

- h) Si l'étape de précipitation du polymère a été suivie, préparer une solution de solvant à 10 % dans le non-solvant et utiliser un flacon volumétrique étalonné pour déterminer la densité du mélange. Utiliser cette densité dans des calculs ultérieurs.
- i) Préparer selon la même procédure une extraction et une dilution à blanc.
- j) Suivre les procédures d'analyse décrites en A.5.4 et dans les Articles A.6 et A.7. Calculer la concentration de PBB ou PBDE dans l'échantillon conformément à A.6.3.

A.12 Exemples de chromatogrammes dans les conditions GC-MS suggérées

Le Tableau A.7 montre les congénères PBB et PBDE présents dans le mélange utilisé pour les exemples de chromatogrammes présentés aux Figures A.1 à A.3.

Tableau A.7 – Congénères PBB et PBDE dans le mélange

Congénères PBB	Congénères PBDE
B-2 = 3-Bromobiphényle	BDE-1 = 2-Bromodiphényléther
B-10 = 2,6-Dibromobiphényle	BDE-7 = 2,4-Dibromodiphényléther
B-30 = 2,4,6-Tribromobiphényle	BDE-28 = 2,4,4'-Tribromodiphényléther
B-80 = 3,3',5,5'-Tétrabromobiphényle	BDE-47 = 2,2',4,4'-Tétrabromodiphényléther
B-103 = 2,2',4,5',6-Pentabromobiphényle	BDE-99 = 2,2',4,4',5-Pentabromodiphényléther
B-169 = 3,3',4,4',5,5'-Hexabromobiphényle	BDE-100 = 2,2',4,4',6-Pentabromodiphényléther
B-194 = 2,2',3,3',4,4',5,5'-OctaBB	BDE-154 = 2,2',4,4',5,6'-Hexabromodiphényléther
B-206 = 2,2',3,3',4,4',5,5',6-NonaBB	BDE-183 = 2,2',3,4,4',5',6-Heptabromodiphényléther
B-209 = Décabromobiphényle	BDE-203 = 2,2',3,4,4',5,5',6-Octabromodiphényléther
	BDE-206 = 2,2',3,3',4,4',5,5',6-Nonabromodiphényléther
	BDE-209 = Décabromodiphényléther

Les chromatogrammes suivants ont été obtenus en utilisant les paramètres GC décrits à l'Article A.7.

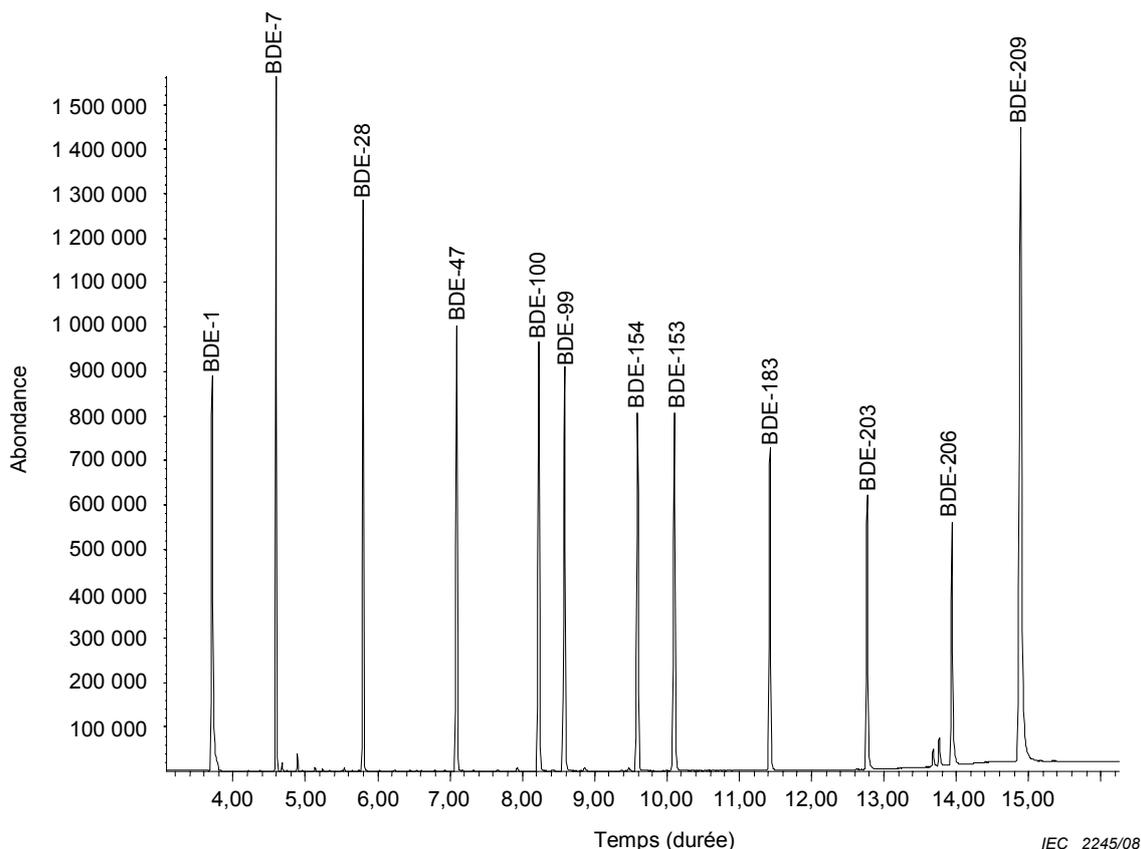
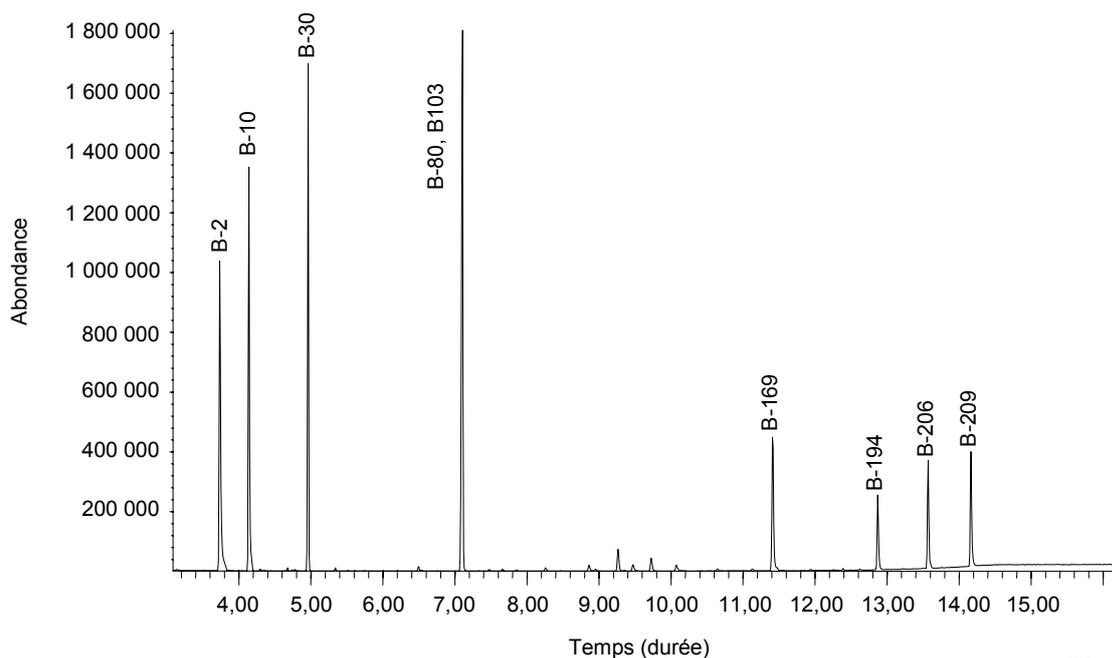
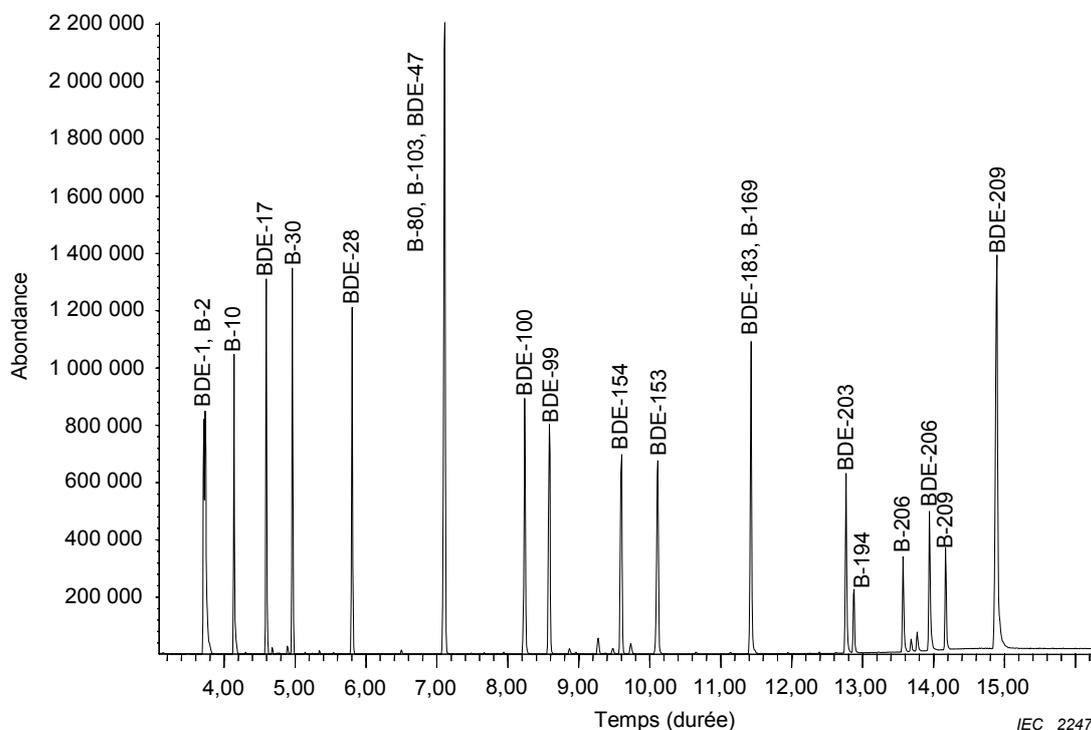


Figure A.1 – Chromatogramme d'ionisation totale du mélange PBDE, BDE-1 à BDE-206 (5 µg/ml), BDE-209 (50 µg/ml)



IEC 2246/08

Figure A.2 – Chromatogramme d'ionisation totale du mélange PBB (3,5 µg/ml)

IEC 2247/08

Figure A.3 – Chromatogramme d'ionisation totale des mélanges PBB et PBDE (BDE-1 à BDE-206, 5 µg/ml, BDE-209, 5,0 µg/ml, PBB, 3,5 µg/ml)

Annexe B (informative)

Essai de détermination de la présence de chrome hexavalent (Cr(VI)) dans les revêtements incolores et colorés de protection anticorrosion appliqués sur les métaux

B.1 Présentation

La présente méthode définit des procédures de détermination qualitative de la présence de chrome hexavalent (Cr(VI)) dans les revêtements incolores et colorés de protection anticorrosion d'échantillons métalliques. Le chrome hexavalent est toxique pour l'être humain. Tous les échantillons et réactifs utilisés dans cette méthode et susceptibles de contenir du Cr(VI) doivent être manipulés avec les précautions appropriées.

Du fait de sa nature hautement réactive, la concentration de chrome hexavalent dans une couche de revêtement de protection anticorrosion peut changer considérablement avec le temps et en fonction des conditions de stockage. La présente méthode constitue par conséquent une approche pratique et efficace de détection qualitative de la présence de Cr(VI) dans la couche de revêtement. Les échantillons à soumettre à l'essai doivent être stockés dans les conditions ambiantes et la méthode d'analyse décrite ici doit être appliquée dans les 30 jours suivant le processus de revêtement. Les conditions ambiantes sont définies pour une humidité relative comprise entre 45 % et 75 % et une température comprise entre 15 °C et 35 °C. Si un échantillon ne peut satisfaire aux exigences de stockage dans les conditions ambiantes et d'analyse dans les 30 jours suivant le processus de revêtement, ou si les conditions de stockage et la date de fabrication d'un échantillon donné ne sont pas connues, le résultat d'analyse de ce dernier, obtenu en appliquant la méthode décrite dans le cas présent, ne peut pas vérifier si le Cr(VI) était présent à l'origine dans la couche de revêtement. Les résultats ne peuvent que donner une indication de présence et/ou d'absence du Cr(VI) étant donné les limitations de la méthode au moment de l'essai. Ces informations doivent également être clairement indiquées dans le rapport d'analyse.

La présente méthode contient deux procédures principales: la procédure d'essai à la touche et la procédure d'extraction à l'eau bouillante. La procédure d'essai à la touche peut être la première appliquée en raison de sa simplicité et de sa facilité d'emploi. Lorsque l'essai à la touche donne un résultat négatif après application de toutes les procédures énumérées en B.5.1, ou si l'analyste n'est pas certain du résultat d'un essai à la touche, ou encore en cas d'interférence de couleur de fond, la procédure d'extraction à l'eau bouillante doit être appliquée pour vérification. L'interférence de couleur est souvent présente dans le cas de revêtements de protection anticorrosion colorés et donne lieu à des résultats erronés. Lorsque la présence de chrome hexavalent dans un échantillon est détectée au moyen de la procédure d'essai à la touche ou par la méthode d'extraction à l'eau bouillante, l'échantillon est considéré avoir un revêtement au chrome hexavalent.

NOTE Les solutions étalons de comparaison Cr(VI) utilisées dans la présente méthode ont été sélectionnées sur la base de deux études internationales inter-laboratoires (IIS) organisées par le GT3 du CE 111 de la CEI. La présence de Cr(VI) est exprimée en termes de résultats d'essai positifs et négatifs. Se reporter à l'Article B.6 pour des informations détaillées.

Les solutions ou les déchets contenant du Cr(VI) doivent être éliminés de manière appropriée. Par exemple, l'acide ascorbique ou un autre agent réducteur peut être utilisé pour réduire le Cr(VI) en Cr(III).

B.2 Appareillage, équipements et matériaux

Les éléments suivants doivent être utilisés pour l'analyse:

- a) Balance étalonnée: balance d'analyse d'une précision de 0,1 mg.
- b) Thermomètre ou autre dispositif de mesure de la température capable de mesurer jusqu'à 100 °C.
- c) Instrument colorimétrique: un spectrophotomètre pour une utilisation à 540 nm, générant un trajet optique de 1 cm ou plus, ou un photomètre à filtre, générant un trajet optique de 1 cm ou plus et muni d'un filtre jaune verdâtre ayant une transmittance maximale avoisinant 540 nm.
- d) Matériel de laboratoire: tous les ustensiles en verre de laboratoire réutilisables (verre, quartz, polyéthylène, polytétrafluoréthylène (PTFE), etc.), y compris les conteneurs d'échantillons, doivent être trempés toute une nuit dans un mélange d'eau et de détergent de qualité de laboratoire (B.3.g), rincés à l'eau (B.3.g). Ils doivent ensuite séjourner pendant 4 h dans un mélange d'acides dilués ($\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O} = 1:2:9$ par volume), puis être rincés dans de l'eau (B.3.g). D'autres procédures de nettoyage sont autorisées à condition que la propreté requise puisse être prouvée par l'analyse de témoins.
- e) Bouteilles volumétriques graduées: matériel en verre de Classe A, 100 ml, ou équivalent de justesse et d'exactitude acceptables. Un autre équipement volumétrique, par exemple des appareils automatiques de dilution, de justesse et d'exactitude acceptables, peut être utilisé.
- f) Assortiment de pipettes étalonnées: matériel en verre de Classe A, ou équivalent de justesse et d'exactitude acceptables.
- g) Récipient d'extraction: béccher en verre au borosilicate ou en quartz, avec graduation de volume de 250 ml ou équivalent.
- h) Dispositif de chauffage: capable de maintenir l'ébullition de la solution d'extraction.
- i) Membranes de filtre (0,45 μm), de préférence cellulosiques ou en polycarbonate.

B.3 Réactifs

Les réactifs suivants doivent être utilisés:

- a) 1,5-diphénylcarbazine, qualité réactif d'analyse.
- b) Solution étalon de dichromate de potassium, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, (contenant 400 mg/kg de Cr total): Dans un conteneur en verre, dissoudre 0,113 g de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (qualité réactif d'analyse) dans de l'eau (B.3.g) et diluer ensuite à l'eau (B.3.g) pour obtenir une masse totale de 100 g. Boucher hermétiquement le conteneur. La durée de conservation de cette solution est d'environ un an.
- c) Solution étalon de dichromate de potassium, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, (contenant 1 mg/kg de Cr total): Dans un conteneur en verre, mesurer 0,25 g de la solution obtenue à l'étape b) et diluer à l'eau (B.3.g) pour obtenir une masse totale de 100 g. Boucher hermétiquement le conteneur. Cette solution doit être utilisée dans un délai de 24 h après préparation.
- d) Acétone, qualité réactif d'analyse.
- e) Ethanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) (à une fraction volumétrique de 96 %), qualité réactif d'analyse.
- f) Solution d'acide orthophosphorique H_3PO_4 (à une fraction massique de 75 %), de qualité réactif d'analyse.
- g) Eau: Eau de qualité 1 spécifiée dans l'ISO 3696, qui doit être exempte d'interférences.

B.4 Préparation des échantillons

Avant l'essai, la surface des échantillons doit être exempte de tous contaminants, traces de doigts et autres taches. Si la surface est enduite d'huile en fine couche, celle-ci doit être retirée avant l'essai à l'aide d'un chiffon propre et souple de laboratoire imprégné d'un solvant adéquat, ou par rinçage de la surface avec un solvant adéquat à la température ambiante (35 °C au maximum). Les échantillons ne doivent pas être séchés à une température supérieure à 35 °C. Les solutions alcalines ne doivent être soumises à aucun traitement dans la mesure où les revêtements de protection anticorrosion sont détériorés par les alcalis.

Si la surface d'un échantillon présente un revêtement en polymère, une abrasion légère au papier de verre, par exemple un papier abrasif SiC de grain 800, peut être effectuée afin d'éliminer la couche de polymère, sans toutefois éliminer le revêtement de protection anticorrosion de l'échantillon. D'autres méthodes d'élimination du revêtement peuvent être appliquées si elles se révèlent d'une efficacité égale ou supérieure.

B.5 Procédures d'essai

B.5.1 Procédure d'essai à la touche

La procédure d'essai à la touche comprend les opérations suivantes:

- a) Dissoudre 0,4 g de 1,5-diphénylcarbazine (B.3.a) dans un mélange de 20 ml d'acétone (B.3.d) et de 20 ml d'éthanol (à une fraction volumétrique de 96 %), B.3 e). Après dissolution, ajouter 20 ml d'une solution d'acide orthophosphorique (B.3.f) à une fraction massique de 75 % et 20 ml d'eau (B.3 g). Préparer cette solution au plus tard 8 h avant utilisation.
- b) Pour un échantillon à plaquage métallique, placer 1 à 5 gouttes de solution d'essai (préparée en B.5.1.a) sur sa surface. Si du chrome hexavalent est présent, une couleur rouge à violet apparaît en quelques minutes. Le résultat de l'essai est considéré positif. Dans le cas contraire, il est considéré négatif. Le changement de couleur ou un résultat d'essai positif peut être confirmé en appliquant les procédures décrites en B.5.1.d), 4^e et 5^e puces. Ignorer toute couleur qui apparaît ultérieurement, par exemple au séchage.

Dans le cas d'un échantillon qui est une pièce de fixation, par exemple une petite vis, placer ledit échantillon dans un petit conteneur, tel qu'un tube à essai, et ajouter dans le conteneur 1 à 5 gouttes de solution d'essai (préparée en B.5.1.a). Si du chrome hexavalent est présent, une couleur rouge à violet apparaît en quelques minutes. Il est plus facile d'observer la couleur de la solution d'essai en enlevant l'échantillon de fixation du conteneur et en plaçant ce dernier sur un fond blanc.

- c) Si le résultat de l'essai est positif, la couche de revêtement de l'échantillon est considérée contenir du chrome hexavalent. Aucune autre analyse n'est nécessaire.
- d) Si le résultat de l'essai est négatif, les opérations suivantes doivent être exécutées:
 - Choisir sur la surface du placage métallique de l'échantillon une zone non soumise à l'essai ou un autre échantillon de fixation du même type. Frotter légèrement au papier abrasif, tel qu'un SiC de grain 800 pour gratter la surface au chromate éventuellement réduite, mais sans en retirer toutefois complètement la couche de revêtement.
 - Répéter B.5.b sur la surface nouvellement frottée. Si le résultat de l'essai est positif, la couche de revêtement de l'échantillon est considérée contenir du chrome hexavalent.
 - Si le résultat de l'essai est de nouveau négatif, répéter d'abord la première partie de l'étape B.5.d avec plus de force pour gratter plus profondément la couche de revêtement et répéter la seconde partie de B.5.d. Si le résultat d'essai demeure négatif alors que le substrat est atteint, l'échantillon est considéré se situer en dessous de la limite de détection du chrome hexavalent au moment de l'essai.
 - Si la couleur obtenue au cours de l'essai est difficile à évaluer pour l'analyste, placer une goutte de solution étalon de $K_2Cr_2O_7$ (contenant 1 mg/kg de Cr, tel que préparée en B.3.c) sur un substrat nu nouvellement poli et la mélanger à une goutte de solution d'essai (préparée au cours de la procédure B.5.1.a). Une autre méthode consiste à mélanger, à parts égales, la solution étalon de $K_2Cr_2O_7$ (1 mg/kg de Cr, telle que préparée en B.3.c) et la solution d'essai (préparée au cours de la procédure B.5.1.a) dans un petit conteneur, par exemple un tube à essai.
 - Comparer la couleur obtenue à partir de l'échantillon avec la couleur obtenue à partir de la solution étalon de $K_2Cr_2O_7$. Si la couleur obtenue à partir de l'échantillon est la même ou est plus rouge que la couleur obtenue à partir de la solution étalon, le résultat d'essai à la touche est positif pour l'échantillon. Si la couleur obtenue à partir de l'échantillon est claire (pas de couleur), le résultat d'essai est négatif. Si la couleur obtenue à partir de l'échantillon est moins rouge que la couleur obtenue à partir de la solution étalon, mais n'est pas claire, passer à B.5.2.

- Un résultat positif de l'essai à la touche indique la présence de Cr(VI) dans le revêtement. La concentration de Cr(VI) détectée dans la solution d'essai à la touche est supérieure ou égale à 1 mg/kg. Cependant, cette valeur ne doit pas être interprétée comme étant la concentration de Cr(VI) dans la couche de revêtement de l'échantillon et ne doit pas être utilisée comme limite de détection de la méthode pour cet essai qualitatif.
- e) A des fins de comparaison, soumettre le substrat de l'échantillon à l'essai de la même façon. Le substrat de l'échantillon peut être atteint en retirant toutes les couches de revêtement de la surface de l'échantillon, par exemple par abrasion au papier de verre ou à la lime, ou en découpant la couche avec des solutions acides.
- f) Lorsque l'essai à la touche donne un résultat négatif ou lorsque l'analyste n'est pas certain du résultat obtenu avec l'essai à la touche, la procédure d'extraction à l'eau bouillante définie en B.5.2 doit être utilisée pour vérifier le résultat.

B.5.2 Procédure d'extraction à l'eau bouillante

- a) La solution d'essai préparée en B.5.1.a peut être utilisée directement dans cette procédure. Une autre solution d'essai, de durée de conservation plus longue, peut également être utilisée dans cette procédure. Préparer la solution de remplacement de la manière suivante: dissoudre 0,5 g de diphénylcarbazine (B.3.a) dans 50 ml d'acétone (B.3.d). Diluer lentement, tout en remuant, avec 50 ml d'eau (B.3.g) (un mélange rapide peut entraîner la précipitation du diphénylcarbazine). Pour une stabilité maximale, stocker cette solution d'essai dans une bouteille de verre ambre, placée dans un endroit réfrigéré. Jeter la solution lorsqu'elle se décolore.
- b) La surface de l'échantillon à soumettre à l'essai doit être égale à $50 \text{ cm}^2 \pm 5 \text{ cm}^2$. Pour les petites pièces, par exemple des fixations, ou pour des échantillons de forme irrégulière, utiliser un nombre approprié d'échantillons pour obtenir l'aire totale requise, à savoir $50 \text{ cm}^2 \pm 5 \text{ cm}^2$.

NOTE 1 Pour un échantillon de forme complexe, l'aire peut être estimée en fonction de ses spécifications de fabrication si elles sont disponibles ou en utilisant ses dimensions et sa forme. Par exemple: une vis fraisée à tête plate peut être considérée comme un cylindre métallique (le corps de la vis) adjacent à un cône métallique (la tête de la vis).

Aire estimée du corps de la vis:

$$S_b = 2\pi R_b H_b + 2\pi (R_b)^2 \quad (\text{B.1})$$

où

S_b est l'aire estimée du corps de la vis;

R_b est le rayon du corps de la vis;

H_b est la hauteur du corps de la vis.

Aire estimée de la tête de la vis:

$$S_h = \pi(R_c + R_b)H_h + \pi R_c^2 \quad (\text{B.2})$$

où

S_h est l'aire estimée du corps de la vis;

R_c est le rayon supérieur de la tête de la vis;

H_h est la hauteur de la tête de la vis.

Aire totale estimée de la vis:

$$S_t = S_h + S_b - 2\pi(R_b)^2 \quad (\text{B.3})$$

où

S_t est l'aire totale estimée de la vis.

NOTE 2 Pour certaines petites pièces électroniques, il peut être difficile d'obtenir une aire totale de $50 \text{ cm}^2 \pm 5 \text{ cm}^2$. Dans ce cas, il est admis d'utiliser une surface totale de l'échantillon réduite, le facteur de dilution étant ajusté en conséquence. Il convient que l'ajustement effectué soit consigné dans le rapport d'analyse.

- c) Chauffer à ébullition 50 ml d'eau (B.3.g) dans un bécher adéquat (avec graduation de volume) (B.2.d) et immerger entièrement l'(les) échantillon(s) dans le bécher B.2.d). Couvrir le bécher (B.2.d) avec un verre de montre (B.3.d). Lessiver pendant 10 min \pm 0,5 min pendant que l'eau continue à bouillir. Enlever l'(les) échantillon(s) et laisser refroidir le bécher (B.2.d) et son contenu à la température ambiante. Si de l'eau s'évapore, compléter le niveau avec de l'eau (B.3.g) pour obtenir de nouveau 50 ml. Si la solution est laiteuse ou présente un précipité, la filtrer à travers un filtre à membrane (B.2.i) dans un bécher sec (B.2.d). Ajouter 1 ml de solution d'acide orthophosphorique (8.3.f) et bien mélanger. Verser la moitié de la solution (environ 25 ml) dans une autre bécher sec (B.2.d). Ajouter 1 ml de solution d'essai (B.5.1.a ou B.5.2.a) dans l'un des deux béchers (B.2.d), mélanger et observer la couleur par rapport à la solution placée dans l'autre bécher (B.2.d), qui sert de témoin. Une couleur rouge indique la présence de Cr(VI).
- d) Si la couleur obtenue au cours de l'essai est difficile à évaluer pour l'analyste, transvaser une partie de la solution dans une cellule d'absorption de 1 cm (B.2.c). Après un temps de réaction de 2 min, mesurer l'absorbance à 540 nm par rapport au témoin, en utilisant un instrument colorimétrique (B.2.c). Effectuer trois mesures et calculer la moyenne comme étant l'absorbance finale de l'échantillon.
- e) Diluer 1 ml de solution étalon de $K_2Cr_2O_7$ (contenant 1 mg/kg de Cr, préparée comme indiqué en B.3.c) dans 50 ml d'eau (B.3.g). Ajouter 1 ml de solution d'acide orthophosphorique (B.3.f) et bien mélanger. Ajouter 2 ml de solution d'essai (B.5.1.a ou B.5.2.a), mélanger et mesurer trois fois l'absorbance comme précédemment. Calculer la moyenne des trois mesures comme étant l'absorbance finale de la solution étalon.
- f) Si la valeur d'absorbance obtenue en B.5.2.d est supérieure ou égale à celle obtenue en B.5.2.e, l'échantillon est considéré comme positif pour le Cr(VI). Dans le cas contraire, le résultat est négatif.
- g) Un résultat positif de l'essai d'extraction à l'eau bouillante indique la présence de Cr(VI). La concentration de Cr(VI) détectée dans la solution d'extraction à l'eau bouillante est supérieure ou égale à 0,02 mg/kg pour une aire d'échantillon de 50 cm². Cependant, cette valeur ne doit pas être interprétée comme étant la concentration de Cr(VI) dans la couche de revêtement de l'échantillon et ne doit pas être utilisée comme limite de détection de la méthode pour cet essai qualitatif.

B.6 Evaluation de la méthode

Le principe de cette méthode a été évalué et étayé par deux études internationales inter-laboratoires (IIS) organisées par le GT3 du CE 111 de la CEI. Les études se sont concentrées sur la détection de la présence de Cr(VI) dans les revêtements de protection anticorrosion des échantillons métalliques. Quatorze laboratoires internationaux ont participé à la première étude et douze à la seconde étude.

Dans cette méthode, les solutions étalons de comparaison de Cr(VI), à savoir 0,5 mg/kg pour les procédures d'essai à la touche et 0,02 mg/kg pour les procédures d'extraction à l'eau bouillante, ont été confirmées suite aux résultats des deux IIS. Des solutions étalons de comparaison différentes peuvent également être trouvées dans une autre ou dans d'autres méthodes normalisées relatives au Cr(VI), par exemple l'EN 15205:2006^[49] qui utilise un seuil de 0,1 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ comme comparaison qualitative et au-dessus duquel un échantillon est considéré contenir du Cr(VI). Ce seuil n'a pas été évalué dans le cadre de la présente méthode. De même, on note que des unités différentes sont utilisées dans les différentes méthodes.

Annexe C (informative)

Détermination du chrome hexavalent (Cr VI) dans des polymères et des produits électroniques par la méthode colorimétrique

C.1 Présentation

La présente méthode décrit des procédures de mesure quantitative du chrome hexavalent, Cr(VI), dans des échantillons de polymères et de composants électroniques. La présente méthode utilise des procédures de digestion alcaline pour extraire le chrome hexavalent des échantillons. Des études ont montré que la solution alcaline est plus efficace que la solution acide pour extraire le Cr(VI) d'échantillons solubles et insolubles dans l'eau. La solution d'extraction alcaline produit la réduction minimale du Cr(VI) natif en Cr(III) ou l'oxydation du Cr(III) natif en Cr(VI).

La solution d'extraction alcaline est un mélange de 0,28 mol/l de Na_2CO_3 et de 0,5 mol/l de NaOH. Un échantillon cible est digéré dans la solution à une température de 90 °C à 95 °C pendant 3 h. La concentration de Cr(VI) dans l'extrait est déterminée par sa réaction dans des conditions acides au 1,5-diphénylcarbazine. Le Cr(VI) est réduit en Cr(III) lors de la réaction au diphénylcarbazine qui est oxydé en diphénylcarbazine. Le Cr(III) et le diphénylcarbazine forment de plus un complexe rouge-violet dans la réaction. La solution complexe est mesurée quantitativement par un colorimètre ou un spectrophotomètre à 540 nm.

Pour retarder l'activité chimique du chrome hexavalent, les échantillons et les extraits doivent être stockés avant analyse dans les conditions ambiantes présentant une humidité relative de 45 % à 75 % et une température de 15 °C à 35 °C. La stabilité du Cr(VI) dans les extraits n'étant pas parfaitement connue, les analyses doivent être effectuées aussi rapidement que possible après l'extraction.

Une étude internationale inter-laboratoires organisée au cours de l'élaboration de la présente méthode, a révélé que l'extraction du Cr(VI) est grandement affectée par la matrice de l'échantillon. L'adéquation de cette méthode est par conséquent variable et dépend de la composition spécifique de la matrice de l'échantillon soumis à l'essai. Chaque échantillon doit être évalué par la procédure de dopage de la matrice décrite en C.4.5.2 afin de déterminer si la méthode est applicable à l'échantillon cible et si le résultat de l'analyse doit être ajusté en fonction du taux de rétablissement de la matrice dopée. Les résultats d'études inter-laboratoires suggèrent que la présente méthode convient pour certains types d'échantillons polymères, y compris le polychlorure de vinyle (PVC) et l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS). Elle ne convient toutefois pas pour un copolymère éthylène – acétate de vinyle/polyéthylène (EVA/PE).

Une approche pratique de mesure quantitative du Cr total, y compris Cr(VI), dans des échantillons de polymères et de composants électroniques, consiste à utiliser des méthodes utilisant le plasma à couplage inductif (ICP), similaires à celles décrites aux Articles 8 à 10. Cependant, la méthode ICP ne peut pas détecter sélectivement le Cr(VI); elle détermine la quantité de Cr total dans toutes ses formes chimiques dans les échantillons.

Des interférences potentielles peuvent être causées par la réduction du chrome hexavalent, l'oxydation du chrome trivalent ou encore par une interférence de couleur dans la mesure colorimétrique. Les paramètres d'interférences peuvent inclure, de manière non limitative, le pH, le fer ferreux, le sulfure, le molybdène hexavalent et les sels de mercure.

Tous les échantillons et réactifs utilisés dans cette méthode et susceptibles de contenir du Cr(VI) doivent être manipulés avec les précautions appropriées. Les solutions ou les déchets contenant du Cr(VI) doivent être éliminés de manière appropriée. Par exemple, l'acide

ascorbique ou certains autres agents réducteurs peuvent être utilisés pour réduire le Cr(VI) en Cr(III).

C.2 Appareillage, équipements et matériaux

C.2.1 Appareils

- a) Appareil de filtration sous vide
- b) Dispositif de chauffage et de mélange capable de maintenir la solution de digestion à des températures comprises entre 90 °C et 95 °C et d'assurer un brassage en continu. Un barreau magnétique, revêtu de polytétrafluoréthylène (PTFE) peut être utilisé pour des échantillons polymères. Cependant, il n'est pas recommandé pour les échantillons ferromagnétiques comme il en existe souvent dans les échantillons métalliques et électroniques. Dans ce cas, il est recommandé d'utiliser un agitateur horizontal à arbre et ailettes en polytétrafluoréthylène (PTFE).
- c) Un pH-mètre étalonné pour lire le pH sur une plage de 0 à 14 avec une précision de $\pm 0,03$ unité de pH.
- d) Balance d'analyse d'une précision de mesure de 0,1 mg.
- e) Thermomètre, thermistance ou autre dispositif de mesure de la température capable de mesurer jusqu'à 100 °C.
- f) Instrument colorimétrique: un spectrophotomètre pour une utilisation à 540 nm, générant un trajet optique de 1 cm ou plus, ou un photomètre à filtre, générant un trajet optique de 1 cm ou plus et muni d'un filtre jaune verdâtre ayant une transmittance maximale à proximité de 540 nm.
- g) Broyeur, avec ou sans refroidissement à l'azote liquide, capable de broyer des échantillons polymères et des composants électroniques.

C.2.2 Equipement

- a) Matériel de laboratoire: tous les ustensiles en verre de laboratoire réutilisables (verre, quartz, polyéthylène, polytétrafluoréthylène (PTFE), etc.), y compris les conteneurs d'échantillons, doivent être trempés toute une nuit dans un mélange d'eau et de détergent de qualité de laboratoire (C.3.n), rincés à l'eau (C.3.n). Ils doivent ensuite séjourner pendant 4 h dans un mélange d'acides dilués HNO₃ et HCl (HNO₃:HCl:H₂O = 1:2:9 en volume), puis être rincés dans de l'eau (C.3.n). D'autres procédures de nettoyage sont autorisées à condition que la propreté voulue puisse être prouvée par l'analyse de témoins.
- b) Flacons volumétriques et bouteilles graduées: Matériel en verre de Classe A, 1 000 ml et 100 ml, avec bouchons, ou équivalent de précision et d'exactitude acceptables. Un autre équipement volumétrique, par exemple des appareils automatiques de dilution, de justesse et d'exactitude acceptables, peut être utilisé.
- c) Assortiment de pipettes étalonnées de justesse et de précision acceptables.
- d) Récipient de digestion: bécher en verre au borosilicate ou en quartz approprié, avec graduation de volume de 250 ml ou équivalent.
- e) Membranes de filtres (0,45 µm): de préférence, des membranes cellulosiques ou en polycarbonate.
- f) Cartouche filtrante à seringue C18.

C.3 Réactifs

- a) Acide nitrique: $\rho(\text{HNO}_3) = 1,40$ g/ml, à une fraction massique de 65 %, de qualité réactif d'analyse ou de qualité spectroscopique. Conserver dans l'obscurité à une température de 20 °C à 25 °C. Ne pas utiliser du HNO₃ concentré s'il a une couleur jaune. Cette couleur indique une photoréduction du NO₃ – en NO₂, qui est un agent de réduction pour le Cr(VI).

- b) Carbonate de sodium: Na_2CO_3 , anhydre, de qualité réactif d'analyse. Conserver à une température de 20 °C à 25 °C dans un conteneur hermétiquement fermé.
- c) Hydroxyde de sodium: NaOH , de qualité réactif d'analyse. Conserver à une température de 20 °C à 25 °C dans un conteneur hermétiquement fermé.
- d) Chlorure de magnésium: MgCl_2 , (anhydre), de qualité réactif d'analyse. Une masse de 400 mg de MgCl_2 équivaut environ à 100 mg de Mg_2^+ . Conserver à une température de 20 °C à 25 °C dans un conteneur hermétiquement fermé.
- e) Tampon au phosphate: Pour préparer une solution tampon ayant un pH 7, dissoudre 87,09 g de K_2HPO_4 (de qualité réactif d'analyse) et 68,04 g de KH_2PO_4 (de qualité réactif d'analyse) dans 700 ml d'eau (C.3.n). Transvaser dans un flacon volumétrique de 1 l (C.2.2.a) et diluer au volume. La solution obtenue contiendra 0,5 mol/l de K_2HPO_4 et 0,5 mol/l de KH_2PO_4 .
- f) Chromate de plomb: PbCrO_4 , de qualité réactif d'analyse. Conserver à une température de 20 °C à 25 °C dans un conteneur hermétiquement fermé. Il s'agit de l'agent de dopage de la matrice solide.
- g) Solution de digestion: Dissoudre 20,0 g \pm 0,05 g de NaOH et 30,0 g \pm 0,05 g de Na_2CO_3 dans de l'eau (C.3.n) dans un flacon volumétrique de 1 l (C.2.2.a) et diluer jusqu'au repère. Conserver la solution dans une bouteille en polyéthylène fermée hermétiquement, à une température de 20 °C à 25 °C, et préparer une solution neuve chaque mois. Le pH de la solution de digestion doit être vérifié avant utilisation. Si le pH est <11,5, rebuter la solution et en préparer une nouvelle.
- h) Solution mère de dichromate de potassium: Dissoudre 141,4 mg de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ sec, (de qualité réactif d'analyse), dans de l'eau (C.3.n) et diluer dans 1 l dans un flacon volumétrique (C.2.2.a) (1 ml contient 50 µg de Cr).
- i) Solution étalon de dichromate de potassium: Diluer 10 ml de solution étalon de dichromate de potassium (C.3.h) dans de l'eau (C.3.n), puis diluer dans 100 ml dans un flacon volumétrique (C.2.2.a) (1 ml contient 5 µg de Cr).
- j) Acide sulfurique, à une fraction volumétrique de 10 %: Diluer 10 ml de H_2SO_4 ml, de qualité réactif distillé ou spectrograde, dans 100 ml d'eau (C.3.n) et placer la solution dans un flacon volumétrique (C.2.2.a).
- k) Solution de diphénylcarbazide: Dissoudre 250 mg de 1,5-diphénylcarbazide dans 50 ml d'acétone (C.3.o). Conserver dans une bouteille marron. Avant utilisation, vérifier que la solution n'est pas décolorée. Si la solution se décolore, la rebuter et en préparer une nouvelle.
- l) Dichromate de potassium, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, solution de dopage (1 000 mg/l Cr(VI)): Dissoudre 2,829 g de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ sec (105 °C) dans de l'eau (C.3.n) dans un flacon volumétrique de 1 l (C.2.2.a), et diluer jusqu'au repère. Une solution étalon certifiée de 1 000 mg/l Cr(VI) peut également être utilisée. Conserver pour utilisation dans les six mois à une température de 20 °C à 25 °C dans un conteneur hermétiquement fermé.
- m) Dichromate de potassium, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, solution de dopage de la matrice (100 mg/l Cr(VI)): Ajouter 10,0 ml de la solution de 1 000 mg/l de Cr(VI), réalisée à partir de la solution de dopage de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (C.2.3. l), dans un flacon volumétrique de 100 ml (C.2.2 a) et diluer au volume à l'eau (C.3 n). Bien mélanger.
- n) Eau: Eau de qualité 1 spécifiée dans l'ISO 3696, qui doit être exempte d'interférences.
- o) Acétone, qualité réactif d'analyse.

C.4 Préparation des échantillons

Les échantillons doivent être collectés et conservés à l'aide de dispositifs et de conteneurs qui ne comportent pas d'acier inoxydable.

Avant digestion, les échantillons polymères et les composants électroniques doivent être broyés en une poudre fine (C.2.1.g), de sorte que 100 % du matériau passe à travers un tamis de 250 µm, par exemple un tamis de la norme ASTM #60.

C.5 Procédure d'essai

C.5.1 Extraction

- a) Peser avec exactitude un échantillon de 2,5 g. Placer l'échantillon dans un récipient de digestion propre (C.2.2 d).

NOTE 1 D'autres quantités d'échantillons peuvent être utilisées dans le cas de concentrations de Cr(VI) potentiellement très basses ou très élevées.

- b) Afin de vérifier le rétablissement dans chaque matrice, peser avec exactitude un second échantillon de 2,5 g (ou une autre quantité choisie d'échantillons) et le placer dans un second récipient de digestion propre (C.2.2.d). Sélectionner une solution de dopage (C.3.l) ou C.3.m) et l'ajouter directement à l'échantillon.
- c) Ajouter à chaque échantillon 50 ml de solution de digestion (C.3.g) mesurés avec une bouteille graduée (C.2.2.a).
- d) Ajouter ensuite 400 mg de $MgCl_2$ dissous dans 0,5 ml de tampon au phosphate à 1,0 mol/l (C.3.e) à chaque échantillon. Ajouter du $MgCl_2$ à la solution n'est pas obligatoire si les techniques d'analyse utilisées peuvent corriger l'oxydation/réduction du chrome éventuellement induite par la méthode.

NOTE 2 Pour les échantillons polymères qui semblent «flotter» à la surface de la solution de digestion, 1 ou 2 gouttes d'agent mouillant (par exemple «Triton X») peuvent être ajoutées à ce moment-là pour augmenter le mouillage de l'échantillon pendant la digestion. Couvrir tous les récipients de digestion avec des verres de montre ou des couvercles en plastique.

- e) Chauffer les échantillons à une température de 90 °C à 95 °C, en agitant continuellement (C.2.1.b). Maintenir ensuite les échantillons à une température de 90 °C à 95 °C pendant au moins 3 h tout en les agitant de manière constante. Après 3 h, laisser refroidir à température ambiante en continuant à agiter les échantillons.
- f) Filtrer à travers un filtre à membrane de 0,45 μm (C.2.2.e). Rincer le récipient de digestion (C.2.2.d) trois fois avec de l'eau (C.3.n); la solution de rinçage étant ajoutée au filtre (C.2.2.e). Si le filtre à membrane de 0,45 μm est obstrué, un papier filtre à pores larges peut être utilisé pour préfiltrer les échantillons.
- g) Rincer l'intérieur du flacon à filtre et le disque filtrant (C.2.2.e) à l'eau (C.3.n) et transvaser le filtrat ainsi que les rinçures dans un récipient propre de 250 ml (C.2.2.a). Conserver les matières solides recueillies sur le filtre (C.2.2.e) pour une utilisation éventuelle lors de l'évaluation des faibles rétablissements des matrices dopées de Cr(VI). Conserver les matières solides filtrées à 4 °C \pm 2 °C.
- h) Tout en remuant constamment et en surveillant le pH, ajouter au goutte à goutte une solution de HNO_3 (C.3.a) au récipient de 250 ml (C.2.2.a). Ajuster le pH de la solution à $7,5 \pm 0,5$. Enlever le dispositif agitateur (C.2.1.b) et rincer en recueillant le produit du rinçage dans le bécher (C.2.2 a). Transvaser quantitativement le contenu du récipient dans un flacon volumétrique de 100 ml (C.2.2.a) et compléter jusqu'au repère avec de l'eau (C.3.n). Bien mélanger. La matière digérée peut à présent être analysée.

C.5.2 Développement et mesure de la couleur

- a) Transvaser 95 ml de la matière digérée à soumettre à l'essai dans un récipient propre de 100 ml (C.2.2.a). Ajouter lentement la solution de H_2SO_4 (C.3. j) et ajuster le pH de la solution à $2,0 \pm 0,5$. Si la solution est claire passer au C.5.2.d. Si la solution est trouble, qu'elle comporte un précipité floculant (nébuleux, floconneux et non cristallin), ou si une couleur est présente, passer à C.5.2.b.
- b) Si la solution est trouble ou si des précipités floculants sont présents, filtrer l'échantillon dans un filtre à membrane de 0,45 μm (C.2.2.e) ou dans un filtre papier à débit lent. Si une couleur est présente dans la solution d'échantillon, la filtrer avec une cartouche à seringue C18 (C.2.2.f) avant d'ajouter la solution de diphénylcarbazine (C.3.k). Si la matière digérée est claire après chaque étape de filtration, passer à C.5.2.d. Si la matière digérée est colorée ou trouble après chaque étape de filtration, passer à C.5.2 c.
- c) Transvaser quantitativement chacune des matières digérées troubles dans un flacon volumétrique de 100 ml (C.2.2.a) et compléter au volume avec de l'eau (C.3.n). Retourner plusieurs fois le flacon pour mélanger. Retirer environ 5 ml du flacon et noter la valeur

d'absorbance après mise à zéro de l'instrument UV (C.2.1.f) avec l'étalon de 0,0 µg/ml. Ajouter 2,0 ml de la solution de diphénylcarbazine (C.3.k) à chacune des solutions de digestion troubles, mélanger et ajuster les volumes des échantillons à 100 ml avec de l'eau (C.3.n). Retourner plusieurs fois le flacon pour mélanger et laisser reposer 5 min à 10 min pour que la couleur se développe pleinement. Passer à C.5.2.d).

- d) Transvaser quantitativement le contenu du récipient dans un flacon volumétrique de 100 ml (C.2.2.a), ajouter 2,0 ml de solution de diphénylcarbazine (C.3.k) et ajuster le volume de l'échantillon à 100 ml avec de l'eau (C.3.n). Retourner plusieurs fois le flacon pour mélanger et laisser reposer 5 min à 10 min pour que la couleur se développe pleinement.
- e) Transvaser une partie appropriée de la solution dans une cellule d'absorption de 1 cm et mesurer son absorbance à 540 nm à l'aide d'un instrument colorimétrique (C.2.1.f).
- f) Corriger l'absorbance de l'échantillon en soustrayant l'absorbance d'un témoin passé par les procédures de développement de la couleur. Pour les solutions filtrées en C.5.2.b), corriger l'absorbance en soustrayant la valeur de l'absorbance relevée en C.5.2.c).
- g) A partir de l'absorbance corrigée, déterminer la concentration de Cr(VI) présent en se référant à la courbe d'étalonnage.

C.5.3 Préparation de la courbe d'étalonnage

- a) Prélever, à l'aide d'une pipette, la solution étalon de chrome (C.3.i) en volumes mesurés pour la transvaser dans des flacons volumétriques de 10 ml (C.2.2.a) et créer des concentrations allant de 0,1 mg/l à 5,0 mg/l de Cr(VI) dilué au volume. Préparer une solution témoin et au minimum trois solutions étalons.

NOTE Il est admis d'utiliser une autre plage de concentration des solutions étalons si la concentration de Cr(VI) dans la solution d'échantillon se trouve en dehors des limites de la courbe d'étalonnage initiale. Les solutions d'échantillon peuvent également être diluées si elles sont plus concentrées que la solution étalon la plus élevée.

- b) Développer la couleur des solutions étalons comme pour les échantillons sur la base de la procédure décrite en C.5.2.
- c) Transvaser une partie appropriée de la solution vers une cellule d'absorption de 1 cm et mesurer l'absorbance à 540 nm à l'aide d'un instrument colorimétrique (C.2.1.f).
- d) Corriger l'absorbance en soustrayant l'absorbance d'un témoin passé par la procédure de développement de la couleur.
- e) Construire une courbe d'étalonnage en traçant les valeurs d'absorbance corrigées par rapport à la concentration de Cr(VI). Une régression linéaire ou une adaptation quadratique peuvent être appliquées pour établir la courbe d'étalonnage. Le coefficient de corrélation (R^2) de la courbe doit être $>0,99$ ou une nouvelle courbe d'étalonnage doit être établie.

C.5.4 Calcul des résultats de l'analyse

- a) Concentration de Cr(VI) (µg/g) dans l'échantillon total:

$$C = \frac{A \times D \times F}{S} \quad (\text{C.1})$$

où

C est la concentration de Cr(VI), exprimée en (µg/g);

A est la concentration observée dans la matière digérée, exprimée en (µg/ml);

D est le facteur de dilution;

F est le volume final de la matière digérée, exprimé en ml;

S est la masse de l'échantillon initial, exprimée en g.

- b) Différence relative en pourcentage:

$$R = \frac{|S - D|}{0,5 \times (S + D)} \times 100 \quad (\text{C.2})$$

où

R est la différence relative en pourcentage, exprimée en %;

S est la concentration de Cr(VI) de l'échantillon observé dans l'essai initial, exprimée en µg/g;

D est la concentration de Cr(VI) de l'échantillon observé dans l'essai dupliqué, exprimée en µg/g.

NOTE 1 Un calcul similaire, présenté en (C.4.4.a), peut également être utilisé pour obtenir les concentrations de Cr(VI) dans l'essai initial et les essais dupliqués.

c) Rétablissement de la solution de dopage:

$$SR = \frac{SS - US}{SA} \times 100 \quad (C.3)$$

où

SR est le pourcentage de rétablissement de la solution de dopage, en %;

SS est la concentration de Cr(VI) dans l'échantillon dopé, en µg/g;

US est la concentration de Cr(VI) dans l'échantillon non dopé, en µg/g;

SA est la concentration de Cr(VI) utilisée dans la solution de dopage, en µg/g.

NOTE 2 Un calcul similaire, présenté en (C.5.4.a), peut également être utilisé pour obtenir les concentrations de Cr(VI) dans l'échantillon dopé/non dopé.

C.5.5 Contrôle de la qualité

C.5.5.1 Méthode générale

Les échantillons doivent être analysés en lots d'au maximum 20 échantillons comportant tous les échantillons, les éventuels témoins, essais dupliqués et essais de rétablissement de la solution de dopage. Au minimum un témoin par lot d'échantillons doit être préparé et soumis à l'essai pour déterminer la présence de contaminations ou d'effets de mémoire. Pour chaque lot, au moins un échantillon doit être préparé en double. Les résultats des échantillons dupliqués doivent présenter une différence relative ≤ 20 %; dans le cas contraire, le lot doit être analysé à nouveau. Un échantillon de contrôle de laboratoire doit être analysé à une fréquence de un par lot. Un échantillon de contrôle doit être préparé selon l'une des méthodes suivantes:

- utiliser la solution de dopage de la matrice (C.3.m) pour doper 50 ml de la solution de digestion (préparée en C.3.h) réalisée à partir d'un matériau d'échantillon; ou
- utiliser l'agent de dopage de la matrice solide PbCrO₄ (C.3.f) pour doper 50 ml de la solution de digestion (préparée en C.3.h). Un rétablissement acceptable doit s'inscrire dans une plage de 80 % à 120 %; dans le cas contraire, le lot d'échantillons doit être analysé à nouveau.

C.5.5.2 Méthode de correction du taux de rétablissement de la matrice dopée

La présente méthode d'essai étant sujette à des effets de matrice relativement importants, il est nécessaire de démontrer que le rétablissement de la matrice dopée, pour chaque échantillon, a une origine unique. L'origine unique signifie l'une des circonstances suivantes: client différent (même si le même polymère est utilisé comme échantillon préalable); lot de production différent (même si le même polymère est utilisé comme échantillon préalable); polymère différent; additifs différents (même si le même polymère est utilisé comme échantillon préalable); ainsi que tous les autres cas de modifications de l'origine de l'échantillon. L'essai de rétablissement de la matrice dopée commence par un dopage de l'échantillon avant digestion, réalisé pendant la digestion et le développement de la couleur.

- Un échantillon de dopage de la matrice de pré-digestion doit être analysé pour chaque échantillon unique. Choisir l'une des deux options suivantes:

- Doper l'échantillon avec 1,0 ml de solution de dopage de la matrice (C.3.m) ou à deux fois la concentration de l'échantillon, selon la valeur la plus grande.
 - Doper l'échantillon en pesant avec exactitude au minimum 1,0 mg de PbCrO_4 (C.3.f) ou suffisamment de PbCrO_4 pour doubler la concentration de l'échantillon, selon la valeur la plus grande.
- b) Soumettre l'échantillon dopé aux procédures de digestion et de mesure colorimétrique, en commençant au C.4.1.
 - c) La plage admissible de rétablissement de la matrice dopée doit être comprise entre 0 % et 125 %; dans le cas contraire, l'échantillon doit être analysé à nouveau. Dans le cas d'un rétablissement <10 %, doubler la quantité de solution de dopage de la matrice pour effectuer une nouvelle analyse. Dans le cas d'un rétablissement >125 %, recommencer l'analyse avec la même quantité de solution de dopage. Si le rétablissement obtenu dans la nouvelle analyse se situe toujours hors de la plage comprise entre 10 % et 125 %, la méthode est considérée non applicable à l'échantillon analysé et il n'est pas possible de rendre compte du résultat.
 - d) Si le rétablissement est >75 % ou <125 %, le résultat pour l'échantillon et la LOD ne doivent pas être corrigés.
 - e) Si le rétablissement pour un échantillon donné se situe entre 10 % et 75 %, à la fois le résultat et la limite de détection (LOD) (voir Article C.6) pour l'échantillon doivent être corrigés en fonction du rétablissement. Ce qui signifie que le résultat doit être multiplié par le rapport (100 %/taux de rétablissement de la solution de dopage). Multiplier ensuite la LOD estimée pour la méthode par le même rapport.
 - f) Si le résultat de l'essai de l'échantillon corrigé comme indiqué en C.5.5.2.e) est supérieur à la LOD estimée, corrigée comme indiqué en C.5.5.2.e), consigner le résultat d'essai corrigé dans le rapport d'essai. Dans le cas contraire, relever la valeur corrigée de la LOD comme étant le résultat pour cet échantillon.

EXEMPLE Si l'on suppose une LOD estimée de 2 $\mu\text{g/g}$ de Cr(VI) de l'échantillon et un taux de rétablissement de la matrice dopée de 50 % pour un échantillon donné, la LOD corrigée pour cet échantillon d'essai = $2 \mu\text{g/g} \times (100 \%/50 \%) = 4 \mu\text{g/g}$. Si le résultat de l'essai est 100 $\mu\text{g/g}$, le résultat de l'essai corrigé = $100 \mu\text{g/g} \times (100 \%/50 \%) = 200 \mu\text{g/g}$. Dans ce cas, le résultat consigné est de 200 $\mu\text{g/g}$.

C.6 Détermination de la limite de détection de la méthode et de la limite de quantification

L'Article 4 donne une description générale des limites de détection de la méthode et des limites de quantification. La procédure expérimentale suivante est effectuée pour déterminer la limite de détection de la méthode ainsi que la limite de quantification pour le chrome hexavalent (Cr(VI)) dans les polymères et les produits électroniques.

- a) Peser exactement 2,5 g d'un échantillon de polymère ou de produit électronique broyé (voir Article C.4) dont on sait qu'il ne contient pas de chrome hexavalent (par exemple matériau de référence VDA de l'IRMM) ou d'autres composants susceptibles d'interférer avec l'analyse, et le placer dans un bêcher de 250 ml (C.2.2.a). Répéter cette étape au minimum 5 fois.
- b) Doper chaque bêcher (C.2.2.a) avec 10 μg de Cr(VI) en utilisant 10 μl de la solution de dopage de la matrice (voir C.3.m).
- c) Se conformer à la procédure d'essai décrite en C.5.1 (à l'exclusion de (C.5.1.b), C.5.2 et C.5.3).
- d) Calculer la concentration de Cr(VI) ($\mu\text{g/g}$) comme indiqué en (C.5.4.a) et déterminer le taux de rétablissement en pourcentage du Cr(VI) dopé pour chacun des échantillons.

$$SR = \frac{C \times M}{SA} \times 100 \quad (\text{C.4})$$

où

SR est le taux de rétablissement en % du Cr(VI) dopé;

C est la concentration mesurée en µg/g;

M est la masse de l'échantillon, en g;

SA est la quantité de dopage (10 µg).

- Le taux de rétablissement du Cr(VI) doit se situer entre 70 % et 125 % pour chacun des échantillons. Si le taux de rétablissement se situe hors de ces limites pour tout réplicat, l'ensemble de la procédure d'extraction et d'analyse doit être recommencé.

- e) La limite de détection de la méthode est obtenue en calculant l'écart-type, *s*, pour les différentes analyses des réplicats (au minimum 6). L'écart-type est alors multiplié par la valeur *t* de Student pour le nombre total de réplicats (*n*) pour *n*-1 degrés de liberté. Une liste des valeurs *t* de Student pour 6 à 10 réplicats est présentée dans le Tableau C.1.

EXEMPLE Pour 6 réplicats et 6 – 1 = 5 degrés de liberté, la valeur *t* serait 3,36.

NOTE Il convient que toutes les analyses servant au calcul d'une MDL soient réalisées consécutivement.

Tableau C.1 – Limite de détection de la méthode = $t \times s_{n-1}$

Nombre d'échantillons	Statistique <i>t</i> de student (confiance à 99 %)
6	3,36
7	3,14
8	3,00
9	2,90
10	2,82

- f) La limite de quantification est déterminée en multipliant la limite de détection de la méthode par un facteur de 5.

Les limites de détection de la méthode et les limites de quantification varient d'un laboratoire à l'autre. En général, une limite de détection de la méthode de 2 µg/g (limite de quantification de 10 µg/g) s'est révélée réalisable avec cette méthode.

C.7 Evaluation de la méthode

Une étude internationale inter-laboratoires (IIS) organisée par le GT3 du CE 111 de la CEI au cours de l'élaboration de cette méthode, a révélé que l'extraction du Cr(VI) était grandement affectée par la matrice de l'échantillon. L'adéquation de cette méthode est par conséquent variable et dépend de la composition spécifique de la matrice de l'échantillon soumis à l'essai. Les études ont présenté une large gamme de résultats pour trois types de polymère contenant des niveaux de Cr(VI) compris entre 250 µg/g et 1 100 µg/g. Les résultats de six laboratoires ont donné, pour un matériau en PVC, une reproductibilité allant jusqu'à un écart-type relatif de 3,9 % et un taux de rétablissement du Cr(VI) d'environ 70 %. Pour un matériau ABS mis à disposition en tant que matériau de référence certifié, la reproductibilité présentait un écart-type relatif d'environ 13 % et un taux de rétablissement du Cr(VI) d'environ 27 %. Les résultats pour un matériau EVA/PE n'ont présenté aucun taux de rétablissement mesurable.

Annexe D (informative)

Application pratique de détection par spectrométrie par fluorescence X (XRF)

D.1 Remarques préliminaires

La présente annexe donne des informations générales d'aide à l'application pratique de la méthode décrite précédemment. Certains fabricants peuvent fournir une Procédure Normalisée d'Utilisation (SOP) avec l'instrument. Le respect des recommandations contenues dans un tel document garantit à l'opérateur la meilleure qualité possible des résultats de l'analyse.

D.2 Effets de la matrice et des interférences

De manière générale, l'utilisateur de cette méthode est averti que des limites dues aux corrections des variations des interférences spectrales et de la matrice, d'un matériau à un autre, peuvent affecter significativement la sensibilité, la limite de détection ou l'exactitude de chaque analyte. La liste suivante présente les problèmes les plus courants:

- a) L'intensité du rayonnement caractéristique de l'élément dans l'échantillon est contrée par le processus de dispersion du rayonnement d'excitation qui contribue au fond spectral. De plus, deux effets majeurs se produisent:
- 1) Absorption du rayonnement d'excitation et du rayonnement de fluorescence par l'analyte et par les autres éléments (matrice) de l'échantillon.
 - 2) Excitation secondaire (activation) de l'analyte par d'autres éléments de l'échantillon:
 - Polymères: Dans les échantillons en polymères, l'influence de la matrice sur l'intensité caractéristique des rayons X de l'analyte est due à:
 - la dispersion (principalement incohérente) du rayonnement primaire, qui contribue grandement au fond spectral.
 - l'absorption du rayonnement de la fluorescence, principalement par le Cl dans le PVC, par des éléments additifs comme le Ca, Ti, Zn, Sn, et par d'autres éléments tels que le Br et le Sb, qui trouvent leur origine dans les retardateurs de flammes.
 - l'excitation secondaire par des éléments comme le Sb, Sn et Br.
 - certains spectromètres WDXRF à grande puissance (>500 W) peuvent modifier la surface d'un échantillon polymère exposé au tube pendant de longues périodes de temps. Un échantillon neuf doit toujours être utilisé dans ce cas.
 - Métaux: Dans les échantillons métalliques, la dispersion du rayonnement primaire, bien que présente, ne joue pas un rôle important. L'effet de la matrice a pour principale origine l'absorption et les effets de l'excitation secondaire. Ces effets seront différents pour chaque matrice métallique. La liste suivante présente quelques éléments types composant les diverses matrices:
 - Alliages de fer: Fe, Cr, Ni, Nb, Mo, W,
 - Alliages d'aluminium: Al, Mg, Si, Cu, Zn,
 - Alliages de cuivre: Cu, Zn, Sn, Pb, Mn, Ni, Co,
 - Alliages de soudure: Pb, Cu, Zn, Sn, Sb, Bi, Ag,
 - Alliages de zinc: Zn, Al,
 - Alliages de métaux précieux: Rh, Pd, Ag, Ir, Pt, Au, Cu, Zn,
 - Autres métaux tels que Ti, Mg.

- Produits électroniques: En principe, tous les effets décrits pour les polymères et les métaux.
- b) De plus, l'intensité du rayonnement caractéristique de l'élément dans l'échantillon peut être influencée par des lignes d'interférence d'autres éléments de l'échantillon. Pour les éléments cibles, il peut s'agir typiquement des interférences suivantes:
 - Cd: Interférences possibles des Br, Pb, Sn, Ag et Sb;
 - Pb: Interférences possibles des Br, As, Bi;
 - Hg: Interférences possibles des Br, Pb, Bi, Au et des Ca et Fe si les échantillons contiennent des concentrations élevées de ces deux derniers éléments;
 - Cr: Interférences possibles du Cl;
 - Br: Interférences possibles des Fe, Pb et Hg. L'Al peut, en de rares occasions, être à l'origine d'une interférence si une ligne BrL_{α} est sélectionnée pour analyser le Br.
- c) Influence des effets de la matrice sur les limites de détection LOD.

Tableau D.1 – Effet de la composition de la matrice sur les limites de détection de certains éléments contrôlés

Élément/analyte	Polymère pur	Polymère avec $\geq 2\%$ Sb, sans Br	Polymère avec $\geq 2\%$ Br, sans Sb
Cadmium	A	$\sim A \rightarrow 2A$	$\geq 2A$
Plomb	B	$\sim 2B$	$\geq 3B$

NOTE 1 Si A et B sont les limites de détection (LOD) du Cd et du Pb, respectivement, dans un polymère pur, alors les limites de détection à prévoir pour des matrices plus complexes sont exprimées en multiples de A et B, comme indiqué dans le Tableau D.1.

NOTE 2 Les indications du Tableau D.1 sont fournies pour information uniquement; les limites réelles pour les analytes cibles sont spécifiques de chaque instrument et des conditions/paramètres d'analyse utilisés.

D.3 Interprétation des résultats

Pour chaque analyte, l'analyste doit préparer un budget d'incertitude avec une estimation de l'incertitude élargie, U , exprimée à un niveau de confiance choisi. A l'aide de la valeur U et du niveau maximal autorisé, L , de la substance, l'analyste doit classer chaque échantillon de la manière suivante:

- a) «SOUS LA LIMITE» – Si les résultats, R_i , de l'analyse quantitative de tous les analytes sont inférieurs aux valeurs, P_i , calculées par l'Equation (D.1), le résultat pour l'échantillon est « SOUS LA LIMITE ».

$$P_i = L_i - U_i \tag{D.1}$$

où «i» indique chaque analyte.

- b) «AU-DESSUS DE LA LIMITE» – Si les résultats, R_i , de l'analyse quantitative d'un analyte individuel sont supérieurs aux valeurs, F_i , calculées à partir de l'Equation (D.2), le résultat pour l'échantillon est «AU-DESSUS DE LA LIMITE».

$$F_i = L_i + U_i \tag{D.2}$$

NOTE 1 Dans le cas de la législation en vigueur qui restreint le PBB/PBDE et le Cr(VI) plutôt que le Br et le Cr, les exceptions sont les déterminations XRF du Br et du Cr. Si les résultats quantitatifs des éléments Br et/ou Cr sont supérieurs à la limite (pour Br calculés sur la base de la stœchiométrie du Br dans les congénères les plus courants de PBB/PBDE), l'échantillon est «non concluant», même si les résultats quantitatifs pour tous les autres analytes sont «sous la limite».

- c) «NON CONCLUANT» – Si le résultat, R_i , de l'analyse quantitative d'un analyte individuel dans un échantillon est compris entre P_i et F_i , l'essai est «NON CONCLUANT» pour cet échantillon.
- La valeur L est définie par les restrictions utilisées pour juger de l'acceptabilité du matériau dans le produit. Si le matériau listé dans les restrictions applicables se trouve sous la forme élémentaire, L doit être utilisée directement à partir des restrictions applicables. Si le matériau listé dans les restrictions applicables se trouve sous la forme composée, la valeur de L doit être calculée à l'aide du facteur gravimétrique pour l'élément déterminé par XRF dans le composé chimique cible.
 - La valeur U ci-dessus indique une évaluation de l'incertitude associée à la détermination XRF de chaque analyte. C'est-à-dire que U est différente pour chaque combinaison d'analyte, procédure de préparation de l'échantillon, étalonnage et spectromètre. Le Guide ISO/CEI 98 fournit des recommandations concernant l'évaluation de l'incertitude.

NOTE 2 L'utilisateur peut choisir une valeur à substituer à U en fonction de la marge de sécurité souhaitée. Cependant, il est recommandé de s'efforcer d'estimer U pour s'assurer que la valeur est inférieure ou égale à la marge de sécurité choisie.

- d) Le Tableau D.2 donne un exemple de programme d'interprétation des résultats aux limites de l'échantillon.

Tableau D.2 – Limites de détection en mg/kg pour les éléments réglementés dans diverses matrices

Élément	Polymères	Métaux	Matériau composite
Cd	$BL \leq (70-3\sigma) < X < (130+3\sigma) \leq OL$	$BL \leq (70-3\sigma) < X < (130+3\sigma) \leq OL$	$LOD < X < (150+3\sigma) \leq OL$
Pb	$BL \leq (700-3\sigma) < X < (1\ 300+3\sigma) \leq OL$	$BL \leq (700-3\sigma) < X < (1\ 300+3\sigma) \leq OL$	$BL \leq (500-3\sigma) < X < (1\ 500+3\sigma) \leq OL$
Hg	$BL \leq (700-3\sigma) < X < (1\ 300+3\sigma) \leq OL$	$BL \leq (700-3\sigma) < X < (1\ 300+3\sigma) \leq OL$	$BL \leq (500-3\sigma) < X < (1\ 500+3\sigma) \leq OL$
Br	$BL \leq (300-3\sigma) < X$		$BL \leq (250-3\sigma) < X$
Cr	$BL \leq (700-3\sigma) < X$	$BL \leq (700-3\sigma) < X$	$BL \leq (500-3\sigma) < X$

- Un ensemble commun de limites pour les substances concernées a été pris comme hypothèse pour les besoins de cet exemple. Les limites sont 100 mg/kg pour le Cd et 1 000 mg/kg pour le Pb, le Hg et le Cr. La limite pour le Br est calculée sur la base de la stœchiométrie du Br dans les congénères les plus courants de PBB/PBDE et de leur limite de 1 000 mg/kg. Les «niveaux d'action» ont été fixés, pour cette méthode, pour les besoins de la procédure de détection avec une marge de sécurité de 30 % (50 % pour les matériaux composites).
- La détermination «SOUS LA LIMITE» (BL) ou «AU-DESSUS DE LA LIMITE» (OL) est fixée à 30 % (50 % pour les matériaux composites) en-dessous ou au-dessus de la limite, respectivement. Les marges de sécurité ont été convenues d'après l'expérience de nombreux experts et industriels. Le paragraphe 6.6.c) donne une explication détaillée de cette approche d'estimation de l'incertitude (appelée ici «marge de sécurité»).
- Le symbole «X» repère la région où une investigation plus poussée est nécessaire.
- Le terme « 3σ » exprime la répétabilité de l'analyseur au niveau d'action, σ étant défini comme l'écart-type d'un échantillon type à teneur en substances réglementées proche des limites retenues (voir essai de vérification des performances du spectromètre 6.5.4). La répétabilité est exprimée en termes de « 3σ », niveau de confiance de 99,7 % plutôt que par le plus courant « 2σ », niveau de confiance de 95 %. Le niveau de confiance de 99,7 % permet à la méthode de produire moins de «fausses erreurs négatives».

NOTE 3 Il convient que la limite de détection de l'instrument soit située sous le «niveau d'action» et il convient de l'appliquer conformément à la note de 6.5.4 d).

D.4 Résultats récapitulatifs de l'étude IIS2 associés à la méthode XRF

Des laboratoires bénévoles sélectionnés par le GT3 du CE 111 de la CEI ont participé à une étude internationale inter-laboratoires (IIS2) destinée à déterminer les performances de cette méthode d'essai. Les MRC (matériaux de référence certifiés) qu'ils ont fournis étaient des échantillons de recherche de composition connue, des échantillons réels ayant été analysés conformément aux procédures décrites dans le présent article. L'appareillage utilisé pour ces essais allait des spectromètres de laboratoire EDXRF ou WDXRF aux analyseurs XRF de table, portables et portatifs. Les échantillons ont été analysés «en l'état». Tous les échantillons étaient supposés homogènes, même si cette hypothèse n'a été validée que pour des échantillons MRC. Le point le plus discuté portait sur l'homogénéité des échantillons de cartes de circuits imprimés broyées (F20 et F21).

Les Tableaux D.3 à D.7 présentent un résumé détaillé des résultats pour chaque substance et chaque matériau soumis à l'essai, obtenus afin d'évaluer la méthode XRF. Ces résultats viennent à l'appui des conclusions afférentes aux performances de la méthode (XRF), formulées en 6.7.

**Tableau D.3 – Résultats moyens et taux de rétablissement pour le plomb
obtenus au cours de l'étude IIS2**

Numéro d'échantillon	Description de l'échantillon	Valeur certifiée de Pb	Résultat moyen de Pb	Ecart-type	Taux de rétablissement ^a	Plage du taux de rétablissement	Nombre total de jeux de données ^b	Nombre de jeux de données utilisés ^b
		mg/kg	mg/kg	mg/kg	%	%		
IIS2-C10	EC 680 (polyéthylène)	107,9	115	20	107	91 – 152	10	10
IIS2-C11	EC 681 (polyéthylène)	13,8	18	10	132	92 – 278	10	8
IIS2-C12	NMIJ CRM 8112-a (acrylonitrile butadiène styrène)	108,9	95	15	87	66 – 110	13	12
IIS2-C13	NMIJ CRM 8113-a (acrylonitrile butadiène styrène)	1 084	952	156	88	67 – 106	13	12
IIS2-F22	BCR 126 (cristal au plomb)	240 000	232 192	58 270	97	62 – 129	5	4
IIS2-D14	NIST SRM 2166 (acier faiblement allié)	30	ND ^c				5	0
IIS2-D15	NIST SRM 855a (alliage d'aluminium pour fonderie)	190	187	50	98	64 – 122	6	3
IIS2-D16	NIST SRM 87a (alliage d'aluminium silicium)	930	1 021	269	110	73 – 150	11	7
IIS2-D18	MBH CRM 74X CA4 (alliage d'étain)	174	ND ^c (allait de 60 à 377)				9	4
IIS2-F20	Echantillon réel (carte à circuits imprimés broyée)	23 000	18 735	5 897	81	54 – 87	6	4
IIS2-F21	Echantillon réel (carte à circuits imprimés broyée)	22 000	7 991	1 931	36	23 – 44	5	4

^a Le taux de rétablissement est défini comme le rapport de la concentration d'analyte effectivement mesurée sur la concentration prévue, et multiplié par 100 %. En d'autres termes, il illustre l'inexactitude des résultats.

^b Chaque jeu de données représente en général trois analyses répétées de l'échantillon.

^c ND signifie «non détecté».

Tableau D.4 – Résultats moyens et taux de rétablissement pour le mercure obtenus au cours de l'étude IIS2

Numéro d'échantillon	Description de l'échantillon	Valeur certifiée de Hg	Résultat moyen de Hg	Ecart-type	Taux de rétablissement ^a	Plage du taux de rétablissement	Nombre total de jeux de données ^b	Nombre de jeux de données utilisés
		mg/kg	mg/kg	mg/kg	%	%		
IIS2-C10	EC 680 (polyéthylène)	25,3	25	11	100	0 – 146	10	8
IIS2-C11	EC 681 (polyéthylène)	4,5	4	3	89	0 – 133	10	5
IIS2-C12	NMIJ CRM 8112-a (acrylonitrile butadiène styrène)	100	92	15	92	67 – 117	13	12
IIS2-C13	NMIJ CRM 8113-a (acrylonitrile butadiène styrène)	941,5	893	109	95	80 – 120	13	12

^a Le taux de rétablissement est défini comme le rapport de la concentration d'analyte effectivement mesurée sur la concentration prévue et multiplié par 100 %. En d'autres termes, il illustre l'inexactitude des résultats.

^b Chaque jeu de données représente en général trois analyses répétées de l'échantillon.

Tableau D.5 – Résultats moyens et taux de rétablissement pour le cadmium, obtenus au cours de l'étude IIS2

Numéro d'échantillon	Description de l'échantillon	Valeur certifiée de Cd	Résultat moyen de Cd	Ecart-type	Taux de rétablissement ^a	Plage du taux de rétablissement	Nombre total de jeux de données ^b	Nombre de jeux de données utilisés
		mg/kg	mg/kg	mg/kg	%	%		
IIS2-C10	EC 680 (polyéthylène)	140,8	133	19	94	78 – 116	10	9
IIS2-C11	EC 681 (polyéthylène)	21,7	20	5	91	65 – 124	10	9
IIS2-C12	NMIJ CRM 8112-a (acrylonitrile butadiène styrène)	10,77	16	13	155	90 – 500	13	10
IIS2-C13	NMIJ CRM 8113-a (acrylonitrile butadiène styrène)	106,9	92	13	86	72 – 111	13	9
IIS2-D18	MBH CRM 74X CA4 (alliage d'étain)	3,3	ND (non détecté)				8	0

^a Le taux de rétablissement est défini comme le rapport de la concentration d'analyte effectivement mesurée sur la concentration prévue et multiplié par 100 %. En d'autres termes, il illustre l'inexactitude des résultats.

^b Chaque jeu de données représente en général trois analyses répétées de l'échantillon.

Tableau D.6 – Résultats moyens et taux de rétablissement pour le chrome total, obtenus au cours de l'étude IIS2

Numéro d'échantillon	Description de l'échantillon	Valeur certifiée de Cr	Résultat moyen de Cr	Ecart-type	Taux de rétablissement ^a	Plage du taux de rétablissement	Nombre total de jeux de données ^b	Nombre de jeux de données utilisés
		mg/kg	mg/kg	mg/kg	%	%		
IIS2-C10	EC 680 (polyéthylène)	114,6	134	38	117	61 – 182	10	10
IIS2-C11	EC 681 (polyéthylène)	17,7	20	6	112	68 – 185	10	7
IIS2-C12	NMIJ CRM 8112-a (acrylonitrile butadiène styrène)	27,87	<u>125</u> ^c	<u>42</u>	<u>448</u>		13	13
IIS2-C13	NMIJ CRM 8113-a (acrylonitrile butadiène styrène)	269,5	<u>1 016</u> ^c	<u>303</u>	<u>377</u>		13	13
IIS2-F22	BAM CRM S004 (verre)	94	77	32	82	50 – 110	3	2
IIS2-D14	NIST SRM 2166 (acier faiblement allié)	240	ND ^d (allait de ND et 827)				5	0
IIS2-D15	NIST SRM 855a (alliage d'aluminium pour fonderie)	130	ND ^d (allait de 89 à 890)				5	0
IIS2-D16	NIST SRM 87a (alliage d'aluminium silicium)	1 100	1 107	450	110	55 – 152	11	4

^a Le taux de rétablissement est défini comme le rapport de la concentration d'analyte effectivement mesurée sur la concentration prévue et multiplié par 100 %. En d'autres termes, il illustre l'inexactitude des résultats.

^b Chaque jeu de données représente en général trois analyses répétées de l'échantillon.

^c Les résultats soulignés pour les échantillons C12 et C13 sont fournis pour information uniquement. Pour les deux échantillons, les résultats Cr rapportés par les laboratoires étaient d'un facteur environ quatre fois supérieur au facteur certifié. Il n'a pas été établi de raison pour cela.

^d ND signifie «non détecté».

Tableau D.7 – Résultats moyens et taux de rétablissement pour le brome total, obtenus au cours de l'étude IIS2

Numéro d'échantillon	Description de l'échantillon	Valeur certifiée de Br	Résultat moyen de Br	Ecart-type	Taux de rétablissement ^a	Plage du taux de rétablissement	Nombre total de jeux de données ^b	Nombre de jeux de données utilisés
		mg/kg	mg/kg	mg/kg	%	%		
IIS2-C10	EC 680 (polyéthylène)	808	826	90	102	70 – 125	10	8
IIS2-C11	EC 681 (polyéthylène)	98	90	13	92	65 – 102	10	8
IIS2-A01	HIPS (polystyrène choc), échantillon de recherche fourni	99 138	104 976	15 353	105	84 – 124	12	5
IIS2-A02	HIPS (polystyrène choc), échantillon de recherche fourni	100 050	116 007	10 053	116	100 – 125	12	5
IIS2-A03	ABS (acrylonitrile butadiène styrène), échantillon de recherche fourni	116 800	118 817	29 351	102	69 – 123	6	5
IIS2-A04	ABS (acrylonitrile butadiène styrène), échantillon de recherche fourni	118 400	127 856	32 346	108	90 – 131	6	5
IIS2-A05	PC/ABS (polycarbonate et acrylonitrile butadiène styrène), échantillon de recherche fourni	800	995	90	124	114 – 136	4	3
IIS2-A06	PC/ABS (polycarbonate et acrylonitrile butadiène styrène), échantillon de recherche fourni	2 400	3 034	467	126	111 – 148	4	3

^a Le taux de rétablissement est défini comme le rapport de la concentration d'analyte effectivement mesurée sur la concentration prévue, et multiplié par 100 %. En d'autres termes, il illustre l'inexactitude des résultats.

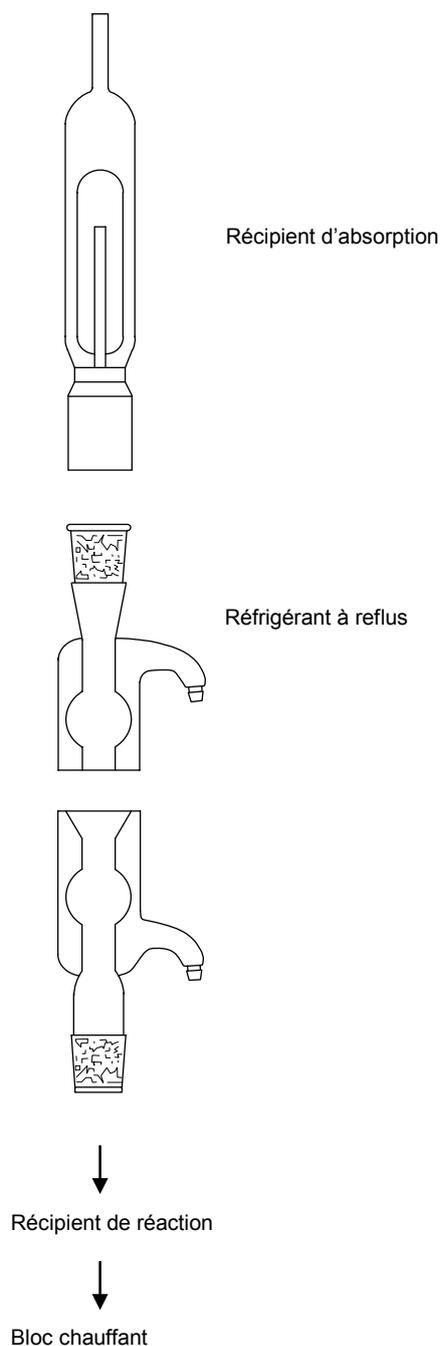
^b Chaque jeu de données représente en général trois analyses réitérées de l'échantillon.

Annexe E (informative)

Application pratique de la détermination du mercure dans les polymères, les métaux et les produits électroniques par CV-AAS, AFS, ICP-OES et ICP-MS

E.1 Equipement

Un exemple d'équipement utilisé est fourni ci-dessous.



IEC 2248/08

Figure E.1 – Digesteur chauffant équipé d'un récepteur de réaction, d'un réfrigérant à reflux et d'un récepteur d'absorption

Tableau E.1 – Programme de digestion des échantillons aux micro-ondes (puissance fournie pour cinq récipients)

Etape	Durée min	Puissance de sortie W	Pression limitée à MPa
1	5	400	3,5
2	5	600	3,5
3	12	800	3,5
4	20	800	4,0
5	3	500	4,0
Etape de ventilation	20	0	–

E.2 Paramètres de l'instrument

Les paramètres de l'instrument indiqués constituent des exemples applicables et peuvent différer, dans la mesure où chaque instrument peut exiger d'autres paramètres. L'utilisation des longueurs d'onde indiquées et des rapports entre la masse et la charge est fortement recommandée; la sélection d'autres paramètres dans ce contexte peut donner de faux résultats.

a) CV-AAS

- Source lumineuse: Lampe à décharge sans électrode ou lampe à cathode creuse
- Longueur d'onde: 253,7 nm
- Largeur de bande spectrale 0,7 nm
- Gaz pur: N₂ ou Ar

b) CV-AFS

- Source: Lampe à cathode creuse au Hg: Intensité: 30 mA, longueur d'onde: 253,7 nm
- Tension de polarisation du détecteur: -360 V
- Température du four: 800 °C
- Gaz vecteur du flux d'argon: 0,6 l/min, gaz écran: 1,0 l/min
- Eau de lavage: 6 % en fraction volumétrique de HNO₃

c) ICP-OES

- Longueur d'onde du mercure: 194,227 nm
- Puissance du générateur HF: 1 150 W
- Fréquence du générateur HF: 27,12 MHz
- Pression de l'argon: 0,16 MPa
- Gaz vecteur du flux d'argon: Gaz de refroidissement: 14 l/min, gaz auxiliaire: 0,5 l/min
- Taux d'absorption de l'échantillon: 1,6 ml/min

d) ICP-MS

- Rapports de la masse et de la charge pour Hg: m/z = 199, 200, 201, 202
- Puissance du générateur HF: 1 200 W
- Fréquence du générateur HF: 27,12 MHz
- Pression de l'argon: 0,28 MPa
- Gaz vecteur du flux d'argon: Gaz de refroidissement: 16 l/min, gaz auxiliaire: 1,0 l/min

NOTE Position de la torche: profondeur d'échantillonnage, horizontale, verticale; lentilles: il convient que toutes les conditions soient optimisées avant la mesure.

Annexe F (informative)

Application pratique de la détermination du plomb et du cadmium dans les polymères par ICP-OES, ICP-MS et AAS

F.1 ICP-OES

**Tableau F.1 – Interférences spectrales pour les longueurs d'onde du
cadmium et du plomb**

	Cd	Cd	Cd	Cd	Pb	Pb	Pb	Pb
nm	214,439	226,502	228,802	361,051	217,000	220,353	261,417	283,305
Ag	+	+	+	+	+	+	+	+
As	++	+	+++	+	+	+	+	+
Au	+	+	++	+	+	+	+	+++
B	+	+	+	+++	+	+	++	+
Ca	+	+	+	+	+	+	+	+
Co	+	++	+++	+++	++	+++	+++	++
Cr	+	+	+	+	+	+	++	+
Cu	+	+	+	+	+	+	+	++
Eu	+	+	+	+++	++	+	+++	+++
Ga	+	+	+	+	+	+	+	+
Ge	+	+	+	+	+	+	+	+
In	+	+	+	+	+	+	+	+
Ir	++	++	++	++	+++	+++	+++	+++
Mg	+	+	+	+	+	+	+	++
Mn	+	+	+	+++	+	++	+++	+
Mo	++	+	+	+++	++	+	++	+++
Ni	+	+	++	+++	+++	++	+	+
Pd	+	+	+	+	+	+++	+	+
Pt	+++	+	++	+	+	+	+	+
Re	++	++	+	+++	++	+++	++	+++
Ru	++	+	++	+	++	+	+++	+
Sb	++	+	+	+	++	+	+	+
Sc	+	+	+++	++	++	++	+++	++
Sn	+	+	+	+	++	+	+	++
V	+	+	++	+++	++	++	++	+
W	++	++	++	++	+++	+	+++	++
Zn	+	+	+	+	+++	+	+	+
Al	+	+	+	+	+++	+++	+	++
Ti	+	+	+	++	+	+++	+	++
Fe	+++	+++	+	++	+++	++	+++	+++
Nb	+	+	+	-	-	+	-	+++
Hf	-	-	-	-	-	+	-	+++

Tableau F.1 (suite)

	Cd	Cd	Cd	Cd	Pb	Pb	Pb	Pb
nm	214,439	226,502	228,802	361,051	217,000	220,353	261,417	283,305
Ta	-	-	-	-	-	+	-	++
Pb	+	+	+	+	-	-	-	-
Cd	-	-	-	-	+	+	+	+

NOTE Le tableau montre la force d'interférence des longueurs d'onde du Cd et du Pb lorsque 1 000 mg/kg d'éléments correspondants de la matrice sont introduits.

+ pas ou peu d'interférence (typiquement moins de 0,05 mg/kg).
 ++ interférence moyenne (typiquement entre 0,05 mg/kg et 0,2 mg/kg).
 +++ forte interférence (typiquement plus de 0,2 mg/kg).

F.2 ICP-MS

Si un isotope stable est trouvé, le rapport masse/charge (m/z) de plusieurs isotopes peut être mesuré pour estimer le niveau d'interférence spectrale. Si l'échantillon contient de l'étain ou du molybdène, une attention toute particulière doit être accordée à l'interférence positive lors de la mesure de la masse de cadmium.

Tableau F.2 – Exemples de rapports masse/charge (m/z)

Elément	Isotope	Isobare	Ion polyatomique
Cd	¹¹¹ Cd		MoO, MoOH, ZrOH
	¹¹² Cd	Sn	MoO, MoOH
	¹¹³ Cd	In	MoO, MoOH, ZrOH, RuO
	¹¹⁴ Cd	Sn	MoO, MoOH, RuO
Pb	²⁰⁴ Pb		
	²⁰⁶ Pb		PtO
	²⁰⁷ Pb		IrO
	²⁰⁸ Pb		PtO

F.3 AAS

Longueurs d'ondes de mesure recommandées pour l'AAS.

Tableau F.3 – Exemples de longueurs d'ondes pour AAS

Elément	Longueur d'onde nm	Largeur de la fente nm
Cd	228,8	0,7
Pb	261,4	0,7
	217,0	0,7
	283,3	0,7

Source de lumière: Lampe à décharge sans électrode ou à cathode creuse, type de gaz: Acétylène/air:

Annexe G (informative)

Application pratique de la détermination du plomb et du cadmium dans les métaux par ICP-OES, ICP-MS et AAS

G.1 ICP-OES

**Tableau G.1 – Interférences spectrales pour les longueurs d'onde du
cadmium et du plomb**

	Cd	Cd	Cd	Cd	Pb	Pb	Pb	Pb
nm	214,439	226,502	228,802	361,051	217,000	220,353	261,417	283,305
Ag	+	+	+	+	+	+	+	+
As	++	+	+++	+	+	+	+	+
Au	+	+	++	+	+	+	+	+++
B	+	+	+	+++	+	+	++	+
Ca	+	+	+	+	+	+	+	+
Co	+	++	+++	+++	++	+++	+++	++
Cr	+	+	+	+	+	+	++	+
Cu	+	+	+	+	+	+	+	++
Eu	+	+	+	+++	++	+	+++	+++
Ga	+	+	+	+	+	+	+	+
Ge	+	+	+	+	+	+	+	+
In	+	+	+	+	+	+	+	+
Ir	++	++	++	++	+++	+++	+++	+++
Mg	+	+	+	+	+	+	+	++
Mn	+	+	+	+++	+	++	+++	+
Mo	++	+	+	+++	++	+	++	+++
Ni	+	+	++	+++	+++	++	+	+
Pd	+	+	+	+	+	+++	+	+
Pt	+++	+	++	+	+	+	+	+
Re	++	++	+	+++	++	+++	++	+++
Ru	++	+	++	+	++	+	+++	+
Sb	++	+	+	+	++	+	+	+
Sc	+	+	+++	++	++	++	+++	++
Sn	+	+	+	+	++	+	+	++
V	+	+	++	+++	++	++	++	+
W	++	++	++	++	+++	+	+++	++
Zn	+	+	+	+	+++	+	+	+
Al	+	+	+	+	+++	+++	+	++
Ti	+	+	+	++	+	+++	+	++
Fe	+++	+++	+	++	+++	++	+++	+++
Nb	+	+	+	-	-	+	-	+++
Hf	-	-	-	-	-	+	-	+++
Ta	-	-	-	-	-	+	-	++

Tableau G.1 (suite)

	Cd	Cd	Cd	Cd	Pb	Pb	Pb	Pb
nm	214,439	226,502	228,802	361,051	217,000	220,353	261,417	283,305
Pb	+	+	+	+	-	-	-	-
Cd	-	-	-	-	+	+	+	+
Le tableau montre la force d'interférence des longueurs d'onde du Cd et du Pb lorsque 1 000 mg/kg d'éléments correspondants de la matrice sont introduits. NOTE Le tableau montre la force d'interférence des longueurs d'onde du Cd et du Pb lorsque 1 000 mg/kg d'éléments correspondants de la matrice sont introduits. + pas ou peu d'interférence (typiquement moins de 0,05 mg/kg). ++ interférence moyenne (typiquement entre 0,05 mg/kg et 0,2 mg/kg). +++ forte interférence (typiquement plus de 0,2 mg/kg).								

G.2 Correction du fond

Dans le cas d'un changement de fond par la matrice principale de la solution affectant les intensités d'émission (I_x), ces intensités doivent être obtenues en déduisant les intensités de fond (I_x'). La Figure G.1 montre un exemple de l'effet de la correction de fond. La Figure G.1a montre un exemple de fond uniforme par rapport à la longueur d'onde. Dans ce cas, le fond pourrait être corrigé par les deux positions A et B. La Figure G.1b montre un exemple de changement du fond par rapport à la longueur d'onde. Dans ce cas, les intensités de fond doivent être corrigées en obtenant les intensités de fond (I_x'), calculées par la position A et la position B des intensités d'émission.

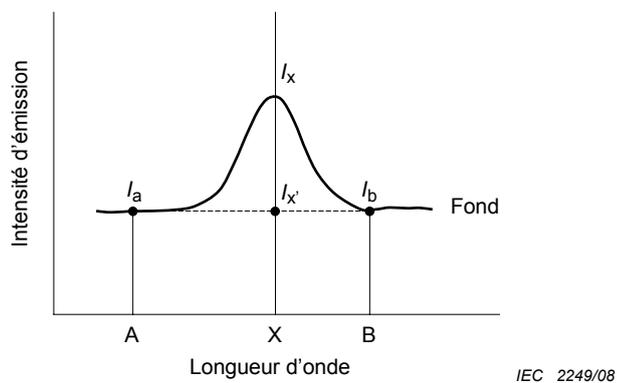


Figure G.1a – Fond uniforme par rapport à la longueur d'onde

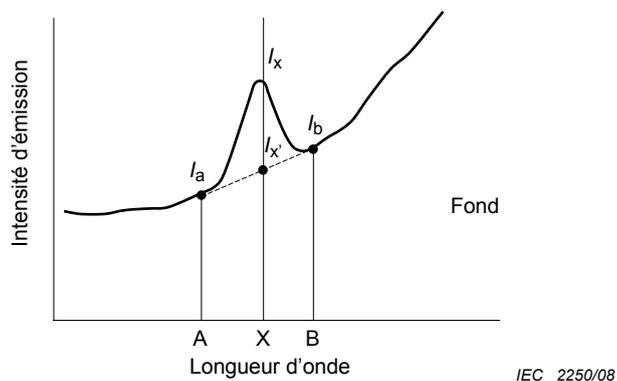


Figure G.1b – Changement du fond par rapport à la la longueur d'onde

Figure G.1 – Correction de fond

Lors de l'application d'une méthode des additions d'étalons, le fond doit être soustrait par la méthode de correction de fond susmentionnée avant de pouvoir effectuer un étalonnage des additions d'étalons.

G.3 ICP-MS

Si un isotope stable est trouvé, le rapport masse/charge (m/z) de plusieurs isotopes peut être mesuré pour estimer le niveau d'interférence spectrale. Si l'échantillon contient de l'étain ou du molybdène, une attention toute particulière doit être accordée à l'interférence positive lors de la mesure de la masse de cadmium.

Tableau G.2 – Exemples de rapports masse/charge (m/z)

Élément	Isotope	Isobare	Ion polyatomique
Cd	¹¹¹ Cd		MoO, MoOH, ZrOH
	¹¹² Cd	Sn	MoO, MoOH
	¹¹³ Cd	In	MoO, MoOH, ZrOH, RuO
	¹¹⁴ Cd	Sn	MoO, MoOH, RuO
Pb	²⁰⁴ Pb		
	²⁰⁶ Pb		PtO
	²⁰⁷ Pb		IrO
	²⁰⁸ Pb		PtO

G.4 AAS

Longueurs d'ondes de mesure recommandées pour l'AAS.

Tableau G.3 – Exemples de longueurs d'onde pour AAS

Élément	Longueur d'onde nm	Largeur de la fente nm
Cd	228,8	0,7
Pb	261,4	0,7
	217,0	0,7
	283,3	0,7

Annexe H (informative)

Application pratique de la détermination du plomb et du cadmium dans les produits électroniques par ICP-OES, ICP-MS et AAS

H.1 Programme de digestion aux micro-ondes

Tableau H.1 – Programme pour la digestion d'échantillons aux micro-ondes^a

Etape	Durée min	Puissance de sortie W	Pression limitée à MPa
1A	5	300	2,5
2A	5	350	2,5
3A	17	450	2,5
4A	2	300	2,5
Ventilation A	3	0	2,5
1B	5	300	2,5
2B	5	400	2,5
3B	17	450	2,5
Ventilation B	3	0	2,5

^a Puissance fournie pour cinq récipients.

H.2 ICP-OES

**Tableau H.2 – Interférences spectrales pour les longueurs d'onde du
cadmium et du plomb**

	Cd	Cd	Cd	Cd	Pb	Pb	Pb	Pb
nm	214,439	226,502	228,802	361,051	217,000	220,353	261,417	283,305
Ag	+	+	+	+	+	+	+	+
As	++	+	+++	+	+	+	+	+
Au	+	+	++	+	+	+	+	+++
B	+	+	+	+++	+	+	++	+
Ca	+	+	+	+	+	+	+	+
Co	+	++	+++	+++	++	+++	+++	++
Cr	+	+	+	+	+	+	++	+
Cu	+	+	+	+	+	+	+	++
Eu	+	+	+	+++	++	+	+++	+++
Ga	+	+	+	+	+	+	+	+
Ge	+	+	+	+	+	+	+	+
In	+	+	+	+	+	+	+	+
Ir	++	++	++	++	+++	+++	+++	+++
Mg	+	+	+	+	+	+	+	++
Mn	+	+	+	+++	+	++	+++	+
Mo	++	+	+	+++	++	+	++	+++
Ni	+	+	++	+++	+++	++	+	+
Pd	+	+	+	+	+	+++	+	+

	Cd	Cd	Cd	Cd	Pb	Pb	Pb	Pb
nm	214,439	226,502	228,802	361,051	217,000	220,353	261,417	283,305
Pt	+++	+	++	+	+	+	+	+
Re	++	++	+	+++	++	+++	++	+++
Ru	++	+	++	+	++	+	+++	+
Sb	++	+	+	+	++	+	+	+
Sc	+	+	+++	++	++	++	+++	++
Sn	+	+	+	+	++	+	+	++
V	+	+	++	+++	++	++	++	+
W	++	++	++	++	+++	+	+++	++
Zn	+	+	+	+	+++	+	+	+
Al	+	+	+	+	+++	+++	+	++
Ti	+	+	+	++	+	+++	+	++
Fe	+++	+++	+	++	+++	++	+++	+++
Nb	+	+	+	-	-	+	-	+++
Hf	-	-	-	-	-	+	-	+++
Ta	-	-	-	-	-	+	-	++
Pb	+	+	+	+	-	-	-	-
Cd	-	-	-	-	+	+	+	+

NOTE Le tableau montre la force d'interférence des longueurs d'onde du Cd et du Pb lorsque 1 000 mg/kg d'éléments correspondants de la matrice sont introduits.

- + pas ou peu d'interférence (typiquement moins de 0,05 mg/kg).
- ++ interférence moyenne (typiquement entre 0,05 mg/kg et 0,2 mg/kg).
- +++ forte interférence (typiquement plus de 0,2 mg/kg).

H.3 Correction du fond

Dans le cas d'un changement de fond par la matrice principale de la solution affectant les intensités d'émission (I_x), ces intensités doivent être obtenues en déduisant les intensités de fond (I_x'). La Figure H.1 montre un exemple de l'effet de la correction de fond. La Figure H.1a montre un exemple de fond uniforme par rapport à la longueur d'onde. Dans ce cas, le fond peut être corrigé par les deux positions de A et de B. La Figure H.1b montre un exemple de changement du fond par rapport à la longueur d'onde. Dans ce cas, les intensités de fond doivent être corrigées en obtenant les intensités de fond (I_x'), calculées par la position A et la position B des intensités d'émission.

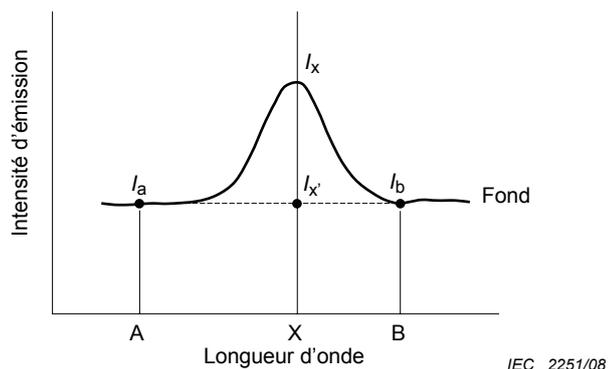


Figure H.1a – Fond uniforme par rapport à la longueur d'onde

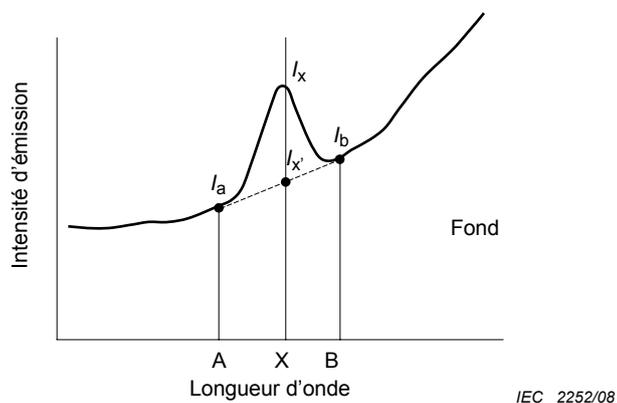


Figure H.1b – Changement du fond par rapport à la longueur d'onde

Figure H.1 – Correction de fond

Lors de l'application d'une méthode des additions d'étalons, le fond doit être soustrait par la méthode de correction de fond susmentionnée avant de pouvoir effectuer un étalonnage des additions d'étalons.

H.4 ICP-MS

Si un isotope stable est trouvé, le rapport masse/charge (m/z) de plusieurs isotopes peut être mesuré pour estimer le niveau d'interférence spectrale. Si l'échantillon contient de l'étain ou du molybdène, une attention toute particulière doit être accordée à l'interférence positive lors de la mesure de la masse de cadmium.

Tableau H.3 – Exemples de rapports masse/charge (m/z)

Élément	Isotope	Isobare	Ion polyatomique
Cd	¹¹¹ Cd		MoO, MoOH, ZrOH
	¹¹² Cd	Sn	MoO, MoOH
	¹¹³ Cd	In	MoO, MoOH, ZrOH, RuO
	¹¹⁴ Cd	Sn	MoO, MoOH, RuO
Pb	²⁰⁴ Pb		
	²⁰⁶ Pb		PtO
	²⁰⁷ Pb		IrO
	²⁰⁸ Pb		PtO

H.5 AAS

Longueurs d'ondes de mesure recommandées pour l'AAS.

Tableau H.4 – Exemples de longueurs d'ondes pour AAS

Élément	Longueur d'onde (nm)	Largeur de la fente (nm)
Cd	228,8	0,7
Pb	261,4	0,7
	217,0	0,7
	283,3	0,7

Type de gaz: Acétylène/air:

Source de lumière: Lampe à décharge sans électrode ou lampe à cathode creuse.

Bibliographie

Généralités

- [1] *Instructions pour l'évaluation de la conformité des produits eu égard aux restrictions d'utilisation des substances dans les équipements électriques et électroniques*³
- [2] *Guide ISO 30, Termes et définitions utilisés en rapport avec les matériaux de référence*
- [3] CEI 60730-1:1999, *Dispositifs de commande électrique automatiques à usage domestique et analogue – Partie 1: Exigences générales*
- [4] CEI/TS 62239:2003, *Gestion des processus pour l'avionique – Préparation d'un plan de gestion des composants électroniques*
- [5] Guide CEI 114:2005, *Conception soucieuse de l'environnement – Intégration des aspects liés à l'environnement dans la conception et le développement de produits électrotechniques*
- [6] BECKER, D., Use of NIST Standard Reference Materials for Decisions on Performance of Analytical Chemical Methods and Laboratories, National Institute of Standards and Technology (NIST) Special Publication 829, 1992
- [7] ISO 5725, Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure
- [8] International Union of Pure and Applied Chemistry, *Harmonized Guidelines for Single Laboratory Validation of Methods of Analysis* (IUPAC Technical Report), Pure Appl. Chem., 2002, vol. 74, no. 5, p. 835–855
- [9] International Union of Pure and Applied Chemistry, *Nomenclature in Evaluation of Analytical Methods Including Detection and Quantification Limits*, Pure Appl. Chem., 1995, vol. 67, no. 10, p. 1699-1723

Détection

- [10] ASTM C 982-03, Guide for Selecting Components for Energy-Dispersive X-ray Fluorescence Systems
- [11] ASTM C 1118-89, Guide for Selecting Components for Wavelength-Dispersive X-ray Fluorescence Systems
- [12] ASTM E 1172-87, Standard Practice for Describing and Specifying a Wavelength-Dispersive X-ray Spectrometer
- [13] ASTM E 1361-02, Guide for Correction of Interelement Effects in X-ray Spectrometric Analysis
- [14] ASTM E 1621-94, Standard Guide for X-ray Emission Spectrometric Analysis
- [15] ASTM E 1622-94, Standard Practice for Correction of Spectral Line Overlap in Wavelength-Dispersive X-ray Spectrometry

³ A l'étude.

- [16] BERTIN, EP. *Principles and Practices of X-ray Spectrometric Analysis*, 2nd Edition Plenum Press N.Y.
- [17] BUHRKE, VE., JENKINS, R., SMITH, DK., *A Practical Guide for the Preparation of Specimens for X-ray Fluorescence and X-ray Diffraction Analysis*, Wiley-VCHR
- [18] VAN GRIEKEN, R. and MARKOWICZ, A. *Handbook of X ray Spectrometry*, 2nd Edition, Marcel Dekker Inc.

Mercure

- [19] JEL303:2004, Practical quantitative analysis procedure for mercury contained in fluorescent lamps
- [20] Décision de la Commission Européenne du 9 septembre 2002 établissant des critères écologiques révisés pour l'attribution du label écologique communautaire aux ampoules électriques et modifiant la décision 1999/568/CE, 2002/747/CE
- [21] California Environmental Protection Agency, Procedural SOP No. 914-S, Preparation of Cold Cathode Fluorescent Lamps for Mercury Testing, including WET and TCLP, Department of Toxic Substances Control Revision No. 2, 2004
- [22] Battery Industry (EPBA, BAJ and NEMA), Standard Analytical Method for the Determination of Mercury, Cadmium and Lead in Alkaline Manganese Cells using AAS, ICP-OES and "Cold Vapor", 1998

Plomb/Cadmium

- [23] ERNST, T. R., POPP, M., WOLF, R., VAN ELDIK, R., *Analysis of eco-relevant elements and noble metals in printed wiring boards using AAS, ICP-OES and EDXRF*, Anal. Bioanal. Chem., 2003, 375:p.805-814
- [24] ISO 11885, *Qualité de l'eau – Dosage d'éléments choisis par spectroscopie d'émission atomique avec plasma couplé par induction (ICP-OES)*
- [25] EN 1122, Plastiques – Détermination du cadmium – Méthode de décomposition par voie humide
- [26] EN 13346, Caractérisation des boues – Détermination des éléments traces et du phosphore – Méthodes d'extraction à l'eau régale
- [27] ASTM D 4004-93, Standard test methods for rubber determination of metal content by flame atomic absorption (AAS) analysis
- [28] ISO 3856-4, *Peintures et vernis – Détermination de la teneur en métaux « solubles » – Partie 4: Détermination de la teneur en cadmium – Méthode par spectrométrie d'absorption atomique dans la flamme et méthode polarographique*
- [29] ISO 6101-2, *Caoutchouc – Détermination de la teneur en métal par spectrométrie d'absorption atomique – Partie 2 : Dosage du plomb*
- [30] ISO 17294-1, *Qualité de l'eau – Application de la spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS) – Partie 1: Lignes directrices générales*
- [31] ISO 247, *Caoutchouc – Détermination du taux des cendres*

- [32] JIS K 0102, Testing methods for industrial wastewater
- [33] JIS K 0116, General rules for atomic emission spectrometry
- [34] JIS K 0133, General rules for high-frequency plasma mass spectrometry
- [35] EDGELL, K., US EPA Method Study 37 – SW-846 Method 3050 Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils. EPA Contract No. 68-03-3254, November 1988
- [36] United States Environmental Protection Agency (EPA), EPA SW-846 Method 3052, Microwave-assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices
- [37] United States Environmental Protection Agency (EPA), EPA SW-846 Method 6010B, Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry
- [38] United States Environmental Protection Agency (EPA), EPA SW-846 Method 7000, Series measurement methods for lead, cadmium, chromium and mercury

PBB/PBDE

- [39] KEMMLEIN, S., *Polybromierte Flammenschutzmittel: Entwicklung eines Analyseverfahrens und Untersuchung und Bewertung der Belastungssituation ausgewählter Umweltkompartemente. (Polybrominated flame retardants: Development of an analytical method for the determination and evaluation of the occurrence in various environmental compartments). Thesis.* Technical University Berlin, 2000. ISBN 3-89820-128-7
- [40] KIMBROUGH, David E. and WAKAKUWA, JANICE R., Acid Digestion for Sediments, Sludges, Soils, and Solid Wastes. A Proposed Alternative to EPA SW 846 Method 3050, *Environmental Science and Technology*, juillet 1989, Vol. 23, p.898
- [41] KRÜGER, C., *Polybromierte Biphenyle und polybromierte Biphenylether – Nachweis und Bestimmung in ausgewählten Lebensmitteln. (Polybrominated biphenyls and polybrominated diphenylethers – detection and determination in selected food samples). Thesis.* Wilhelms-Universität zu Münster, 1988
- [42] Amts- und Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, 35, 3 (2005), S. 245-251, KEMMLEIN, S, BERGMANN, M. et JANN, O. *Standard measurement method for the determination of polybrominated flame retardants (pentabromodiphenylether, octabromodiphenylether) in products.* Research Report 202 67 300, German Federal Environmental Agency, 2005, UBA-Texte 31/05, ISSN 0722-186X
- [43] RIESS, M. et VAN ELDIK, R., Identification of brominated flame-retardants in polymeric materials by reversed phase liquid chromatography with ultraviolet detection, *Journal of Chromatography A* 827, 1998, p.65-71
- [44] United States Environmental Protection Agency (EPA), EPA 1613: 1994: Tetra- through octa-chlorinated dioxins and furans by isotope dilution HRGC/HRMS
- [45] United States Environmental Protection Agency (EPA), EPA 8270c:1996: Semivolatile organic compounds by gas chromatography and mass spectrometry
- [46] European Union Risk Assessment final report – Volume 17 – EUR 20402 – bis(pentabromophenyl) ether – EINECS No 214-604-9 or CAS No 1163-19-5; <http://rcb.jec.it/esis/>

Cr(VI)

- [47] ISO 3613, *Couches de conversion au chromate sur zinc, cadmium et alliages d'aluminium-zinc et de zinc-aluminium - Méthodes d'essai*
 - [48] DIN 50993-1, Determination of hexavalent chromium in corrosion protection coatings – Part 1: Qualitative analysis
 - [49] EN 15205:2006, Détermination du chrome hexavalent dans les revêtements anticorrosion - Analyse qualitative
 - [50] GMW3034, Absence of Hexavalent Chrome (VI) Coatings
 - [51] U.S. Department of Health and Human Services – Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Toxicological Profile for Chromium. April, 1993
 - [52] United States Environmental Protection Agency (EPA), EPA method 3060A, “Alkaline Digestion for Hexavalent Chromium”, December 1996
 - [53] United States Environmental Protection Agency (EPA), EPA method 7196A, “Chromium, Hexavalent (colorimetric)”, July 1992
 - [54] ZVO-0102-QUA-02, Qualitative Analysis of Cr-VI in Passivation Layers on Parts by Spot Analysis
-

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

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

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