

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



EMC IC modelling –

Part 3: Models of integrated circuits for EMI behavioural simulation – Radiated emissions modelling (ICEM-RE)

Modèles de circuits intégrés pour la CEM –

Partie 3: Modèles de circuits intégrés pour la simulation du comportement lors de perturbations électromagnétiques – Modélisation des émissions rayonnées (ICEM-RE)



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2017 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 l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

65 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

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

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) 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 IEC

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

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

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

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

65 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



EMC IC modelling –

Part 3: Models of integrated circuits for EMI behavioural simulation – Radiated emissions modelling (ICEM-RE)

Modèles de circuits intégrés pour la CEM –

Partie 3: Modèles de circuits intégrés pour la simulation du comportement lors de perturbations électromagnétiques – Modélisation des émissions rayonnées (ICEM-RE)

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

31.200; 33.100.10

ISBN 978-2-8322-3878-3

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

CONTENTS

FOREWORD.....	6
1 Scope.....	8
2 Normative references	8
3 Terms, definitions, abbreviations and conventions	9
3.1 Terms and definitions.....	9
3.2 Abbreviations.....	10
3.3 Conventions.....	10
4 Philosophy.....	10
5 ICEM-RE macro-model description	11
5.1 General.....	11
5.2 PDN description.....	12
5.3 IA description.....	16
5.4 Electromagnetic field calculation and simulation	16
6 REML format	17
6.1 General.....	17
6.2 REML structure	18
6.3 Global keywords	19
6.4 Header section.....	19
6.5 Frequency definitions.....	20
6.6 Coordinate system definition.....	20
6.7 Reference definition.....	21
6.8 Validity section	21
6.8.1 General	21
6.8.2 Attribute definitions.....	22
6.9 PDN.....	24
6.9.1 General	24
6.9.2 Attribute definitions.....	25
6.9.3 PDN of a single-frequency ICEM-RE.....	26
6.9.4 PDN for multi-frequency ICEM-RE	29
6.10 IA.....	32
6.10.1 General	32
6.10.2 Attribute definitions.....	33
6.10.3 IA of a single-frequency ICEM-RE	34
6.10.4 IA for multi-frequency ICEM-RE	37
7 Extraction	38
7.1 General.....	38
7.2 Environmental extraction constraints.....	39
7.3 Obtaining model parameters from near-field data.....	39
7.3.1 General	39
7.3.2 PDN	40
7.3.3 IA	42
7.4 Extraction based on ICEM-CE simulation	45
7.4.1 General	45
7.4.2 PDN	45
7.4.3 IA	46
8 Validation	46

Annex A (normative) Preliminary definitions for XML representation	48
A.1 XML basics	48
A.1.1 XML declaration.....	48
A.1.2 Basic elements	48
A.1.3 Root element	48
A.1.4 Comments	48
A.1.5 Line terminations	49
A.1.6 Element hierarchy.....	49
A.1.7 Element attributes	49
A.2 Keyword requirements	49
A.2.1 General	49
A.2.2 Keyword characters	49
A.2.3 Keyword syntax	50
A.2.4 File structure	50
A.2.5 Values	52
Annex B (informative) Electromagnetic fields radiated by an elementary electric and magnetic dipole	55
B.1 Electric dipole	55
B.2 Magnetic dipole.....	57
Annex C (informative) Example files	60
C.1 Minimum default ICEM-RE file	60
C.2 Microcontroller example in REML format.....	61
Annex D (normative) REML valid keywords and usage.....	63
D.1 Root element keywords.....	63
D.2 File header keywords.....	64
D.3 Validity section keywords.....	65
D.4 Global keywords	65
D.5 Pdn section keywords.....	66
D.6 Ia section keywords	67
Annex E (informative) ICEM-RE extraction methods	69
E.1 General.....	69
E.2 ICEM-RE Modelling methods	69
E.2.1 Model _{Hman}	69
E.2.2 Model _H	69
E.2.3 Model _{EM_Inv}	71
E.2.4 Model _{EM_Iter}	72
E.2.5 Model _{EM_TD}	72
E.2.6 Model selection guide	73
E.3 ICEM-RE modelling environment from near-field data	73
E.3.1 General	73
E.3.2 Modelling design-flow	74
E.3.3 ICEM-RE importation into 3D electromagnetic tools.....	75
E.4 ICEM-RE modelling from ICEM-CE	76
Annex F (informative) ICEM-RE model validation examples	78
F.1 General.....	78
F.2 Validation on a microcontroller	78
F.2.1 General	78
F.2.2 Details of the microcontroller	78

F.2.3	Case 1: Choosing manual model Model _{Hman}	78
F.2.4	Case 2: Choosing one of the automatic magnetic field models	79
F.3	Validation on an oscillator circuit.....	81
F.4	Example of validation on passive devices	84
F.5	Examples of validation on active devices	85
F.5.1	Extraction from near-field measurements.....	85
F.5.2	Extraction from ICEM-CE model	85
Annex G (informative)	ICEM-RE macro-model usage examples	86
G.1	General.....	86
G.2	Methodology for exploiting ICEM-RE macro-model.....	86
Bibliography		88
Figure 1	General ICEM-RE model structure.....	12
Figure 2	Geometrical representation of the ICEM-RE PDN.....	13
Figure 3	Representation of an elementary dipole in the ICEM-RE PDN.....	13
Figure 4	An elementary current loop of radius “a” in 3D space	14
Figure 5	Duality theorem between a current loop and a magnetic dipole	14
Figure 6	Example of referential points to describe the geometry	15
Figure 7	PDN definition at three different frequencies	16
Figure 8	REML inheritance hierarchy	18
Figure 9	Format for defining PDN vector data in an external file.....	28
Figure 10	Format for defining IA vector data in an external file.....	36
Figure 11	Electromagnetic field measurement.....	39
Figure 12	B_z field in nT measured at 3 mm above the microprocessor at 80 MHz.....	40
Figure 13	Example of electromagnetic field emitted by an elementary current line	41
Figure 14	Manual current mapping.....	41
Figure 15	Model representation with N automatically detected dipoles	42
Figure 16	Comparison between the modelled and measured EM fields at 2 mm above an oscillator.....	44
Figure 17	A simple ICEM-CE PDN representing the package and the internal network impedance between the power rails	45
Figure 18	Reconstructing the geometry of the package model (ICEM-RE PDN) from IBIS and its link with the electrical model (ICEM-CE PDN)	46
Figure 19	Graphical representation of the example validation procedure.....	47
Figure A.1	Multiple XML files	51
Figure A.2	XML files with data files (*.dat)	51
Figure A.3	XML files with additional files.....	52
Figure B.1	An elementary current line in space	55
Figure B.2	Elementary magnetic dipole in space	57
Figure C.1	Microcontroller used for illustration	61
Figure C.2	Data file representing the PDN information of the microcontroller	62
Figure C.3	Data file representing the IA information of the microcontroller	62
Figure E.1	Manually defined electric dipole array in Model _{Hman}	69
Figure E.2	Electric and magnetic dipole array in Model _{EM_Inv}	71
Figure E.3	Example of an ICEM-RE modelling environment	74

Figure E.4 – ICEM-RE modelling design-flow	75
Figure E.5 – Example of an imported ICEM-RE PDN and IA in a 3D simulation tool	76
Figure E.6 – Design-flow to obtain ICEM-RE from ICEM-CE model	77
Figure F.1 – Microcontroller circuit used for model validation	78
Figure F.2 – Manual dipoles representing the PDN of the microcontroller	79
Figure F.3 – Comparison between the modelled and measured fields at 4 mm above the microcontroller using $Model_{Hman}$	79
Figure F.4 – Validation of $Model_H$ on the microcontroller	80
Figure F.5 – Detection of dipoles representing the microcontroller using $Model_{EM_Iter}$	80
Figure F.6 – Validation of $Model_{EM_Iter}$ on the microcontroller	81
Figure F.7 – Oscillator circuit used for model validation	81
Figure F.8 – Schematic of the oscillator used for validation	82
Figure F.9 – Validation of the magnetic field predicted with $Model_{EM_Inv}$ and $Model_{EM_Iter}$ on the oscillator at 10 mm height	83
Figure F.10 – Validation of the electric field predicted with $Model_{EM_Inv}$ and $Model_{EM_Iter}$ on the oscillator at 10 mm height	83
Figure F.11 – Modelled maximum total magnetic field as a function of height (z) above the oscillator compared with measurements	84
Figure G.1 – Typical EMC issues at equipment and system level covered by ICEM-RE	87
Table 1 – PDN format	15
Table 2 – Definition of the <i>Validity</i> section	22
Table 3 – Definition of the <i>Submodel</i> section of the <i>Pdn</i> element	25
Table 4 – Definition of the <i>Vector</i> keyword in the <i>Pdn</i> section	25
Table 5 – Valid fields of the <i>Submodel</i> keyword for single-frequency PDN	27
Table 6 – Conditions for correct annotation of single-frequency PDN by the REM parser	27
Table 7 – Valid fields of the <i>Vector</i> keyword for single-frequency PDN	27
Table 8 – Valid file extensions in the <i>Pdn</i> section	29
Table 9 – Conditions for correct annotation of multi-frequency PDN by the REM parser	30
Table 10 – Definition of the <i>Submodel</i> section of the <i>Ia</i> element	32
Table 11 – Definition of the <i>Vector</i> keyword in the <i>Ia</i> section	33
Table 12 – Valid fields of the <i>Submodel</i> keyword for single-frequency IA	34
Table 13 – Conditions for correct annotation of single-frequency IA by the REM parser	34
Table 14 – Valid fields of the <i>Vector</i> keyword for single-frequency IA	35
Table 15 – Accepted file extensions in the <i>Ia</i> section	37
Table 16 – Conditions for correct annotation of multi-frequency IA by the REM parser	37
Table A.1 – Valid logarithmic units	53
Table E.1 – ICEM-RE model selection guide	73
Table F.1 – ICEM-RE model validation on passive structures	85

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

EMC IC MODELLING –

**Part 3: Models of integrated circuits for EMI behavioural simulation –
Radiated emissions modelling (ICEM-RE)**

FOREWORD

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

International Standard IEC 62433-3 has been prepared by subcommittee 47A: Integrated Circuits, of IEC technical committee 47: Semiconductor devices.

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

FDIS	Report on voting
47A/1000/FDIS	47A/1008/RVD

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

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

A list of all parts in the IEC 62433 series, published under the general title *EMC IC modelling*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website 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.

IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62433-3:2017

EMC IC MODELLING –

Part 3: Models of integrated circuits for EMI behavioural simulation – Radiated emissions modelling (ICEM-RE)

1 Scope

This part of IEC 62433 provides a method for deriving a macro-model to allow the simulation of the radiated emission levels of an Integrated Circuit (IC). This model is commonly called Integrated Circuit Emission Model – Radiated Emission, ICEM-RE. The model is intended to be used for modelling a complete IC, with or without its associated package, a functional block and an Intellectual Property (IP) block of both analogue and digital ICs (input/output pins, digital core and supply), when measured or simulated data cannot be directly imported into simulation tools.

The proposed IC macro-model will be inserted in 3D electromagnetic simulation tools so as to:

- predict the near-radiated emissions from the IC
- evaluate the effect of the radiated emissions on neighbouring ICs, cables, transmission lines, etc.

This part of IEC 62433 has two main parts:

- the first is the electrical description of ICEM-RE macro-model elements,
- the second part proposes a universal data exchange format called REML based on XML. This format allows encoding the ICEM-RE in a more useable and generic form for emission simulation.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements 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.

IEC TS 62433-1, *EMC IC modelling – Part 1: General modelling framework*

IEC 62433-2, *EMC IC modelling – Part 2: Models of integrated circuits for EMI behavioural simulation – Conducted emissions modelling (ICEM-CE)*

IEC 61967-1, *Integrated circuits – Measurement of electromagnetic emissions, 150 kHz to 1 GHz – Part 1: General conditions and definitions*

IEC TS 61967-3, *Integrated circuits – Measurement of electromagnetic emissions – Part 3: Measurement of radiated emissions – Surface scan method*

ANSI INCITS 4:1986, *Information Systems – Coded Character Sets – 7-Bit American National Standard Code for Information Interchange (7-Bit ASCII)*

3 Terms, definitions, abbreviations and conventions

3.1 Terms and definitions

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

3.1.1

electric dipole

linear current-carrying element or wire that is always of finite length

3.1.2

current loop

closed current-carrying element or wire that is always of finite radius

3.1.3

magnetic dipole

linear “magnetic current” carrying element or wire that is of finite length

Note 1 to entry: A magnetic dipole is an equivalent magnetic source counterpart of an electric dipole that is used for mathematical formulations. This quantity is purely mathematical and not physical in nature.

Note 2 to entry: This term is used in an abstract manner to explain the motion of magnetic charges giving rise to magnetic currents, when compared to their dual quantities of moving electrical charges giving rise to electrical currents.

3.1.4

PDN

Passive Distribution Network

component of an IC model that represents the geometrical base within which equivalent radiating sources would be positioned.

3.1.5

IA

Internal Activity

component of an IC model represented by a current or voltage source, which originates in activity of active devices in an IC or in a portion of the IC

Note 1 to entry: In this part of IEC 62433, a current source is commonly used to excite the elements of the PDN.

[SOURCE: IEC TS 62433-1:2011, 3.3, modified — Note 1 to entry has been added]

3.1.6

model_{Hman}

radiated magnetic emission model with manual sources

3.1.7

model_H

radiated magnetic emission model with automatic source detection

3.1.8

model_{EM_Inv}

radiated electric and magnetic emission model based on automatic source detection, using the matrix inverse method for problem solving

3.1.9

model_{EM_Iter}

radiated electric and magnetic emission model based on automatic source detection, using an iterative method for problem solving

3.1.10

model_{EMTD}

time-harmonic radiated electric and magnetic emission model based on automatic source detection, using an iterative method for problem solving

3.1.11

section

XML element placed one level below the root element or within another section and that contains one or more XML elements, but no value

[SOURCE: IEC 62433-4:—, 3.1.1]

3.1.12

parent

keyword which is one level above another keyword

[SOURCE: IEC 62433-4:—, 3.1.2]

3.1.13

child

keyword which is one level below another keyword

[SOURCE: IEC 62433-4:—, 3.1.3]

3.1.14

parser

tool for syntactic analysis of data that is encoded in a specified format

[SOURCE: IEC 62433-4:—, 3.1.6]

3.1.15

Radiated Emissions Markup Language

REML

data exchange format for ICEM-RE macro-model

Note 1 to entry: This note applies to the French language only.

3.2 Abbreviations

REM	Radated Emission Model
XML	eXtensible Markup Language

3.3 Conventions

For the sake of clarity, but with some exceptions, the writing conventions of XML language have been used in text and tables.

The symbol “μ” is used in the text part to define micro = 1e-6. The symbol “u” is used in the XML parts to define the micro = 1e-6.

4 Philosophy

With every generation, ICs have become more and more complex and diverse with respect to integration density and functional capabilities in a reduced form-factor. ICs have also become faster more than ever with lower supply voltages. Modern ICs may contain on-chip radio frequency modules co-existing with analogue and/or digital logic cores. Printed Circuit Board (PCB) carrying these ICs has also become denser. The emissions from one IC can couple

back into neighbouring components (ICs, passive components, traces, etc.) and provoke undesired system performance or even system failure. Consequently, the emissions from ICs are becoming more and more critical.

Due to this increased risk of emissions emanating from ICs, it is indispensable to use simulation tools for evaluating the emission behaviour of every module during the IC design stages. It is therefore necessary to have accurate radiated electromagnetic emission models in order to predict the radiated emission behaviour of ICs and their effects on neighbouring circuits (coupling to PCB tracks, connectors, etc.). Precise evaluation of emission risks at board level cannot be done otherwise.

IC's equivalent radiation sources integration in 3D electromagnetic solvers can be achieved using different input techniques. This part of IEC 62433 identifies and specifies a more generic, exchangeable and validated macro-model for simulating the radiated emission behaviour at IC level. For ICs with multiple operating modes, functionalities, programmable logics and conditions of the IC, its emission profile would be completely different depending on the operating mode. Consequently, ICEM-RE macro-models are valid only in the conditions in which they have been established. The models will be used to predict the radiated electromagnetic emissions at application level.

ICEM-RE macro-model data is arranged in a decipherable nested manner using XML format. The objective of this exchange format, called Radiated Emission Markup Language (REML), is to create simple and practical universal access to ICEM-RE macro-model. The preliminary definitions for XML representation is given in Annex A.

5 ICEM-RE macro-model description

5.1 General

The internal structure of an IC can be broken down into two parts:

- Passive parts, (parasitic resistance (R), inductance (L) and capacitance (C) of tracks, Electrostatic Discharge (ESD) protection components, pins and bonding) which connects the external environment to the internal IC blocks.
- Active parts, (Central Processing Unit (CPU) core, clock system, memory, analogue blocks). It is these active internal blocks that are the emission sources in an IC.

The ICEM-RE macro-model consists of a set of data describing these two parts:

- PDN: the Passive Distribution Network (PDN) represents the geometrical base within which the equivalent radiating sources would be positioned. It contains the geometrical coordinates of the model.
- IA: the Internal Activity (IA) represents the excitation source of the radiating elements of the PDN. It contains the amplitude and phase of the electrical current of the model.

Figure 1 presents the general ICEM-RE macro-model structure.

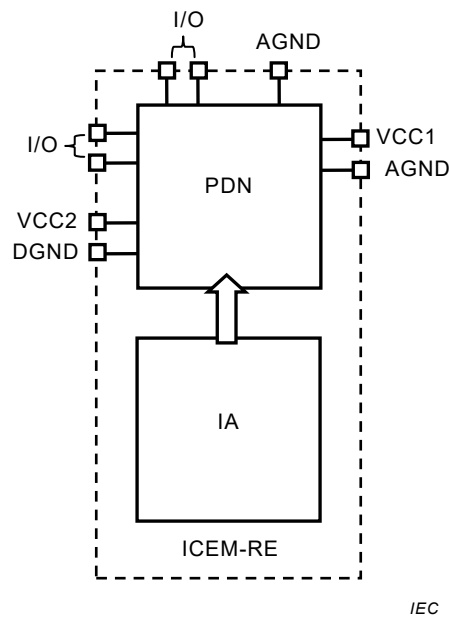


Figure 1 – General ICEM-RE model structure

There is a direct link between the PDN block and IA block. The PDN represents a set of equivalent radiation sources such as electric dipoles or electric current loops which serves as the geometrical base for the IA. The source coordinates are defined with respect to a point in space which is called the reference point. More details of the reference point can be found in 5.2.

The IA represents the current flowing in each of the equivalent radiating element in the PDN. The current value is complex in nature, i.e., the currents through the dipole (or loop) are represented with their magnitude and phase. The phase value is relative to the EM field's phase at the reference point. By definition, each element of the PDN has a specific IA, both the PDN coordinates and IA phase values are referenced to the reference point.

The ICEM-RE macro-model is generally defined in the frequency domain. It does not inherently have a frequency limit for validity i.e. ICEM-RE structure is valid over any frequency range. However, depending on the data used for model extraction, the model's limit of validity is set by the input data used for extracting the model. Moreover, the model is defined only in the conditions in which it has been extracted: IC's operating conditions, activated functions, external components (decoupling capacitors, external oscillators, etc.) needed for IC's basic functioning, etc. Any variation from the specified conditions could necessitate a modification to the model (re-extract the model). The incorporation of the variation is not included in the current edition.

5.2 PDN description

The PDN consists of passive elements for the package, bonding and on-chip interconnections. These elements behave like radiating antennas when high-frequency signals (currents) and transients' flow through them. The PDN block of ICEM-RE can be described using a set of equivalent radiation sources such as electric dipoles or magnetic loops representing the different package/bonding/interconnection elements as shown in Figure 2.

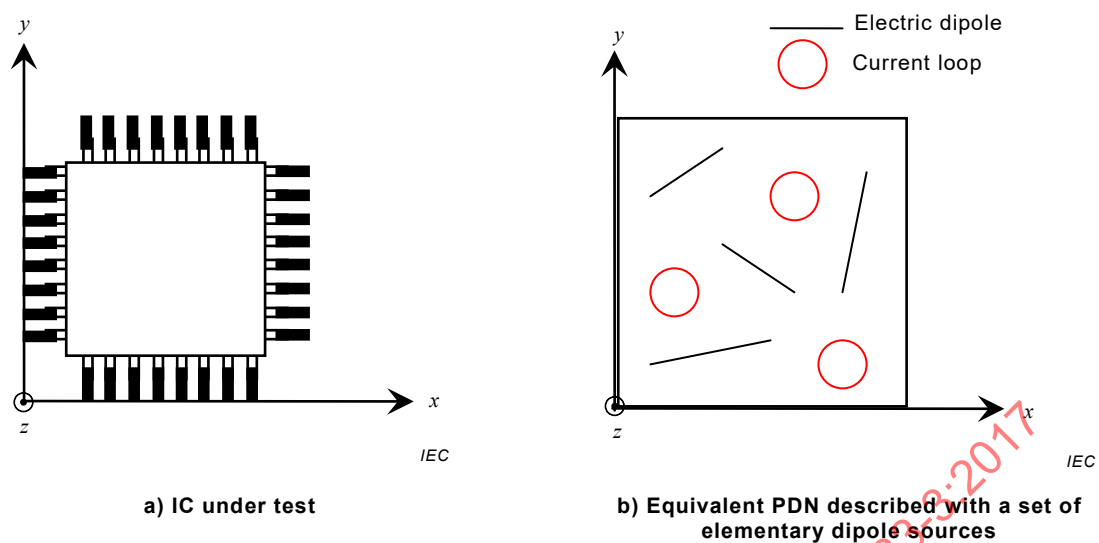


Figure 2 – Geometrical representation of the ICEM-RE PDN

The dimensions of the equivalent sources shall be thin and small (normally less than one tenth of the wavelength) with respect to the wavelength.

An elementary electric dipole in 3D space, representing the PDN, is shown in Figure 3.

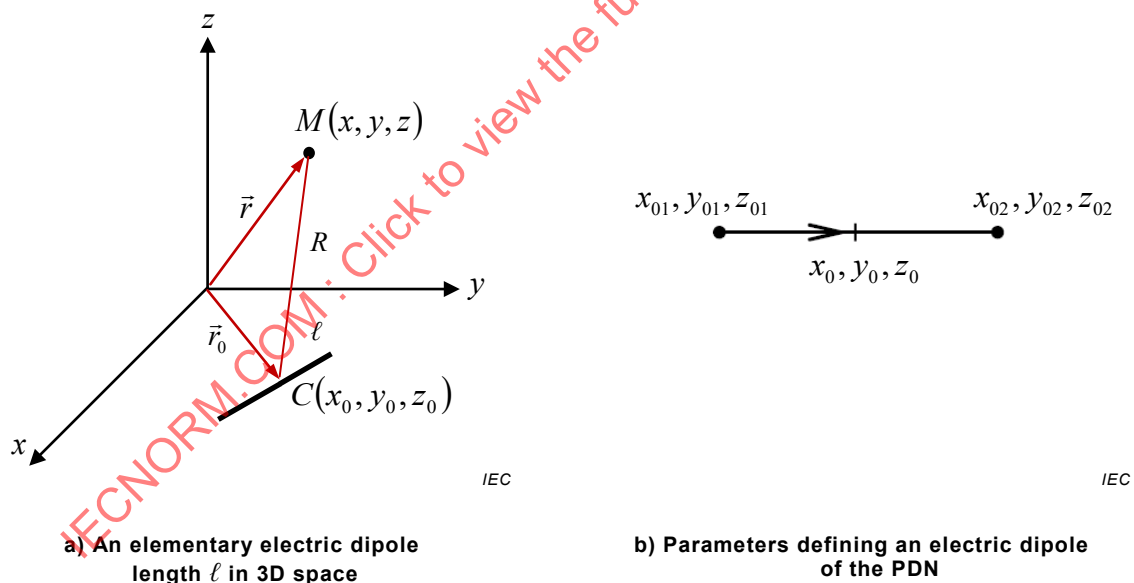
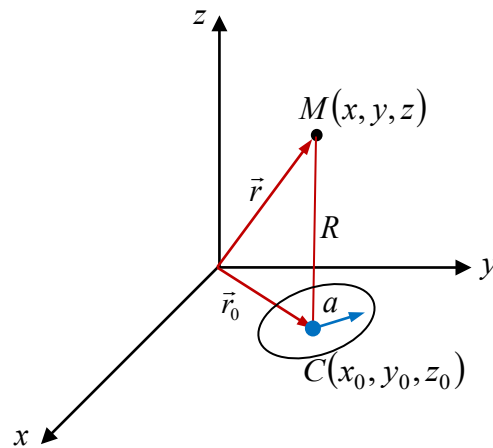


Figure 3 – Representation of an elementary dipole in the ICEM-RE PDN

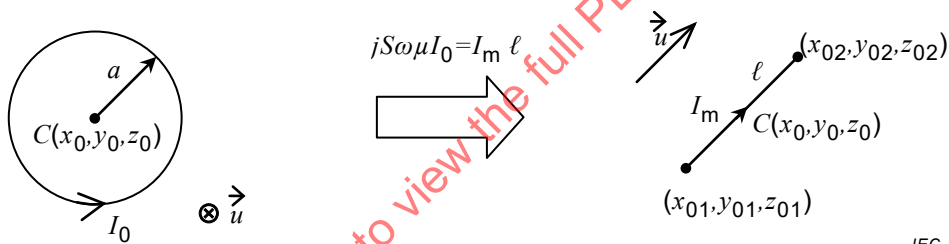
Similar to an electric dipole, an elementary current loop is shown in Figure 4.



IEC

Figure 4 – An elementary current loop of radius “a” in 3D space

In order to facilitate the representation of the current loop and to correlate it very similar to an electric dipole, the duality theorem between a loop and a magnetic dipole is used. A current loop, carrying an electric current, can be represented using its equivalent “magnetic source” counterpart, called magnetic dipole as shown in Figure 5. The magnetic dipole is oriented in such a way that the vector is “normal” to the current loop.



IEC

Figure 5 – Duality theorem between a current loop and a magnetic dipole

In Figure 5, S is the surface of the current loop ($S=\pi a^2$), μ is the permeability of the medium in which the current loop is placed, ω is the angular frequency, I_0 is the electric current passing through the current loop, I_m is dual magnetic current passing through the magnetic dipole and ℓ is the length of the dual magnetic dipole.

Using this duality, it is now possible to represent the loop using parameters very similar to those of an electric dipole as seen in Figure 3 (b) since they share a same topology.

NOTE This duality only serves as a guide to establish mathematical formulations and solutions. It is used in an abstract manner to explain the motion of magnetic charges giving rise to magnetic currents, when compared to their dual quantities of moving electrical charges giving rise to electrical currents. These terms (magnetic charges and magnetic currents) are purely mathematical in nature since it is known as of today, that there are no magnetic charges or currents in nature.

The definition of the PDN shall include all the necessary information to implement the model for simulation. In general the following main items shall be defined:

- The geometry of the equivalent radiation structure (dipole type: "electric" or "magnetic")
- The list giving the dipoles coordinates in triplet

The dipole coordinates are defined with respect to the reference point in space. An example of the reference point is described in Figure 6.

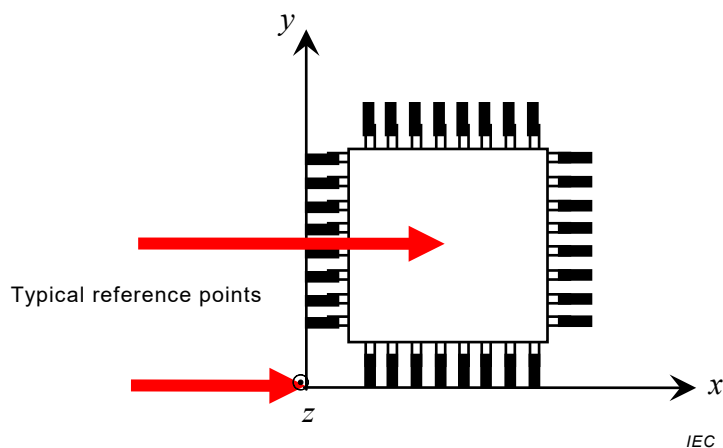


Figure 6 – Example of referential points to describe the geometry

The reference point can be either one of the extremities of the IC under test or the centre of the IC under test. Example reference points are the lower-left corner or the centre of the IC as shown in Figure 6.

The PDN definition shall describe the equivalent radiation structures in the frequency domain with the type of the dipole used and the coordinates of the dipoles. The definition of the PDN for electric and magnetic dipoles is given in Table 1.

Table 1 – PDN format

PDN Format
Start-coordinates (x_{01}, y_{01}, z_{01}) and End-coordinates (x_{02}, y_{02}, z_{02}) in the cartesian system
or
Start-coordinates $(r_{01}, \phi_{01}, z_{01})$ and End-coordinates $(r_{02}, \phi_{02}, z_{02})$ in the cylindrical system
or
Start-coordinates $(r_{01}, \theta_{01}, \phi_{01})$ and End-coordinates $(r_{02}, \theta_{02}, \phi_{02})$ in the spherical system

One or several vectors (dipoles) can be used to describe the IC under test for a particular frequency. For a given frequency, each vector shall represent either an electric dipole or a magnetic dipole. Thus an electric dipole or a magnetic dipole vector contains two parameter definitions: start-coordinates (x_{01}, y_{01}, z_{01}) and end-coordinates (x_{02}, y_{02}, z_{02}) as proposed in Table 1. It is possible to represent these coordinates in Cartesian coordinate system (x, y, z) or in the cylindrical system (radius: r , azimuth: ϕ , height: z) or in the spherical coordinate system (radius: r , elevation: θ , azimuth: ϕ). It is possible to represent multiple dipole types for a given frequency as presented in Figure 7.

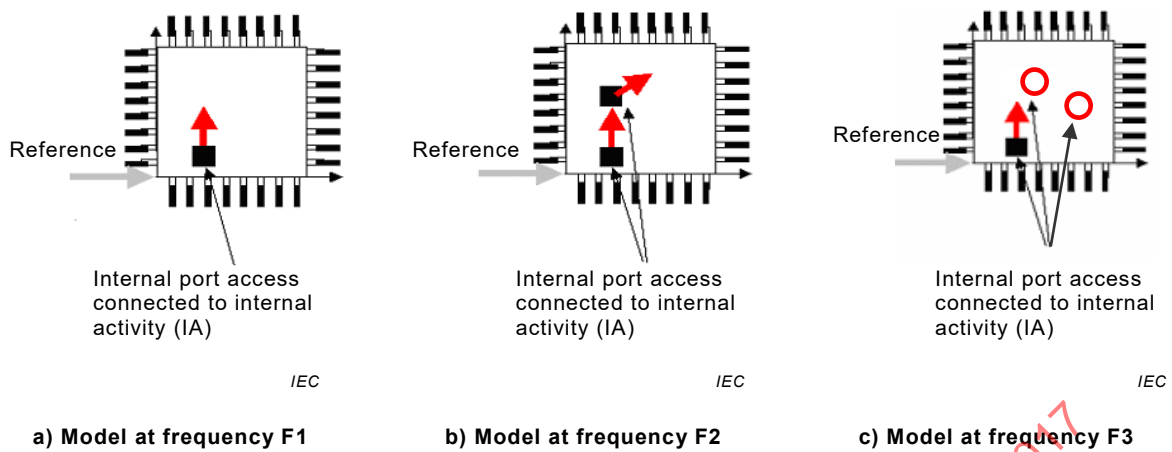


Figure 7 – PDN definition at three different frequencies

5.3 IA description

An IA sub-model consists of an electric (I_e) or magnetic (I_m) current source, depending on the PDN chosen to define the device. It is assumed that the current in the electric or magnetic dipole is constant over the length of the dipole. The sub-model description is mainly defined in the frequency domain. In some cases, the description can be done in the time domain. In that case, a Fourier transform can be used to work in the frequency domain. IA will be described by its magnitude and phase extracted from measurements or simulations at a particular frequency. The referential point used when defining the PDN is used as the referential point for the IA. The phase component of the IA is referenced to the phase of the EM fields at the referenced point.

5.4 Electromagnetic field calculation and simulation

Once the PDN and IA are established, the expressions of the electric and magnetic fields radiated at a point M by an electric dipole, deduced from the magnetic vector potential $\vec{A}$, are used to build the model. Thus, the different components ($p = \{x, y, z\}$) of electric and magnetic fields emitted by an electric dipole can be expressed as:

$$E_{A,p} = f_{1p}(k, x, y, z, x_{01}, y_{01}, z_{01}, x_{02}, y_{02}, z_{02}, I_e, \varepsilon)$$

$$H_{A,p} = g_{1p}(k, x, y, z, x_{01}, y_{01}, z_{01}, x_{02}, y_{02}, z_{02}, I_e)$$

where f_1 and g_1 are functions depending on the following variables:

- (x, y, z) are the coordinates of the point M where electromagnetic field is evaluated
- (x_{01}, y_{01}, z_{01}) are the coordinates of the start point of the dipole (vector)
- (x_{02}, y_{02}, z_{02}) are the coordinates of the end point of the dipole (vector)
- k is the wave number ($k = 2\pi/\lambda$, λ is the wavelength)
- I_e is the current through the electric dipole, flowing from (x_{01}, y_{01}, z_{01}) to (x_{02}, y_{02}, z_{02})
- ε is the permittivity of the medium in which point M is located

Similarly, the different components ($p = \{x, y, z\}$) of electric and magnetic fields radiated by a magnetic dipole are deduced from the electric vector potential, $\vec{F}$ and are calculated to be:

$$E_{F,p} = f_{2p}(k, x, y, z, x_{01}, y_{01}, z_{01}, x_{02}, y_{02}, z_{02}, I_m, \varepsilon)$$

$$H_{F,p} = g_{2p}(k, x, y, z, x_{01}, y_{01}, z_{01}, x_{02}, y_{02}, z_{02}, I_m, \mu)$$

where f_2 and g_2 are functions depending on the following variables:

(x, y, z)	are the coordinates of the point M where electromagnetic field is evaluated
(x_{01}, y_{01}, z_{01})	are the coordinates of the start point of the dipole (vector)
(x_{02}, y_{02}, z_{02})	are the coordinates of the end point of the dipole (vector)
k	is the wave number ($k = 2\pi/\lambda$, λ is the wavelength)
I_m	is the magnetic current through the magnetic dipole, flowing from (x_{01}, y_{01}, z_{01}) to (x_{02}, y_{02}, z_{02})
ε	is the permittivity of the medium in which point M is located
μ	is the permeability of the medium in which point M is located

The detailed expressions of fields emitted by an electric or magnetic dipole are given in Annex B.

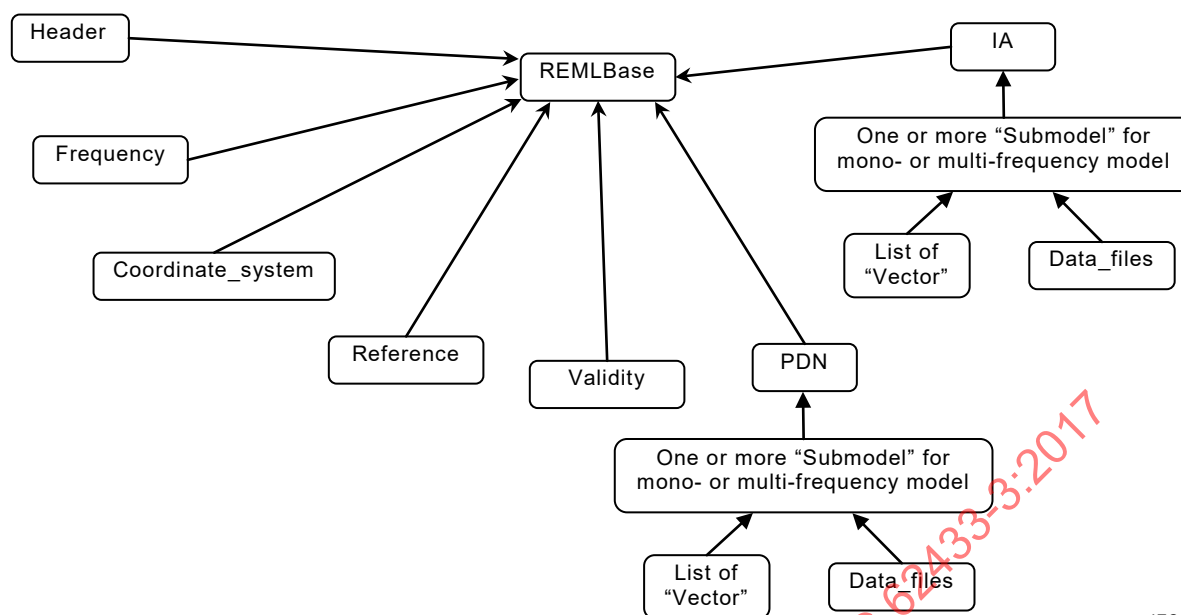
6 REML format

6.1 General

Data of the ICEM-RE macro-model is arranged in XML format, henceforth called as Radiated Emissions Markup Language (REML). The model data is separated into seven parts:

- Header containing general information
- Description of frequencies in which the model is established
- Description of the coordinate system in which the model details are specified
- Description of the reference point in the specified coordinate system
- Description of the ICEM-RE validity criteria
- Description of the PDN data
- Description of the IA data

Each of the main components composing an REML model definition has a specific data type that is derived directly or indirectly from a single abstract type called REMLBase. The inheritance hierarchy is depicted in Figure 8.



IEC

Figure 8 – REML inheritance hierarchy

The top level of a REML model definition consists of these components:

```

beginning of model definition
  model header definition
  frequency definition
  coordinate system definition
  reference point definition
  model validity definition
  model PDN
model IA
end of model definition

```

This exchange format uses eXtensible Markup Language (XML) 1.0 (Fourth Edition) to structure the information. XML is derived from the Standard Generalized Markup Language (SGML) [1] ¹.

The XML encoding rules discussed in Annex A ensure that the XML (REML) file can be correctly parsed by a Radiated Emission Model (REM) parser. An example REML file, conforming to XML encoding format, is given in Annex C. The REML keywords and their usage rules are detailed in Annex D.

6.2 REML structure

Considering all the rules defined above, and being consistent with model description requirements in IEC TS 62433-1, a typical ICEM-RE macro-model file is represented as shown below:

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<REmodel>
  <!-- HEADER -->
  <Header>
    ...
  </Header>
  <!-- FREQUENCY DEFINITIONS-->

```

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

```

    <Frequency>
        ...
    </Frequency>
    <!-- COORDINATE SYSTEM DEFINITION-->
    <Coordinate_system>
        ...
    </Coordinate_system>
    <!-- REFERENCE POINT DEFINITION-->
    <Reference>
        ...
    </Reference>
    <!-- MODEL VALIDITY DEFINITION-->
    <Validity>
        ...
    </Validity>
    <!-- MODEL PDN DATA -->
    <Pdn>
        ...
    </Pdn>
    <!-- MODEL IA DATA -->
    <Ia>
        ...
    </Ia>
</REmodel>

```

REML format is based on XML representation. The basic XML encoding rules in Annex A are applicable for REML structure. The root element of REML file is *REmodel*. All model information shall be listed under the root element.

The *Header*, *Frequency*, *Validity*, *Pdn* and *Ia* sections are minimum and mandatory information of the ICEM-RE macro-model. The *Coordinate_system* and *Reference* sections are optional and when absent, the REM parser will assume default values.

6.3 Global keywords

Documentation, *Notes*, *Unit* sections are global keywords and can be placed anywhere in the file except within an element containing a value. See D.4 for more information on their usage.

6.4 Header section

Readers may wonder about the motivations for an independent Header section. A simpler approach to creating the header information would be to place them all directly at the top level under <REmodel> ... </REmodel>. Instead, it is chosen to group them within the XML element <Header>, to better organize the components and makes visual reading of model definitions easier. It is thus proposed to define header information within the *Header* tag. The minimum details are the model version number, filename and the file version number. Other header contents are freely dimensioned as per IEC TS 62433-1, giving information such as:

- DUT reference
- Authors' name
- Date
- Measurement method
- Copyright
- Disclaimer
- Documentation

EXAMPLE An example Header section may be defined as shown

```

<REmodel>
  <Header>
    <Rem_ver>1.0</Rem_ver>
    <Filename>ExampleICEMRE_file.reml</Filename>

```

```

    <File_ver>1.0</File_ver>
    <Author>Valeo 1</Author>
    <Dut>Microcontroller 16bit</Dut>
    <Date>August 1, 2013</Date>
    <Meas_method>Near-field scan</Meas_method>
  </Header>
  ...
</REmodel>

```

A detailed list of valid keywords under the *Header* section is available in Annex D.

6.5 Frequency definitions

As stated previously, the ICEM-RE macro-model is defined in the frequency domain. The frequency terms and units involved in the model are defined within the *Frequency* and *Unit* tags respectively. The *Unit* tag is a child to the *Frequency* element.

A minimum of one frequency shall be entered in this section. For cases when only one frequency value is to be entered, it is possible to use the numerical value with unit string together as explained in A.2.5.3 (see Example 1). Nevertheless, the unit can also be optionally described within the *Unit* section as shown in Example 2. It is not possible to create a list of unit definitions under a *Unit* section. A *List* element shall be used to define more than one frequency values as shown in Example 3.

EXAMPLE 1 An example of the *Frequency* section with numerical value and unit string together.

```

<REmodel>
  ...
  <Frequency>100MHz</Frequency>
  ...
</REmodel>

```

EXAMPLE 2 An example of the *Frequency* section with a *Unit* section.

```

<REmodel>
  ...
  <Frequency>
    <Unit>MHz</Unit>
    100
  </Frequency>
  ...
</REmodel>

```

EXAMPLE 3 An example of the *Frequency* section with a *Unit* section and a *List* section for defining more than one frequency values.

```

<REmodel>
  ...
  <Frequency>
    <Unit>MHz</Unit>
    <List>
      100 200 300 400 500
    </List>
  </Frequency>
  ...
</REmodel>

```

6.6 Coordinate system definition

The coordinate system in which the PDN parameters are defined is specified in this section. As explained in 5.2, the dipole parameters of the PDN can be either expressed in the Cartesian system or in the Cylindrical system or in the Spherical system. Therefore, only the following values (string) shall be used to define this attribute:

- "Cartesian": parameters in Cartesian system (x, y, z)
- "Cylindrical": parameters in Cylindrical system (radial distance: r , azimuth: φ , height: z)

- "Spherical": parameters in Spherical system (radial distance: r , elevation: θ , azimuth: φ)

This section does not possess any child elements.

This is an optional section. When absent, the default value is "Cartesian", and the same is used for the entire ICEM-RE macro-model.

EXAMPLE The following syntax specifies the use of spherical coordinate system.

```
<REmodel>
...
  <Coordinate_system>
    Spherical
  </Coordinate_system>
...
</REmodel>
```

6.7 Reference definition

The *Reference* section is used to represent the reference point (coordinates) of the PDN and IA data. As explained in 5.2, this coordinate is used as reference for the dipole vector points in the PDN and the phase of the currents flowing through the dipoles in the IA. The coordinates shall be specified in the coordinate system defined in the *Coordinate_system* section. The coordinates shall always be defined in three-dimensional space in an ordered triplet of axis written in parentheses and separated by commas without any spaces.

The units of the coordinates can be directly passed along with the values of each point as explained in A.2.5.3 or using the global keyword *Unit* (see 6.3).

When defining with Cylindrical or Spherical coordinates, the *Unit* attribute is applied only to the radial distance and height (cylindrical system). The accepted unit is meters ("m") for radial distance with all the valid scaling factors described in A.2.5.5 and degree for angular parameters.

This section is optional. When absent, the default value is "(0,0,0)".

EXAMPLE An example *Reference* section in the Cartesian coordinate system is shown: 10 mm in x-axis, 6 mm in the y-axis and 0 mm in the z-axis.

```
<REmodel>
...
  <Coordinate_system>
    Cartesian
  </Coordinate_system>
  <Reference>
    <Unit>mm</Unit>
    (10,6,0)
  </Reference>
...
</REmodel>
```

6.8 Validity section

6.8.1 General

The *Validity* section is used to represent the conditions in which the ICEM-RE macro-model is defined as per IEC 62433-1. This section is strictly informative to the user and independent to all other sections in the REML file.

Table 2 lists the various recognized keywords in the *Validity* section.

Table 2 – Definition of the *Validity* section

Validity
Power_supply : Power supply range as a string (required)
Frequency_range : Frequency range as a string with units (required)
Temperature_range : Temperature range in which the model is extracted (required). To be specified with units.

This definition is not exhaustive and is open for progress and betterment.

Documentation pertaining to the IC such as datasheets, test-reports, ICEM-RE extraction report etc. shall be specified with the global keyword *Documentation* in the form of a valid string that specifies the path to the corresponding documentation. Many file paths' can be listed one below another. It defaults to "None" when absent. See Clause D.4 for more information on the usage of the *Documentation* keyword.

Any other specific details pertaining to the test condition such as activated functions, clock details, internal operating points, etc. shall be defined with the *Notes* section in the form of a valid string. It defaults to "None" when absent. See Clause D.4 for more information on the usage of the *Notes* keyword.

This section is mandatory and is defined directly under the *REmodel* root element.

EXAMPLE An example of the *Validity* section is shown

```
<REmodel>
...
  <Validity>
    <Power_supply>9V</Power_supply>
    <Frequency_range>40MHz</Frequency_range>
    <Temperature_range>25Celsius</Temperature_range>
    <Notes>Quartz=20MHz, Iin=10mA, PLL unused</Notes>
  </Validity>
...
</REmodel>
```

6.8.2 Attribute definitions

6.8.2.1 Power_supply

The *Power_supply* attribute is used define the supply conditions for which ICEM-RE is valid. This attribute informs the user that the ICEM-RE macro-model is extracted in the specified supply range.

There is no particular format for defining the value for this attribute; it shall be easily comprehensible for proper model usage. The value of this attribute is a data string containing valid text string and/or numerical values with units. See A.2.5.5 for valid units.

This is a required field.

A few examples of the *Power_supply* field are shown in Example 1 and Example 2.

EXAMPLE 1 The following syntax specifies that the model is defined for a supply voltage of 5 V.

```
<Power_supply>5V</Power_supply>
```

EXAMPLE 2 The following syntaxes specify that the model is defined for supply voltages between 2,5 V and 18 V.

```
<Power_supply>[2.5V-18V]</Power_supply>
```

or

```
<Power_supply>between 2.5V and 18V</Power_supply>
```

6.8.2.2 Frequency_range

The *Frequency_range* attribute is used to define the frequency range in which ICEM-RE is valid. This attribute informs the user that the ICEM-RE macro-model is extracted in the specified frequency range and is usable in the same range. The frequency range of validity of the ICEM-RE macro-model shall be the common frequency range of the PDN and IA.

There is no particular format for defining the value for this attribute; it shall be easily comprehensible for proper model usage. The value of this attribute is a data string containing valid text string and/or numerical values with units.

The value of this attribute can be different from that specified within the *Frequency* section, but shall not contradict the same. For example, the *Frequency* section can contain a list of frequencies, but the *Frequency_range* attribute of the *Validity* section can contain a single value defining the whole frequency range (see Example 2). The main purpose of this attribute is to inform the user about the model validity and thus any contradiction will induce misunderstanding.

This is a required field.

A few examples of the *Frequency_range* field are shown in Example 1 and Example 2.

EXAMPLE 1 The following syntaxes specify that the model is valid in the frequency range from 1 MHz to 1 GHz.

```
<Frequency_range>[1MHz-1GHz]</Frequency_range>
```

or

```
<Frequency_range>from 1MHz to 1GHz</Frequency_range>
```

EXAMPLE 2 An example of the *Frequency* section specifying multiple frequencies and the *Validity* section presenting the whole frequency range of model validity.

```
<REmodel>
...
  <Frequency>
    <List>
      10MHz, 30MHz, 100MHz, 300MHz, 500MHz, 700MHz, 900MHz, 1100MHz
    </List>
  </Frequency>
  <Validity>
    ...
    <Frequency_range>[10MHz - 1.1GHz]</Frequency_range>
    ...
  </Validity>
  ...
</REmodel>
```

NOTE Contradiction between the *Frequency_range* definition in the *Validity* section and frequency values defined in the *Frequency* section will not stop model annotation since the *Validity* section is only for user information. REM parser will use the *Frequency* section for model annotation irrespective of what is specified in the *Validity* section.

6.8.2.3 Temperature_range

The *Temperature_range* attribute is used to define the temperature range in which ICEM-RE is extracted. The temperature range of validity of the ICEM-RE macro-model shall be the common temperature range of the PDN and IA.

There is no particular format for defining the value for this attribute; it shall be easily comprehensible for proper model usage. The value of this attribute is a data string containing

valid text string and/or numerical values with units. Valid units for temperature quantity are Celsius (for °C) and K (for Kelvin).

This is a required field.

Examples are shown below.

EXAMPLE 1 The following syntaxes specify that the model is valid in the temperature range between 20 °C and 40 °C.

```
<Temperature_range>[20Celsius-40Celsius]</Temperature_range>
```

or

```
<Temperature_range>from 20Celsius to 40Celsius</Temperature_range>
```

EXAMPLE 2 The following syntax specifies that model is defined only at 298,15 K.

```
<Temperature_range>298.15K</Temperature_range>
```

6.9 PDN

6.9.1 General

The *Pdn* section of the ICEM-RE macro-model contains the PDN data that describes the model. In order to represent both mono-frequency PDN and multi-frequency PDN, the data shall be defined within the *Pdn* keyword using the *Submodel* tag as:

```
<Pdn>
  <Submodel>
    PDN data
  </Submodel>
</Pdn>
```

The unit of the PDN data can be specified within the *Unit* tag under the *Pdn* element. The accepted unit for the PDN is meters ("m") with all the valid scaling factors described in A.2.5.5.

The PDN data pertaining for a given frequency is specified within a *Submodel* section. The frequency of each *Submodel* is also defined within. On one hand, mono-frequency ICEM-RE contains one and only *Submodel* entity with the *Pdn* tag. On the other hand, a multi-frequency ICEM-RE contains multiple *Submodel* elements listed one below another. See Figure 8 for the structural hierarchy.

When many *Submodel* sections are present within a *Pdn* element, the REM parser will check if the total number of *Submodel* sections equals the total number of frequency terms present in the *Frequency* section (see 6.5 for more information).

The frequency range of the PDN shall be specified in the *Validity* section with the *Frequency_range* tag (see 6.8 for more information).

NOTE The frequency range of validity of the PDN is the same as that of the IA.

Table 3 lists the various recognized keywords in the *Submodel* section.

Table 3 – Definition of the *Submodel* section of the *Pdn* element

<i>Submodel</i>
Frequency_value: Frequency at which the model parameters are defined (required for multi-frequency PDN, else optional)
Frequency_unit: Defines the unit of the frequency term (optional)
Vector: Keyword for defining the a single dipole vector (required)
List: PDN source parameter defined inline (required if not Data_files)
Data_files: PDN source parameter defined in an external file (required if not List)

Any other relevant information required for correct understanding (and usage) of the PDN shall be optionally defined within the *Notes* and *Documentation* tags. Details such as IC's operating mode, decoupling capacitors on supply lines, activated functions, grounding details, datasheets and test-reports can be defined.

6.9.2 Attribute definitions

6.9.2.1 Frequency_value and Frequency_unit

The *Frequency_value* attribute is used to define the specificity and validity of the *Submodel*. The listed PDN vectors within this section are defined for that frequency. It is possible to use both numerical value and units together as described in A.2.5.3.

The *Frequency_unit* is an optional attribute to define the units of the frequency term defined in the *Frequency_value* attribute. If this field is absent, default SI unit ("Hz") is used.

For each *Submodel* element within the *Pdn* section, the REM parser will link a data structure by attaching the value defined *Frequency_value* field of the *Submodel* element with one of the values defined in the *Frequency* section. If a match is not found, then the particular *Submodel* element is not annotated by the REM parser.

6.9.2.2 Vector

Each dipole defining the PDN data is defined within a *Vector* tag in the specified coordinate system (see 6.6) with respect to the reference point specified in the *Reference* section (see 6.7).

If the ICEM-RE PDN contains only one *Vector* element, then the corresponding *Vector* is directly defined under the *Submodel* section defined at a particular frequency.

If the PDN at a particular frequency is defined with multiple dipole vectors, then the different *Vector* elements are listed under a *Submodel* section using a *List* keyword. Table 4 lists the various recognized fields of the *Vector* keyword in the *Pdn* section:

Table 4 – Definition of the *Vector* keyword in the *Pdn* section

<i>Vector</i>
Type: Type of the dipole source: "Electric", "Magnetic" (required)
Name: Name of the dipole describing the PDN – Any valid string. Shares the same namespace with the IA vector element (required)
Start: Start-coordinates of the dipole: "(x ₀₁ ,y ₀₁ ,z ₀₁)" or "(r ₀₁ ,θ ₀₁ ,φ ₀₁)" or (r ₀₁ ,φ ₀₁ ,z ₀₁)" (required)
End: End-coordinates of the dipole "(x ₀₂ ,y ₀₂ ,z ₀₂)" or "(r ₀₂ ,θ ₀₂ ,φ ₀₂)" or (r ₀₂ ,φ ₀₂ ,z ₀₂)" (required)

The *Type* attribute tells the REM parser on what kind of dipole is used. The dipole type can be either "Electric" or "Magnetic" signifying electric or magnetic dipoles respectively. This is a mandatory field. If undefined, the REM parser will not decipher the information of the particular Vector.

The *Name* field specifies a valid name of the dipole. This is a mandatory field and shares the same namespace with the IA data as described in 6.10. A dipole vector with a specific name in the *Pdn* shall find its IA counterpart in the *Ia* section. It shall be valid string containing alphanumerical characters. If undefined, the REM parser will not read the information of the particular vector.

The *Start* and *End* attributes are used to define the start and end-coordinates of the dipole respectively. The coordinates shall be represented in the coordinate system defined in the *Coordinate_system* tag. The coordinates shall always be defined in three-dimensional space in an ordered triplet of axis written in parentheses and separated by commas without any spaces. Both these fields are mandatory. The *Vector* entity is invalid if either of them is empty / undefined. The coordinates may or may not contain local units defined along with the numerical value. When units are used, they are used as first choice.

6.9.2.3 List

The *List* attribute tells the REM parser that the ICEM-RE PDN information is defined inline and is constituted of several dipole vectors. The dipoles constituting the ICEM-RE PDN are listed one after another with the *List* entity to define the PDN information using the *Vector* keyword (see 6.9.2.2). A detailed illustration of the *List* usage in the *Pdn* tag is done in 6.9.3.2.

6.9.2.4 Data_files

The *Data_files* attribute tells the REM parser that the PDN information is available in an external data file. When used, the "Type", "Name", "Start" and "Stop" fields are specified in the external file. All header information pertaining to data description as comment lines should start with an exclamation mark ("!") as the first character of the line. A detailed description of the *Data_files* usage in the *Pdn* tag is done in 6.9.3.3.

6.9.3 PDN of a single-frequency ICEM-RE

6.9.3.1 General

This is the simplest form of PDN representation. The PDN data consisting of several dipole vectors shall be listed in the *Submodel* section using a *List* keyword. If the PDN data contains only one dipole vector, then it can be directly specified under the *Submodel* section. The different attributes of the *Submodel* section of the *Pdn* along with their usage for single-frequency ICEM-RE macro-model is shown in Table 5.

Table 5 – Valid fields of the *Submodel* keyword for single-frequency PDN

Field	Description	Usage	Rules
Frequency_value	Attribute to specify the frequency term of the PDN	Required	A valid value with or without units
Frequency_unit	Attribute to specify the units of the frequency term of the PDN	Optional	A valid unit string
Vector	Keyword for defining the coordinates of the dipole vectors	Required	Vector entities are listed one after another within a List element.
List	Section for defining the dipole vectors for one frequency	Required if not Data_files or unique dipole PDN	Several Vector entities are listed one after another
Data_files	Keyword for representing PDN parameters with an external file	Required if not List	Valid for external ASCII file with PDN data. One definition per Submodel section is valid

The compositions of all the above attributes have been described in 6.9.2. The REM parser understands that the PDN is for a single-frequency when the conditions in Table 6 are met. All other conditions are invalid.

Table 6 – Conditions for correct annotation of single-frequency PDN by the REM parser

No. of terms in Frequency section	No. of Submodel sections	Status
1	1	Valid

Table 7 lists the valid fields of a *Vector* structure for a single-frequency PDN definition and their usage in the *Submodel* section.

Table 7 – Valid fields of the *Vector* keyword for single-frequency PDN

Field	Description	Usage	Rules
Type	Type of dipole	Required	Valid string: "Electric" or "Magnetic"
Name	Name of the dipole vector	Required	Valid string. Cannot be reused within the same section
Start	Start coordinates of the vector	Required	Coordinates in triplet in cartesian, cylindrical or spherical system enclosed in parenthesis, separated by a comma: "(x,y,z)"
End	End coordinates of the vector	Required	Coordinates in triplet in cartesian, cylindrical or spherical system enclosed in parenthesis, separated by a comma: "(x,y,z)"

The details of all the above attributes have been described in 6.9.2.2.

6.9.3.2 Inline PDN data: single-frequency

Dipole vector PDN data is listed with the use of *Vector* tags within a *Submodel* section with or without a *List* tag. Each *Vector* entity shall carry a unique *Name* attribute in a given *Submodel* section.

EXAMPLE In the following example, a mono-frequency PDN at 500 MHz, using the Cartesian coordinate system, is represented using inline PDN data.

```
<RModel>
  <Header>
    ...
  </Header>
  <Frequency>
    <Unit>MHz</Unit>
    500
  </Frequency>
  <Coordinate_system>Cartesian</Coordinate_system>
  ...
  <Pdn>
    <Unit>mm</Unit>
    <Submodel Frequency_value="500MHz">
      <List>
        <Vector Type="Electric";Name="Dipole1">
          <Start>(0,0,0)</Start>
          <End>( .2, .2,0)</End>
        </Vector>
        <Vector Type="Electric";Name="Dipole2">
          <Start>(1,1,0)</Start>
          <End>(1.5,1,0)</End>
        </Vector>
        <Vector Type="Magnetic";Name="Dipole3">
          <Start>(1.25,0,0)</Start>
          <End>(2.25,0,0)</End>
        </Vector>
        ...
      </List>
    </Submodel>
  </Pdn>
</Ia>
...
</Ia>
</RModel>
```

6.9.3.3 External file PDN data: single-frequency

For directing the REM parser to use the necessary external data file in ASCII format, definition shall be made using *Data_files* keyword. A typical PDN data shall be represented as shown in Figure 9.

```
!Dipole PDN data at frequency=100MHz
!Type Name Start End
Electric dipole1 (-21.1145,1.4167,0) (-21.1145,1.4167,0)
Electric dipole2 (-21.7531,2.5217,0) (-21.7531,2.5217,0)
Magnetic dipole3 (-20.9,4.56,0) (-20.9,4.56,0)
...
```

IEC

Figure 9 – Format for defining PDN vector data in an external file

All comment lines shall start with an exclamation mark ("!").

The first column of the file shall contain data pertaining to the type of dipole: "Electric" or "Magnetic". For simplifying the parsing of data, it is allowed to use Type="0" for electric dipoles and Type="1" represents for magnetic dipoles.

The second column contains the name of the dipole as a valid string.

The third and fourth columns define the "Start" and "End" coordinates of the dipole vector. It is also possible to specify the numerical value along with units for the "Start" and "End" coordinates (each value of the triplet).

Each column of the file can be delimited by any of the following characters: space (" "), comma (","), semi-colon (";"), and tab. No other delimiters are allowed.

Similar to the example in 6.9.3, PDN information (*Vector* entities) can be listed under the *Submodel* section (see Example below).

EXAMPLE In the following example, a mono-frequency PDN at 100 MHz, using the Cartesian coordinate system, is represented using an external file carrying the PDN data.

```
<RModel>
  <Header>
    ...
  </Header>
  <Frequency>
    <Unit>MHz</Unit>
    100
  </Frequency>
  ...
  <Pdn>
    <Unit>mm</Unit>
    <Submodel Frequency_value="100" Frequency_unit="MHz">
      <Data_files>
        ICEM-RE_example_PDN100M.txt
      </Data_files>
    </Submodel>
  </Pdn>
  <Ia>
    ...
  </Ia>
</RModel>
```

Files with the extensions listed in Table 8 are allowed for defining the PDN data using external data files.

Table 8 – Valid file extensions in the *Pdn* section

File extension	Common name
dat or DAT	Data file
csv or CSV	Comma separated values
txt or TXT	Text file

6.9.4 PDN for multi-frequency ICEM-RE

6.9.4.1 General

This is the most complex form of PDN representation. The PDN data consisting of several dipole vectors for each frequency shall be listed within a *Submodel* tag. One *Submodel* section corresponds to PDN data for one particular frequency. Several *Submodel* sections are cascaded one after another to represent the multi-frequency PDN. The typical syntax with minimum model information is listed below:

```
<RModel>
  ...
  <!-- FREQUENCY DEFINITIONS-->
  <Frequency>
    <Unit>
      ...
    </Unit>
    <List>
```

```

        freq1 freq2 ...
    </List>
</Frequency>
...
<!-- MODEL PDN DATA -->
<Pdn>
    <Submodel Frequency_value="freq1">
        ...
    </Submodel>
    <Submodel Frequency_value="freq2">
        ...
    </Submodel>
    ...
</Pdn>
<!-- MODEL IA DATA -->
...
</REmodel>

```

The different attributes of the *Submodel* element along with their usage for multi-frequency PDN specification are the same as those of single-frequency PDN as shown in Table 5.

The REM parser understands that the PDN is defined for multiple frequencies when the conditions in Table 9 are met.

Table 9 – Conditions for correct annotation of multi-frequency PDN by the REM parser

No. of terms in Frequency section	No. of Submodel sections	Status
>1 (=X)	>1 (=X)	Valid

For all other cases, REM parser will understand that there are data discrepancies and thus annotate the first *Submodel* section containing the frequency that matches with the first frequency term in the Frequency section.

The valid fields of a *Vector* structure for a multi-frequency PDN definition and their usage in the *Submodel* section are the same as those for single-frequency PDN as discussed in Table 7.

6.9.4.2 Inline PDN data: multi-frequency

As mentioned previously, PDN at multiple frequencies are specified within several *Submodel* sections one after another within the *Pdn* tag. Each *Submodel* entity is defined for a particular frequency, whose value is also defined in the *Frequency* section.

EXAMPLE In the following example, a multi-frequency PDN for 100 MHz and 200 MHz is defined using two *Submodel* sections and data is defined inline.

```

<REmodel>
  <Header>
    ...
  </Header>
  <Frequency>
    <Unit>MHz</Unit>
    <List>
      100 200
    </List>
  </Frequency>
  ...
<Pdn>
  <Unit>mm</Unit>
  <Submodel Frequency_value="100" Frequency_unit="MHz">

```

```

        <List>
            <Vector Type="Electric";Name="Dipole1">
<Start>(0,0,0)</Start>
<End>(0.2,0.2,0)</End>
            </Vector>
            <Vector Type="Electric";Name="Dipole2">
                <Start>(1,1,0)</Start>
                <End>(1.5,1,0)</End>
            </Vector>
            <Vector Type="Magnetic";Name="Dipole3">
                <Start>(1.25,0,0)</Start>
                <End>(2.25,0,0)</End>
            </Vector>
            ...
        </List>
    </Submodel>
    <Submodel Frequency_value="200" Frequency_unit="MHz">
        <List>
            <Vector Type="Magnetic";Name="Dipole1">
<Start>(0,0,0)</Start>
<End>(1,1,0)</End>
            </Vector>
            <Vector Type="Electric";Name="Dipole2">
<Start>(2,2,0)</Start>
<End>(3,2,0)</End>
            </Vector>
            <Vector Type="Magnetic";Name="Dipole3">
<Start>(1.25,0,0)</Start>
<End>(2.25,0,0)</End>
            </Vector>
            ...
        </List>
    </Submodel>
    ...
</Pdn>
<Ia>
    ...
</Ia>
</REmodel>

```

6.9.4.3 External PDN data: multi-frequency

The syntax for representing multi-frequency PDN with an external file carrying the data is very similar to single-frequency PDN seen in 6.9.3.3, except that data for each frequency shall be defined in separate files. The file format and data representation are the same as shown in Figure 9. The file data is defined within the *Data_files* tag under the *Submodel* section.

EXAMPLE In the following example, a multi-frequency PDN for 100 MHz and 200 MHz is defined using two *Submodel* sections and data is defined using separate data files.

```

<REmodel>
    <Header>
        ...
    </Header>
    <Frequency>
        <Unit>MHz</Unit>
        <List>
            100 200
        </List>
    </Frequency>
    ...
<Pdn>
    <Unit>mm</Unit>
    <Submodel Frequency_value="100" Frequency_unit="MHz">
        <Data_files>
            ICEM-RE_example_PDN100M.txt
        </Data_files>
    </Submodel>
    <Submodel Frequency_value="200" Frequency_unit="MHz">

```

```

        <Data_files>
            ICEM-RE_example_PDN200M.txt
        </Data_files>
    </Submodel>
    ...
    </Pdn>
    <Ia>
    ...
    </Ia>
</REmodel>

```

6.10 IA

6.10.1 General

The *Ia* section of the ICEM-RE macro-model contains the IA data that describes the model. Similar to the PDN definition seen in 6.9.1, in order to maintain a harmonious representation for both mono and multi-frequency IA information, the data is defined within the *Submodel* keyword in the *Ia* section as:

```

<Ia>
    <Submodel>
    IA data
    </Submodel>
</Ia>

```

The unit of the IA data can be specified within the *Unit* tag directly under the *Ia* element. The accepted base unit for the IA data is Amperes ("A") with all the valid scaling factors described in A.2.5.3.

Every PDN data will have its associated IA data. Similar to the PDN definition, IA data pertaining for a given frequency is specified within a *Submodel* section. The frequency of each *Submodel* is also defined within. On one hand, mono-frequency ICEM-RE contains an unique *Submodel* entity with the *Ia* tag. On the other hand, a multi-frequency ICEM-RE contains multiple *Submodel* elements. See Figure 8 for the structural hierarchy.

The frequency range of the IA (which is the same as that of the PDN) shall be specified in the *Validity* section with the *Frequency_range* tag (see 6.8 for more information).

NOTE The frequency range of validity of the IA is the same as that of the PDN.

Table 10 lists the various recognized fields of the *Submodel* keyword in the IA section:

Table 10 – Definition of the *Submodel* section of the *Ia* element

<i>Submodel</i>
Frequency_value: Frequency at which the model parameters are defined (required for multi-frequency IA, else optional)
Frequency_unit: Defines the unit of the frequency term (optional)
Vector: Keyword for defining a single dipole vector (required)
List: IA source parameter defined inline (required if not <i>Data_files</i>)
Data_files: IA source parameter defined in an external file (required if not <i>List</i>)

Any other relevant information required for correct understanding (and usage) of the IA shall be optionally defined within the *Notes* and *Documentation* tags. Details such as IC's operating mode, activated functions, grounding details, decoupling capacitors, datasheets and test-reports can be defined.

6.10.2 Attribute definitions

6.10.2.1 Frequency_value and Frequency_unit

The *Frequency_value* attribute so as to define the specificity and validity of the *Submodel*. The listed IA vectors within this section are defined for that frequency. It is possible to use both numerical value and units together as described in A.2.5.3.

The *Frequency_unit* is an optional attribute to define the units of the frequency term defined in the *Frequency_value* attribute. If this field is absent, default SI unit ("Hz") is used.

For each *Submodel* element within the *Ia* section, the REM parser will link a data structure by attaching the value defined *Frequency_value* field of the *Submodel* element with one of the values defined in the *Frequency* element. If a match is not found, then the particular *Submodel* is not annotated by the REM parser.

6.10.2.2 Vector

The IA information of each dipole of the ICEM-RE is defined within a *Vector* tag in the specified coordinate system (see 6.6) with respect to the reference point specified in the *Reference* section (see 6.7).

If the ICEM-RE IA contains only one *Vector* element, then the corresponding *Vector* is directly defined under the *Submodel* section defined at a particular frequency (without *List* tag). If the IA at a particular frequency is defined with multiple dipole vectors, then the different *Vector* elements are listed under a *Submodel* section using a *List* keyword.

Table 11 lists the various recognized fields of the *Vector* keyword in the *Ia* section:

Table 11 – Definition of the *Vector* keyword in the *Ia* section

Vector
Type: Type of the dipole source: "Electric", "Magnetic" (required)
Name: Name of the dipole describing the IA – Any valid string. Shares the same namespace with the PDN vector element (required)
Amplitude: Amplitude of the current flowing through the dipole vector (required)
Phase: Phase of the current flowing through the dipole (optional)

The *Type* attribute tells the REM parser on what kind of dipole is used. The dipole type can be either "Electric" or "Magnetic" signifying electric or magnetic dipoles respectively. This is a mandatory field. If undefined, the REM parser will not decipher the information of the particular vector.

The *Name* field specifies a valid name of the dipole. This is a mandatory field and shares the same namespace with the PDN data as described in 6.9. A dipole vector with a specific name in the *Ia* shall find its PDN counterpart in the *Pdn* section. It shall be valid string containing alphanumerical characters. If undefined, the REM parser will not read the information of the particular vector.

The *Amplitude* field denotes the magnitude of the current flowing through the dipole vector. This is a mandatory field. A unique valid numerical value with or without units can be represented in this field. If absent, the REM parser will not read the information of the particular vector.

The *Phase* field denotes the phase of the current flowing through the dipole vector. This is an optional field. The phase value is referenced with respect to the phase of the EM field at the

reference point defined in the Reference section (see 6.7). A unique valid numerical value with or without units can be represented in this field. If undefined, the value defaults to "0".

6.10.2.3 List

The *List* attribute tells the REM parser that the ICEM-RE IA information is defined inline and is constituted of several dipole vectors. The IA information pertaining to the dipoles constituting the ICEM-RE are listed one after another within the *List* entity using the *Vector* keyword (see 6.10.2.2). A detailed illustration of the *List* usage in the *Ia* tag is done in 6.10.3.2.

6.10.2.4 Data_files

The *Data_files* attribute tells the REM parser that the IA information is available in an external data file. When used, the "Type", "Name", "Amplitude" and "Phase" fields are specified in the external file. All header information pertaining to data description as comment lines should start with an exclamation mark ("!") as the first character of the line. A detailed description of the *Data_files* usage in the *Ia* tag is done in 6.10.3.3.

6.10.3 IA of a single-frequency ICEM-RE

6.10.3.1 General

This is the simplest form of IA representation. The IA data consisting of the current values of several dipole vectors shall be directly listed in the *Submodel* tag in the *Ia* section. The different attributes of the *Submodel* section of the *Ia* along with their usage for single-frequency ICEM-RE macro-model is shown in Table 12.

Table 12 – Valid fields of the *Submodel* keyword for single-frequency IA

Field	Description	Usage	Rules
Frequency_value	Attribute to specify the frequency term of the IA	Required	A valid value with or without units
Frequency_unit	Attribute to specify the units of the frequency term of the IA	Optional	A valid unit string
Vector	Keyword for defining the coordinates of the dipole vectors	Required	Vector entities are listed one after another within a List element.
List	Section for defining the dipole vectors for one frequency	Required if not <i>Data_files</i> or unique dipole ICEM-RE	Several Vector entities are listed one after another
<i>Data_files</i>	Keyword for representing IA parameters with an external file	Required if not List	Valid for external ASCII file with IA data. One definition per Submodel section is valid

The compositions of all the above attributes have been described in 6.10.2. The REM parser understands that the IA is for a single-frequency when the conditions in Table 13 are met. The conditions are the same as seen with the PDN.

Table 13 – Conditions for correct annotation of single-frequency IA by the REM parser

No. of terms in Frequency section	No. of Submodel sections	Status
1	1	Valid

Table 14 lists the valid fields of a *Vector* structure for a single-frequency IA definition and their usage in the *Submodel* section.

Table 14 – Valid fields of the *Vector* keyword for single-frequency IA

Field	Description	Usage	Rules
Type	Type of dipole	Required	Valid string: "Electric" or "Magnetic"
Name	Name of the dipole vector	Required	Valid string. Cannot be reused within the same section
Amplitude	Amplitude of the current flowing in the dipole	Required	Valid numerical value with or without unit
Phase	Phase of the current flowing in the dipole	Optional	Valid numerical value, unit is "degree".

The details of all the above attributes have been described in 6.10.2.2.

6.10.3.2 Inline IA data: single-frequency

Dipole vector IA data is listed with the use of *Vector* tags within a *Submodel* section. Each *Vector* entity shall carry a unique *Name* attribute in a given *Submodel* section.

EXAMPLE In the following example, IA data at 100 MHz is represented using inline data within *Submodel* tag. The unit of the IA data (current amplitude) is set to micro-amperes ("uA").

```

<REmodel>
  <Header>
    ...
  </Header>
  <Frequency>
    <Unit>MHz</Unit>
    100
  </Frequency>
  ...
  <Ia>
    <Unit>uA</Unit>
    <Submodel Frequency_value="100" Frequency_unit="MHz">
      <List>
        <Vector Type="Electric";Name="Dipole1">
          <Amplitude>230</Amplitude>
          <Phase>32</Phase>
        </Vector>
        <Vector Type="Electric";Name="Dipole2">
          <Amplitude>450</Amplitude>
          <Phase>25</Phase>
        </Vector>
        <Vector Type="Magnetic";Name="Dipole3">
          <Amplitude>98</Amplitude>
          <Phase>99</Phase>
        </Vector>
        ...
      </List>
    </Submodel>
  </Ia>
</REmodel>

```

6.10.3.3 External file IA data: single-frequency

For directing the REM parser to use the necessary external data file in ASCII format, definition shall be made using *Data_files* keyword. A typical IA data shall be represented as shown in Figure 10.

```
!Dipole IA data at frequency=100MHz
!Type Name Amplitude Phase
Electric dipole1 1.6768 -57.1619
Electric dipole2 1.7317 85.5752
Magnetic dipole3 1.64 2.332
...
```

IEC

Figure 10 – Format for defining IA vector data in an external file

All comment lines shall start with an exclamation mark ("!").

The first column of the file shall contain data pertaining to the type of dipole: "Electric" or "Magnetic". For simplifying the parsing of data, it is allowed to use Type="0" for electric dipoles and Type="1" for magnetic dipoles.

The second column contains the name of the dipole as a valid string.

The third and fourth columns define the "Amplitude" and "Phase" of the current flowing through the dipole vector. It is also possible to specify the numerical value along with units for the "Amplitude" column.

Each column of the file can be delimited by any of the following characters: space (" "), comma (","), semi-colon (";"), and tab. No other delimiters are allowed.

Similar to the example in 6.10.3, IA information (*Vector* entities) can be listed under the *Submodel* section.

EXAMPLE In the following example, IA data at 100 MHz is represented using an external data file within a *Submodel* tag.

```
<REmodel>
  <Header>
    ...
  </Header>
  <Frequency>
    <Unit>MHz</Unit>
    100
  </Frequency>
  ...
  <Ia>
    <Submodel Frequency_value="100MHz">
      <Data_files>
        ICEM-RE_example_IA100M.txt
      </Data_files>
    </Submodel>
  </Ia>
</REmodel>
```

Files with the extensions listed in Table 15 are allowed for defining the IA data using external data files.

Table 15 – Accepted file extensions in the *Ia* section

File extension	Common name
dat or DAT	Data file
csv or CSV	Comma separated values
txt or TXT	Text file

6.10.4 IA for multi-frequency ICEM-RE

6.10.4.1 General

This is the most complex form of ICEM-RE representation. The IA data of several dipole vectors for each frequency shall be listed within a *Submodel* tag in the *Ia* section. One *Submodel* section corresponds to IA data for one particular frequency. Several *Submodel* sections are cascaded one after another to represent the multi-frequency IA. The typical syntax with minimum model information is listed below:

```
<REmodel>
...
<!-- MODEL IA DATA -->
<Ia>
  <Submodel Frequency_value="freq1">
    ...
  </Submodel>
  <Submodel Frequency_value="freq2">
    ...
  </Submodel>
  ...
</Ia>
</REmodel>
```

The different attributes of the *Submodel* element along with their usage for multi-frequency IA specification are the same as those of single-frequency IA as shown in Table 12.

The REM parser understands that the IA is for a multiple frequencies when the conditions in Table 16 are met.

Table 16 – Conditions for correct annotation of multi-frequency IA by the REM parser

No. of terms in Frequency section	No. of Submodel sections	Status
>1 (=X)	>1 (=X)	Valid

NOTE For all other cases, REM parser will understand that there are data discrepancies and thus annotate the first *Submodel* section containing the frequency that matches with the first frequency term in the Frequency section.

The valid fields of a *Vector* structure for a multi-frequency IA definition and their usage in the *Submodel* section are the same as those for single-frequency IA as discussed in Table 14.

6.10.4.2 Inline IA data: multi-frequency

As mentioned previously, IA data at multiple frequencies are specified within several *Submodel* sections one after another within an *Ia* section. Each *Submodel* entity is defined for a particular frequency, whose value is also defined in the *Frequency* section.

EXAMPLE An example of multi-frequency IA (taking the example seen in 6.9.4.3) for 100 MHz and 200 MHz is shown.

```

<RModel>
  <Header>
    ...
  </Header>
  <Frequency>
    <Unit>MHz</Unit>
    <List>
      100 200
    </List>
  </Frequency>
  ...
  <Ia>
    <Submodel Frequency_value="100" Frequency_unit="MHz">
      <List>
        <Vector Type="Electric";Name="Dipole1">
          <Amplitude>230</Amplitude>
          <Phase>32</Phase>
        </Vector>
        <Vector Type="Electric";Name="Dipole2">
          <Amplitude>450</Amplitude>
          <Phase>25</Phase>
        </Vector>
        <Vector Type="Magnetic";Name="Dipole3">
          <Amplitude>98</Amplitude>
          <Phase>99</Phase>
        </Vector>
        ...
      </List>
    </Submodel>
    <Submodel Frequency_value="200" Frequency_unit="MHz">
      <List>
        <Vector Type="Electric";Name="Dipole1">
          <Amplitude>120</Amplitude>
          <Phase>76</Phase>
        </Vector>
        <Vector Type="Electric";Name="Dipole2">
          <Amplitude>230</Amplitude>
          <Phase>52</Phase>
        </Vector>
        <Vector Type="Magnetic";Name="Dipole3">
          <Amplitude>145</Amplitude>
          <Phase>5</Phase>
        </Vector>
        ...
      </List>
    </Submodel>
    ...
  </Ia>
</RModel>

```

6.10.4.3 External IA data: multi-frequency

The syntax for representing multi-frequency IA with an external file carrying the data is very similar to single-frequency IA seen in 6.10.3.3, except that data for each frequency shall be defined in separate files. The file format and data representation is the same as shown in Figure 10. The file information (filename) is defined within the *Data_files* tag under the *Submodel* section.

7 Extraction

7.1 General

The simplest practice to obtain the ICEM-RE PDN and IA sub-models is to use near-field data obtained from measurements or electromagnetic field simulations. Alternatively, it is also

possible to obtain ICEM-RE from ICEM-CE macro-model information. The extraction procedures for both these methodologies are explained.

7.2 Environmental extraction constraints

The ICEM-RE macro-model parameter extractions have to be performed under normal room temperature conditions: $23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. There are no additional requirements on air pressure and humidity.

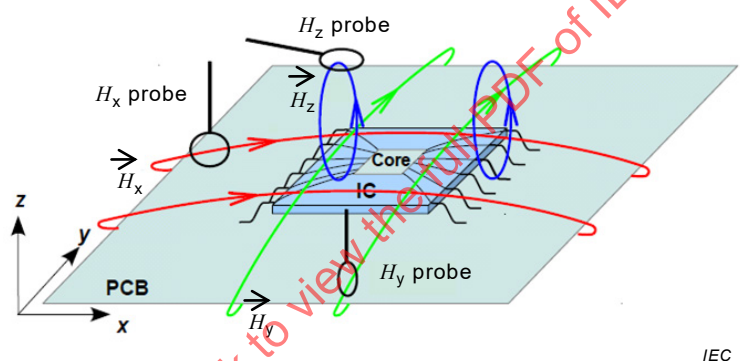
When open silicon is used, the lights shall be dimmed or switched off in order not to generate photonic effects.

NOTE Some substrate materials are hydroscopic which might affect the permittivity of the material and its loss tangent.

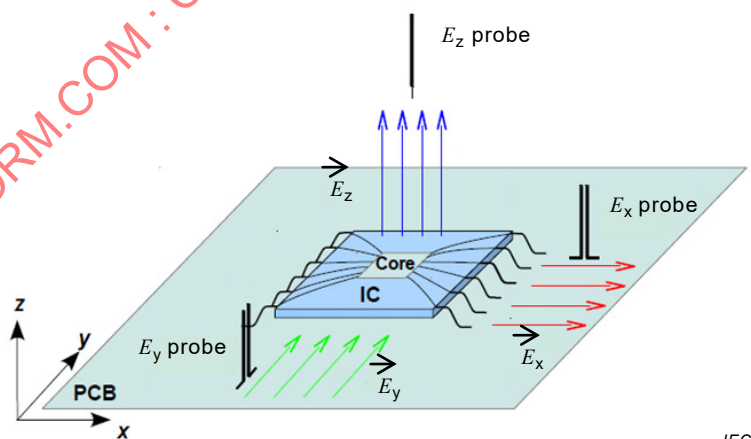
7.3 Obtaining model parameters from near-field data

7.3.1 General

Near-field data for model extraction can be obtained using the near-field surface scan method. As specified in IEC TS 61967-3, the basis of the approach is represented in Figure 11.



a) Measurement using magnetic field probes



b) Measurement using electric field probes

Figure 11 – Electromagnetic field measurement

As previously stated, ICEM-RE macro-model is specific to an IC. When building the model from near-field data, it is important to measure the near-radiated field emanating from the IC under test without the influence of surrounding components (neighbouring ICs, traces, etc.). The PCB containing the IC that is used for near-field scan should be the same as that specified in IEC 61967-1.

An example of measurement on a 16-bit microcontroller, mounted in IEC 61967-1 standard PCB, at 80 MHz is given in Figure 12 [2].

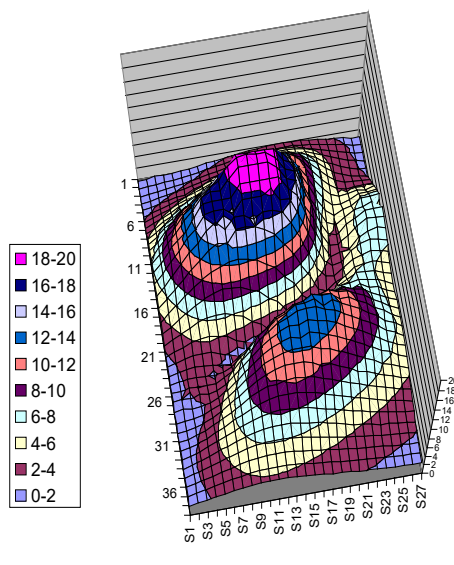


Figure 12 – B_z field in nT measured at 3 mm above the microprocessor at 80 MHz

Alternatively, if all physical and electrical data of the DUT are known before hand, electromagnetic field simulation tools are capable of simulating the radiated fields around the IC under test. Care shall be taken so as to avoid the influence of surrounding components on the fields radiated by the IC. From these simulations it is possible to extract the radiated EM fields at a certain height above the IC.

The simulated or measured vector near-field data can be used to extract the PDN and IA information of the ICEM-RE macro-model. If measurement information is used for model extraction, the vector near-field information shall be obtained using a vector network analyzer as specified in IEC 61967-3.

7.3.2 PDN

7.3.2.1 General

As discussed previously, the PDN information can be extracted from the field pattern obtained from near-field measurement or electromagnetic field simulation data. Considering that the IC package with its pins and bondings radiate significantly, it is possible to represent the field maxima with an elementary current line whose length and intensity can be determined with an iterative process. Depending on the field component, one maximum or two maxima could represent a current element as shown in Figure 13.

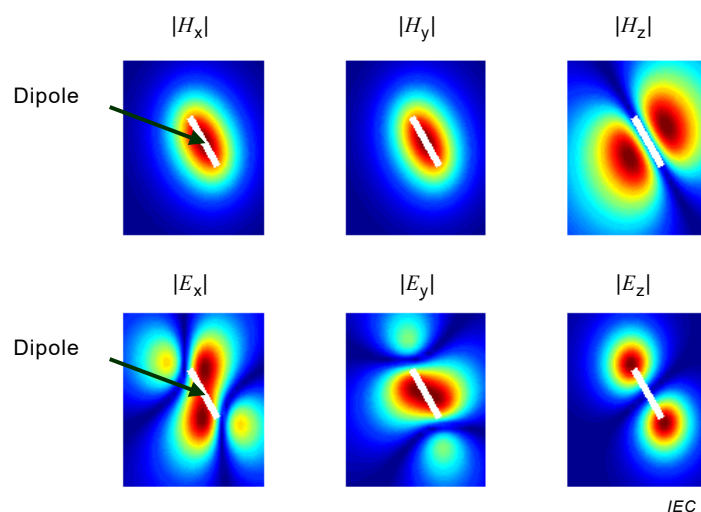


Figure 13 – Example of electromagnetic field emitted by an elementary current line

The number of these sources can be identified either manually or automatically as detailed in 7.3.2.2 and 7.3.2.3 respectively. In both the cases, the number of these current sources is optimized in order to fit the measurement results. The precision of the model is a function of the chosen method. Table E.1 provides the model selection guidelines for choosing between the different modelling methods..

7.3.2.2 Manual source detection

The manual sources representing the radiated fields are determined in an iterative manner in order to correlate with the measurements or simulations [2], [3]. This model is henceforth called "Model_{Hman}" in this document. For example, in the case of the microcontroller at 80 MHz, three dipole sources represent the radiated magnetic fields as shown in Figure 14.

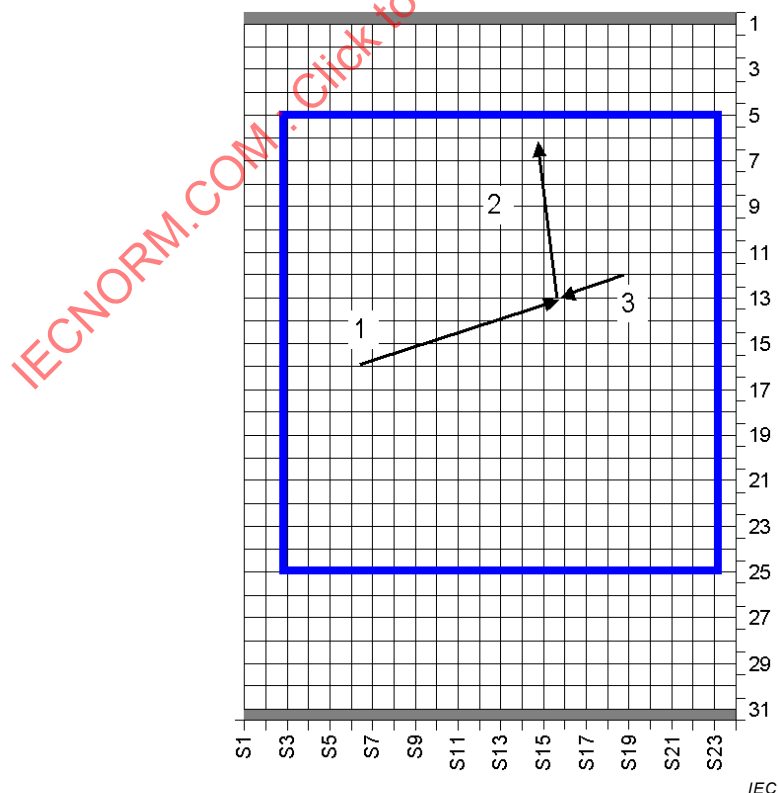


Figure 14 – Manual current mapping

The optimization of the PDN structure (number of dipoles) is directly linked to the IA's amplitude (dipole current magnitude), and the fitting is realized iteratively with a simultaneous analysis of these both sub-models. It is to be noted that it may not always be possible to optimize the radiated electromagnetic fields with a few manual sources. Under such conditions, the automatic source detection technique can be used.

7.3.2.3 Automatic source detection

This technique is more generic and can be applied to any measurement or simulation data. From the tangential components near-magnetic or electric field, a set of electric and/or magnetic dipoles are extracted and their parameters are optimized. Several methods have been developed for automatic source detection [4]-[7]. In all these methods, set of N dipoles (say P electric dipoles and Q magnetic dipoles such that $P + Q = N$) represent the device under test as shown in Figure 15.

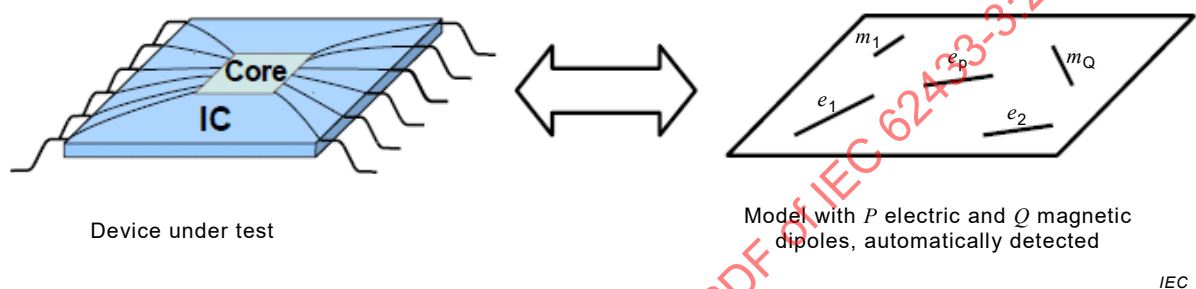


Figure 15 – Model representation with N automatically detected dipoles

Several methods exist in order to automatically detect the dipole sources from the near-field data. As per the chosen method, the placement and the number of these dipoles are detected from the measured or simulated near-magnetic and/or near-electric field data. These dipoles can either be of fixed or varied lengths. Depending on the complexity of the radiation profile of the DUT and the type of field to be modelled (electric and/or magnetic fields), the methodology could get very complex.

The simplest modelling methodology is the magnetic field modelling in the frequency domain with a pre-fixed number of electric dipole or magnetic dipole vectors [4], [5]. This method is termed as "Model_H" hereinafter.

A more complex methodology is to model the EM field in the frequency domain with iteratively optimising the number of electric dipole vectors [6]-[7]. This method is named as "Model_{EM Iter}" from this point forward. The same method is also extended in the time-domain using time-harmonic analysis and this model is called "Model_{EMTD}" henceforth [8].

Alternatively, the electromagnetic fields can also be modelled in the frequency domain with a pre-fixed number of both electric and magnetic dipoles [9]. This method is called as "Model_{EM Inv}" henceforth.

These algorithms are presented in Annex E. Example tools for extracting the ICEM-RE macro-model based on the above discussed methods have also been briefly presented.

7.3.3 IA

7.3.3.1 General

This sub-model can also be extracted from near-field data by using the PDN sub-model previously determined. The IA amplitude is estimated by an iterative method and is linked to the PDN structure. Therefore, the IA extraction is also manual or automatic based on the

chosen modelling method. Table E.1 provides the model selection guidelines for choosing between the different modelling methods.

7.3.3.2 Manual iteration

If the PDN is obtained by manually determined sources, then the IA is also manually iterated. As previously stated, the optimization of the manually mapped sources (PDN and IA structure) is directly linked to the IA's amplitude and the number of dipoles. The fitting is realized iteratively with a simultaneous analysis of both these elements.

7.3.3.3 Automatic iteration

Depending on the type of the model, the IA sub-model is optimized using the previously deduced PDN until the measurement and the model simulation correlate. If "Model_{EM_Iter}" is chosen, based on the deviation between the simulations and measurements (during each iteration), the PDN could be subjected to change and thus IA changes accordingly. For all other modelling methods, the PDN is fixed and based on the deviation between measurement and the model simulation data, the IA is extracted.

Figure 16 shows the example of ICEM-RE macro-model results obtained using "Model_{EM_Inv}", built with 961 electric and 961 magnetic dipoles, of length 1 mm.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62433-3:2017

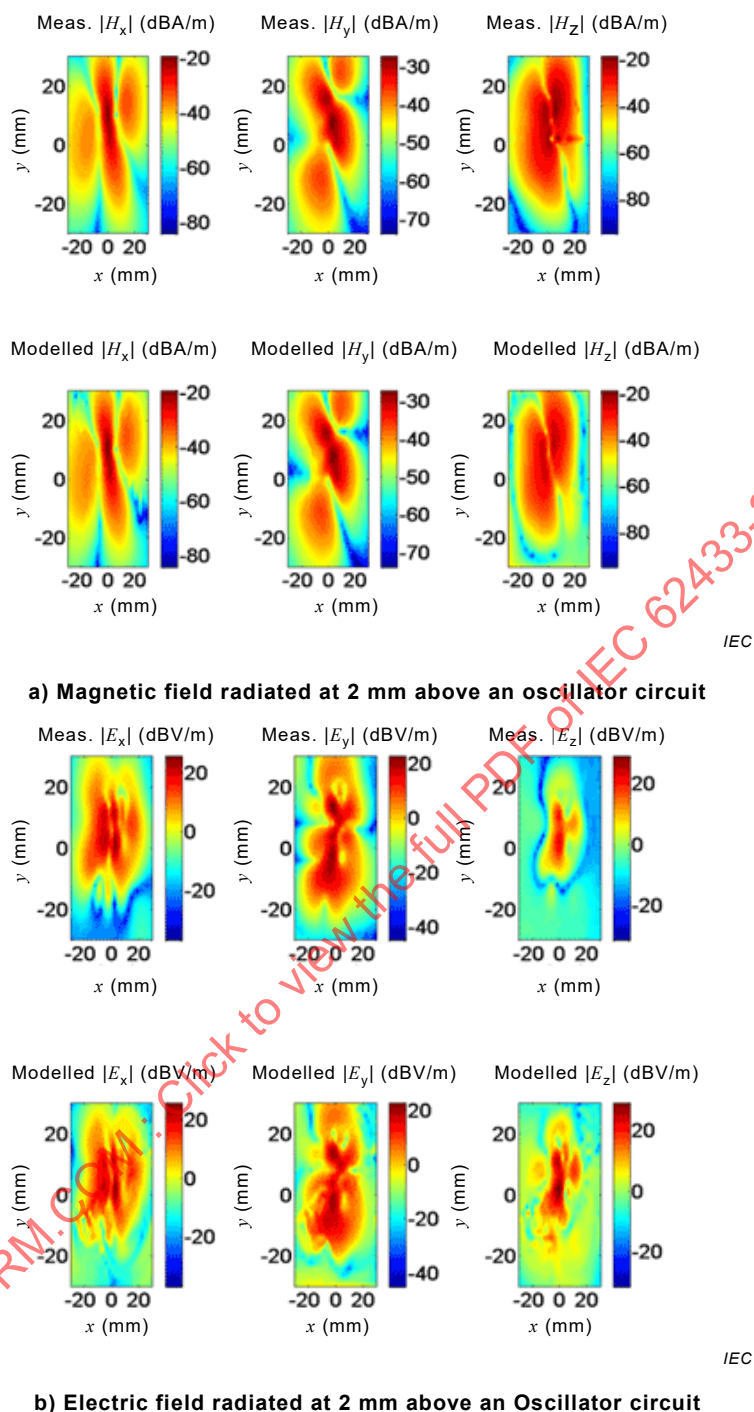


Figure 16 – Comparison between the modelled and measured EM fields at 2 mm above an oscillator

The model has been constructed from near-electric and magnetic field measurements at 2 mm above an oscillator, functioning at 40 MHz.

The IA extraction procedure for the manual and automatic modelling methods is presented in Annex E.

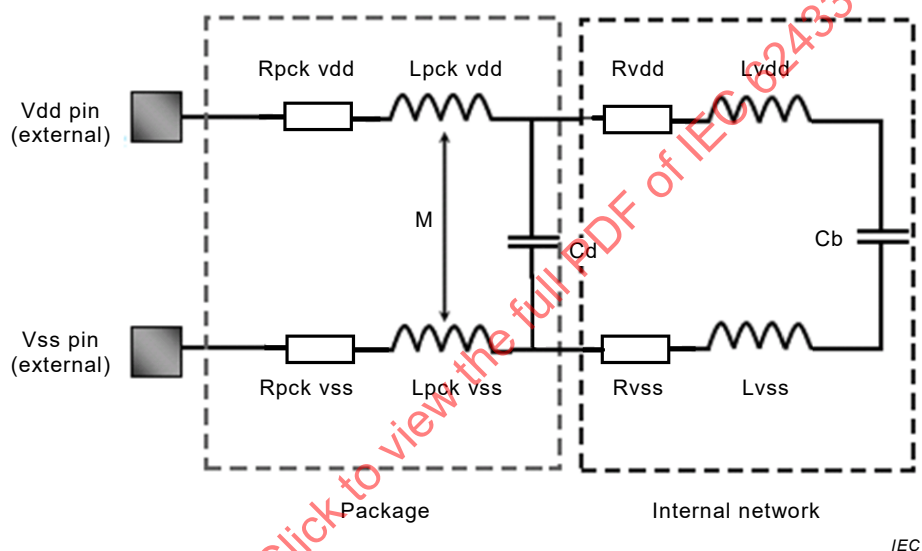
7.4 Extraction based on ICEM-CE simulation

7.4.1 General

ICEM-RE PDN and IA sub-models can be extracted using the ICEM-CE PDN and IA sub-models that are obtained using IEC 62433-2 [10], [11]. The ICEM-RE extraction methodology is explained below.

7.4.2 PDN

The radiating part of an IC is considered to be only the package that can be directly considered as being a part of the PDN structure, and implemented in an electromagnetic tool. This geometry shall be completed by the device impedance, which can be obtained from the conducted ICEM-CE model as per IEC TS 62433-2. A simple ICEM-CE PDN is shown in Figure 17. For more complex packages, additional passive components may be necessary to take into account possible cavity resonances and other coupling effects.



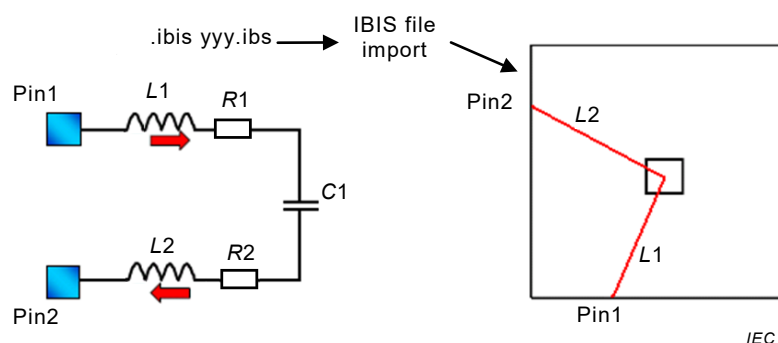
Key

Vdd pin, Vss pin	External pin interface of the IC power rail
Rpck vdd, Rpck vss	Series resistances of the package
Lpck vdd, Lpck vss	Series inductances of the package
Cd	On-chip power-rail decoupling capacitor
Cb	On-chip decoupling capacitor of the internal power rail block
Rvdd, Rvss	Series resistances of the IC internal power rail
Lvdd, Lvss	Series inductances of the IC internal power rail
M	Inter pin mutual coupling in the package

Figure 17 – A simple ICEM-CE PDN representing the package and the internal network impedance between the power rails

Since this method is based on IC's physical representation, it is possible to build different PDN structures for different functional configurations of an IC that are easier to implement in a numerical tool.

The inductances in the model are radiating inductances since they appear in the electrical PDN model and the geometric model of the package (for example obtained from the IC's IBIS file) as well. Thus it is possible to translate the model's inductances into radiating elements which constitute the ICEM-RE PDN as shown in Figure 18.



Key

Pin1, Pin2	External pin interface of the IC pins
L1, L2	Series inductances of the package
R1, R2	Series resistances of the package
C1	Total chip capacitance

Figure 18 – Reconstructing the geometry of the package model (ICEM-RE PDN) from IBIS and its link with the electrical model (ICEM-CE PDN)

Knowing this structure it is possible to simulate the near-field diagram using the IA sub-model described in 7.4.3.

7.4.3 IA

The ICEM-RE IA is directly obtained by super-imposing the ICEM-RE PDN presented in 7.4.2 and the near-field data from measurements or simulations (at a particular frequency and height). This is needed to determine the radiating zones and to optimise the currents flowing through the radiating elements (pins and bondings). The following parameters are used from the near-field scan data for this purpose:

- Operating frequency which determines the current flow in the pins
- The measurement height with respect to the pins
- The presence/absence of a ground plane
- The distance between the pins and the ground plane (if present)
- The spatial resolution of the measurements

Another way to obtain ICEM-RE IA is to use the ICEM-CE model to derive current flowing through the radiating inductances of the ICEM-RE PDN.

8 Validation

This part presents the validation of the modelling techniques, their domain of validity, the conditions for choosing the methods, and their precision. Many quantitative means exist for validating the models. The used validation procedure shall be included in the documentation part of the model.

An example of the validating procedure is shown in Annex F. The information provided should include, but not limited to the following steps:

- Perform near-field scan at $z = d$ or use simulated near-field at $z = d$. It is assumed that the IC under test is placed on the XY plane and d is the distance above the surface of IC under test as shown in Figure 19
- Extract ICEM-RE data from near-fields at $z = d$
- Validate the model at $z = d$ with measured or simulated fields

- d) Simulate near-radiated fields at $z = h$ ($h > d$) using the ICEM-RE
- e) Validate with near- measured or simulated fields at $z = h$

NOTE The accuracy of the model is highly dependent on the data used to build the model and the data used for model validation.

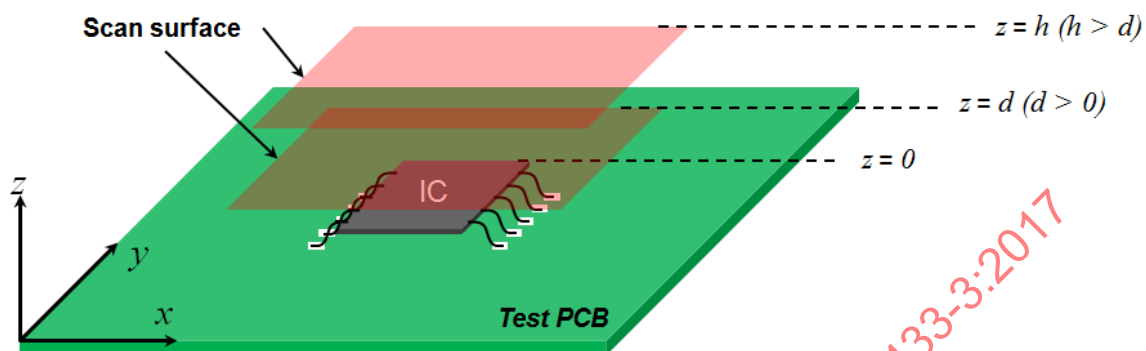


Figure 19 – Graphical representation of the example validation procedure

IEC

Annex A (normative)

Preliminary definitions for XML representation

A.1 XML basics

A.1.1 XML declaration

Although the XML declaration is optional in an XML file, the ICEM-RE model file should include an XML declaration, dedicated to basic XML parsers.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
```

The XML declaration shall be the first line of the file.

A.1.2 Basic elements

All information is saved in the form of XML elements. Each element starts with a start-tag and ends with an end-tag. The start-tag consists of a keyword enclosed in triangular brackets, <Keyword>. The end-tag consists of the same keyword prefixed by the character "/" and enclosed in brackets, </Keyword>. Content in the form of text is enclosed by a start-tag and an end-tag.

An example of an element is given below:

```
<Keyword>          <!-- start-tag -->
    text           <!-- content -->
</Keyword>         <!-- end-tag -->
```

It is also allowed to write an element on the same line, for example, to include short content:

```
<Keyword>text</Keyword>
```

The contents of an element may consist of one or more other elements or a value (numerical, or alphanumerical). For clarity, tab characters may be used for indenting. Except when used for surrounding keywords, triangular brackets "<" and ">" shall not be part of content.

The text shall use characters from the UTF-8 set (space, " ", "<", ">", "&" are not included).

An empty element may be included to indicate that a particular keyword exists, but has no content:

```
<empty_element/>
```

A.1.3 Root element

The XML file shall contain one, and only one, root element. It encloses all the other elements and is therefore the sole parent element to all the other elements. The start-tag of the root element is placed at the beginning of the file or after the XML declaration when present. The end-tag of the root element is at the last entry of the file.

The root element keyword shall not be used for any other purposes in the XML file.

A.1.4 Comments

Comments may be inserted into the file between "<!--" and "-->". An example is given below:

```
<!-- this line is a comment -->
```

Comments can be inserted anywhere in the file, except inside start- and end-tags, and written on a single line or on several lines. All text enclosed by comment brackets is considered as a comment and may be ignored.

A.1.5 Line terminations

In order to facilitate readability, it is usual to organise the file into lines. The line termination sequence shall be either a linefeed character or a carriage return character followed by a linefeed character.

A.1.6 Element hierarchy

The order of the elements is not important, but their hierarchy shall be respected. A layout example is shown below:

```
<Keyword1> ... </Keyword1>
<Keyword2>
  <Keyword21> ... </Keyword21>
  <Keyword22> ... </Keyword22>
</Keyword2>
<Keyword3> ... </Keyword3>
```

A.1.7 Element attributes

XML keyword elements can have attributes. Attributes provide additional information about elements that are not a part of the data. Attribute values shall always be quoted. Either single or double quotes can be used. Multiple attributes are either separated by a space or by a semi-colon (";") character. In contrast to elements, attributes usually cannot contain multiple values and tree structures, except for certain exceptions in the XML. An example of attribute definition is shown below:

```
<Parent Type="example"; Format="string"/>
```

In the above syntax *Type* and *Format* are attributes to the keyword *Parent*. The same terms can be defined as elements as shown below:

```
<Parent>
  <Type>example</Type>
  <Format>string</Format>
</Parent>
```

A.2 Keyword requirements

A.2.1 General

Keywords, placed in start- and end-tags, are used to introduce descriptions, values and sections that are specific to the file. Some keywords, such as Unit, List, etc., may be present in several sections. A parent keyword is required whenever a child keyword is present. The rules below ensure that the file can be correctly parsed by a specific XML parser.

A.2.2 Keyword characters

Only ASCII characters, as defined in ANSI Standard X3.4-1986, may be used in the files. The use of characters with codes greater than hexadecimal 07E is not allowed. Also, ASCII control characters (those numerically less than hexadecimal 20) are not allowed, except for tabs or in a line termination sequence.

Only alphabetical or numerical characters can be used to write keywords. Spaces are not permitted. If needed, the underscore “_” character can separate the parts of a multi-word keyword.

A.2.3 Keyword syntax

The content of the files is case sensitive. All keywords shall be written in lower case starting with an upper case letter.

A.2.4 File structure

A.2.4.1 General

The information to be exchanged may be stored in a single XML file or in several XML and data files. The following rules and guidelines ensure that the files can be correctly located by a XML parser.

A.2.4.2 File names

To facilitate portability between operating systems, file names should have a base name of no more than forty characters followed by a period “.”, followed by a filename extension of no more than four characters. The file name and extension shall use characters from the set (space, “ ”, 0x20 is not included) seen previously in A.1.2. File name shall be defined within the “Filename” keyword as shown below:

```
<Filename>ExampleXML_file.xml</Filename>
```

A.2.4.3 File paths

In order to ensure portability and compressibility, only relative paths can be used to define a path name. An absolute path is not exportable and is not permitted. The relative path shall start with “./” to indicate that the path name of the picture file will be appended to the path of the current XML file. It is not permitted to browse to a higher level from the current XML path (e.g. by using “../”). A file name without “./” is assumed to be located in the same directory as the current XML file.

A.2.4.4 Single XML file

When the information is contained in a single XML file, it shall conform to the rules and guidelines applicable to XML files as described previously.

Data is included in the PDN or IA section of the file within the XML element using the keyword “List” whenever required.

A.2.4.5 Multiple XML files

The XML document is divided into several sections having the root element as parent. The model's information is then defined under the root section using keywords such as *Pdn*, *la* etc. Each XML file may contain one or more sections and shall conform to the rules and guidelines applicable to XML files as described previously. A section shall be present in only one of the XML files.

In order to ensure portability and compressibility, all the XML files shall be placed in the same directory, as shown in Figure A.1. The XML parser shall parse all the files that are in the main directory.

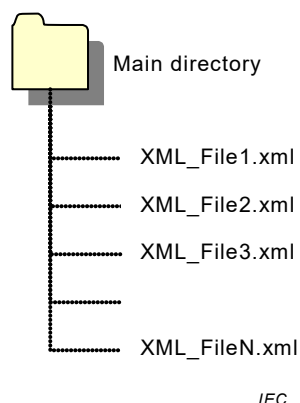


Figure A.1 – Multiple XML files

A.2.4.6 Separate data files

The information may be contained a single or multiple XML files and the data contained in one or more additional data files. The XML files shall conform to the rules and guidelines applicable to XML files as described above. The data files can contain lines of data and header information shall be specified with exclamation character ("!") as the first character of each header line (non-data line). As an exception, for data files with a touchstone extension (*.snp, n = 1,2,...) used for PDN definition, the lines starting with an hash character (" # ") is treated as the "option line" that specifies data format and units pertaining to touchstone data. Only one "option line" is allowed per touchstone data file. The names and paths of the data files are defined by the keyword *Data_files* and shall conform to A.2.4.2 and A.2.4.3.

In order to ensure portability and compressibility, the data files shall be placed either in the same directory as the XML files or in a sub-directory located at the same level or a lower level as the XML files, as shown in Figure A.2. It is not permitted to locate the additional files at a higher level than the XML files.

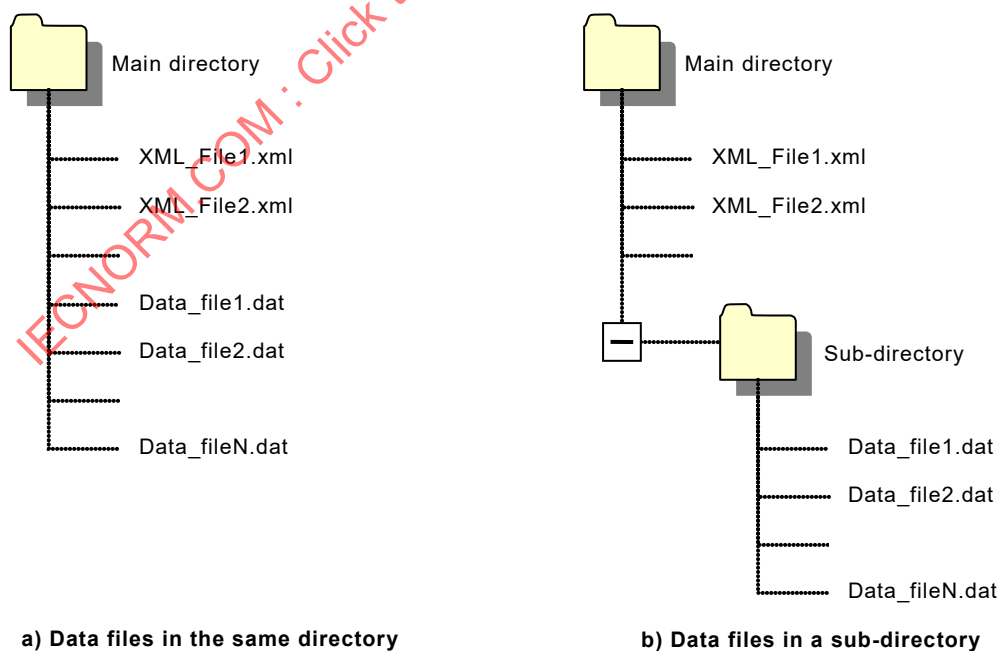


Figure A.2 – XML files with data files (*.dat)

A.2.4.7 Additional files

A XML file may contain references to other files such as document files (Keyword: *Documentation*). In order to ensure portability and compressibility, these additional files shall be placed either in the same directory as the single XML file or in a sub-directory located at the same level or a lower level as the XML files, as shown in Figure A.3. It is not permitted to locate the additional files at a higher level than the XML files.

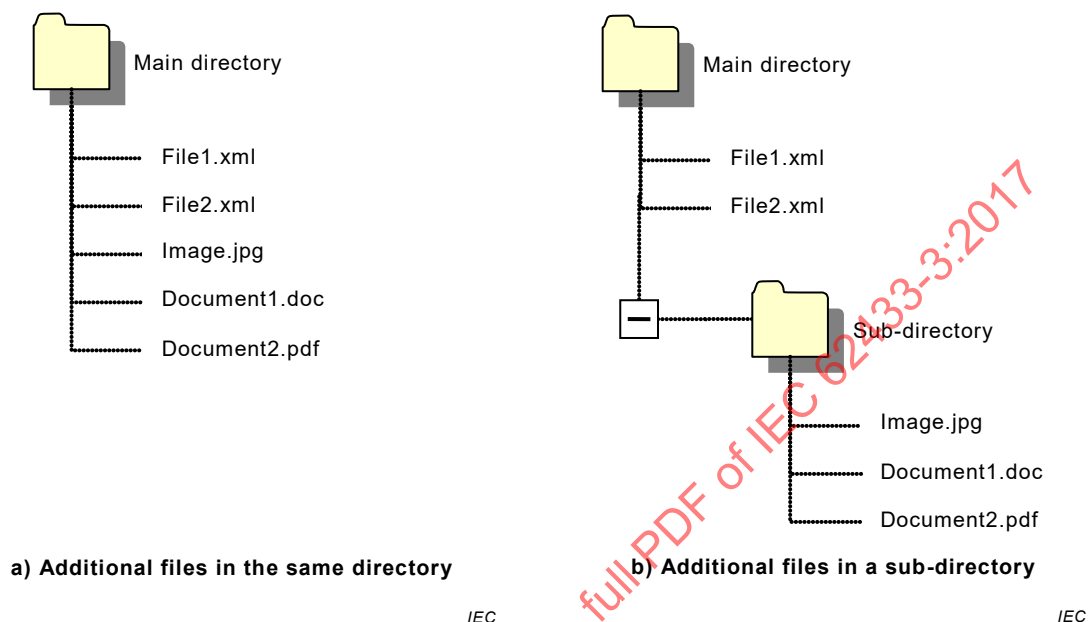


Figure A.3 – XML files with additional files

A.2.4.8 File compression

When compressing the file system, care shall be taken to include the paths of the various XML and data files in the compressed file. This ensures that, when decompressed, the file structure is conserved. The paths are not required when all files are stored in the same directory.

A.2.5 Values

A.2.5.1 General

When an element contains a value, this may be a numerical value (e.g. 123.45), or a numerical value with units (e.g. 123.45MHz).

A.2.5.2 Numerical syntax

Numerical values may be expressed in decimal form with the period (".") as the decimal separator (e.g. 123.45) or in scientific form (e.g. 1.2345e2). Spaces " " and commas ",", which are often used as thousand separators, and other characters are not allowed.

In cases where several numerical values are required, they shall be separated by spaces " " or tab characters.

A.2.5.3 Numerical with units syntax

The numerical value (see A.2.5.2) is followed by valid units, as described in A.2.5.5 (e.g. 123.45MHz). Spaces are not allowed between the numerical value and the units.

A.2.5.4 Text string

A text string may represent a word recognized by the XML parser or it may be a file name, a description, etc. A text string may contain any of the alphanumerical characters given in A.1.2.

A.2.5.5 Valid units

Units shall be expressed in SI or derived SI units. Valid units are:

V = Volt	Ohm	S = Siemens =1/Ohm
A = Ampere	Hz = Hertz	m = metre
W = Watt	s = second	H for Henry
F for Farads	ohm.m for resistivity	Celsius for degree Celsius
K for Kelvin	1 for dimensionless quantity	

Units are case sensitive.

Angles are expressed in degrees. The symbol "°" is not required. Percentage is expressed as "%".

Valid scaling factors are:

T = tera: 1e12	c = centi: 1e-2	p = pico: 1e-12
G = giga: 1e9	m = milli: 1e-3	f = femto: 1e-15
M = mega: 1e6	u = micro: 1e-6	a = atto: 1e-18
k = kilo: 1e3	n = nano: 1e-9	

When no scaling factors are specified, the appropriate base units are assumed. These are volts, Amperes, Watts, Ohms, Siemens, Hertz, metres, seconds, Henry, Farads, ohm.m, Celsius and Kelvin. Abbreviations for the units (e.g., pV, nA, ms, MHz) shall be used, except Ohm, which shall be written in full. A list of valid logarithmic units is shown in Table A.1.

Table A.1 – Valid logarithmic units

Usage	Symbol	Unit	Reference
Ratio	dB	Decibel	1
Power	dBW	Decibel Watt	1W
Power	dBmW	Decibel milli-Watt	1mW
Power	dBuW	Decibel micro-Watt	1µW
Voltage	dBV	Decibel Volt	1V
Voltage	dBmV	Decibel milli-Volt	1mV
Voltage	dBuV	Decibel micro-Volt	1µV
Ampere	dBA	Decibel Ampere	1A
Ampere	dBmA	Decibel milli-Ampere	1mA
Ampere	dBuA	Decibel micro-Ampere	1µA
Impedance	dBohm	Decibel Ohms	1Ohm
Admittance	dBS	Decibel Siemens	1S

Unit definitions can be made in any section and with the *Unit* keyword. A typical unit description is shown below:

```
<Unit>  
    kHz  
</Unit>
```

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62433-3:2017

Annex B (informative)

Electromagnetic fields radiated by an elementary electric and magnetic dipole

B.1 Electric dipole

The electric $\vec{E}_A$ and magnetic $\vec{H}_A$ fields radiated by an elementary current line (see Figure B.1) are obtained from the magnetic vector potential $\vec{A}$:

$$\vec{A}(x, y, z) = \frac{\mu}{4\pi} \int_C \vec{I}_e(x'_1, y'_1, z'_1, x'_2, y'_2, z'_2) \frac{e^{-jkR}}{R} dl' \quad (\text{B.1})$$

where:

(x, y, z)	represents the coordinates of the point where the electric and magnetic fields are evaluated,
(x'_1, y'_1, z'_1) and (x'_2, y'_2, z'_2)	represent the coordinates of the source,
μ	is the permeability of the medium under study,
R	is the distance between the observation and the source,
C	is the contour of the line segment

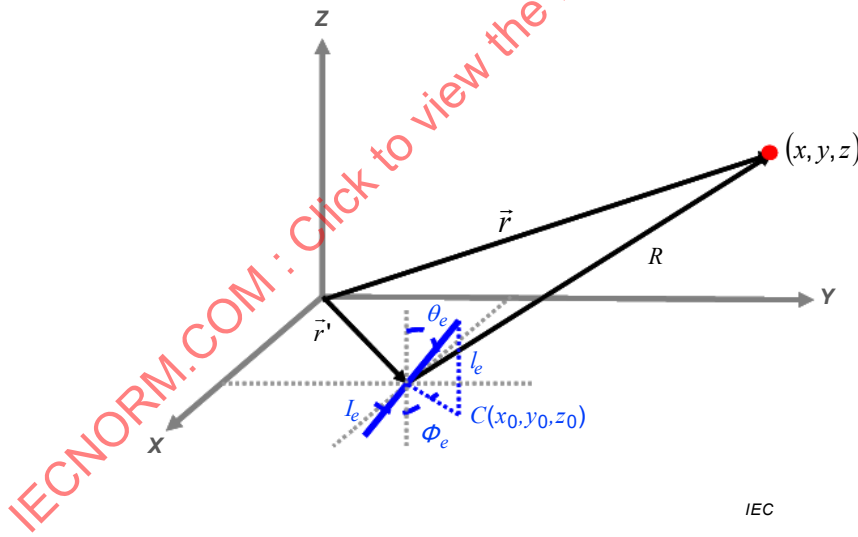


Figure B.1 – An elementary current line in space

If the current line is sufficiently thin and small with respect to the wavelength and if the observation point is sufficiently far away when compared to the length of the current element, it is convenient to represent the current element with its centre (x_0, y_0, z_0) where

$x_0 = \frac{x_{01} + x_{02}}{2}$, $y_0 = \frac{y_{01} + y_{02}}{2}$, $z_0 = \frac{z_{01} + z_{02}}{2}$ with (x_{01}, y_{01}, z_{01}) and (x_{02}, y_{02}, z_{02}) representing the start and end coordinates of the dipole vector. Thus equation B.1 can be approximated as:

$$\vec{A}(x, y, z) = \frac{\mu I_e l_e}{4\pi R} e^{-jkR} (\sin \theta_e \cos \phi_e \hat{x} + \sin \theta_e \sin \phi_e \hat{y} + \cos \theta_e \hat{z}) \quad (\text{B.2})$$

where:

- Φ_e is the orientation of the dipole in azimuth
- θ_e is the orientation of the dipole in elevation
- I_e is the current flowing through the dipole
- l_e is the length of the dipole

$$R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$$

The radiated magnetic field can be evaluated from:

$$\vec{H}_A = \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times \vec{A} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \hat{x} + \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \hat{y} + \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \hat{z} \quad (B.3)$$

The three components of the magnetic field can be expressed as:

$$H_{A,x} = -\frac{I_e l_e}{4\pi R^3} e^{-jkR} \cdot (1 + jkR) \cdot [(y - y_0) \cdot \cos \theta_e - (z - z_0) \cdot \sin \theta_e \sin \phi_e] \quad (B.4)$$

$$H_{A,y} = -\frac{I_e l_e}{4\pi R^3} e^{-jkR} \cdot (1 + jkR) \cdot [(z - z_0) \cdot \sin \theta_e \cos \phi_e - (x - x_0) \cdot \cos \theta_e] \quad (B.5)$$

$$H_{A,z} = -\frac{I_e l_e}{4\pi R^3} e^{-jkR} \cdot (1 + jkR) \cdot \sin \theta_e \cdot [(x - x_0) \cdot \sin \phi_e - (y - y_0) \cdot \cos \phi_e] \quad (B.6)$$

The radiated electric can be obtained from:

$$\vec{E}_A = \frac{1}{j\omega\epsilon} \vec{\nabla} \times \vec{H}_A = \frac{1}{j\omega\epsilon} \left(\frac{\partial H_{A,z}}{\partial y} - \frac{\partial H_{A,y}}{\partial z} \right) \hat{x} + \frac{1}{j\omega\epsilon} \left(\frac{\partial H_{A,x}}{\partial z} - \frac{\partial H_{A,z}}{\partial x} \right) \hat{y} + \frac{1}{j\omega\epsilon} \left(\frac{\partial H_{A,y}}{\partial x} - \frac{\partial H_{A,x}}{\partial y} \right) \hat{z}$$

The three electric field components are:

$$E_{A,x} = C_R \{ \Delta k \cdot R^2 \cdot \sin \theta_e \cos \phi_e - \Delta k_3 \cdot \Delta x \cdot [\Delta x \cdot \sin \theta_e \cos \phi_e + \Delta y \cdot \sin \theta_e \sin \phi_e + \Delta z \cdot \cos \theta_e] \}$$

$$E_{A,y} = C_R \{ \Delta k \cdot R^2 \cdot \sin \theta_e \sin \phi_e - \Delta k_3 \cdot \Delta y \cdot [\Delta x \cdot \sin \theta_e \cos \phi_e + \Delta y \cdot \sin \theta_e \sin \phi_e + \Delta z \cdot \cos \theta_e] \}$$

$$E_{A,z} = C_R \{ \Delta k \cdot R^2 \cos \theta_e - \Delta k_3 \cdot \Delta z \cdot [\Delta x \cdot \sin \theta_e \cos \phi_e + \Delta y \cdot \sin \theta_e \sin \phi_e + \Delta z \cdot \cos \theta_e] \}$$

where

$$C_R = \frac{k^2}{j\omega\epsilon} \frac{I_e l_e}{4\pi R^3} e^{-jkR}$$

$$R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$$

$$\Delta x = x - x_0$$

$$\Delta y = y - y_0$$

$$\Delta z = z - z_0$$

$$\Delta k = 1 - \frac{j}{kR} - \frac{1}{(kR)^2}$$

$$\Delta k_3 = 1 - j \frac{3}{kR} - \frac{3}{(kR)^2}$$

B.2 Magnetic dipole

The electric $\vec{E}_A$ and magnetic $\vec{H}_A$ fields radiated by an elementary magnetic dipole (see Figure B.2) are obtained from the electric vector potential $\vec{F}$:

$$\vec{F}(x, y, z) = \frac{\varepsilon}{4\pi} \int_C \vec{I}_m(x'_1, y'_1, z'_1, x'_2, y'_2, z'_2) \frac{e^{-jkR}}{R} dl' \quad (\text{B.7})$$

where:

(x, y, z)	represents the coordinates of the point where the electric and magnetic fields are evaluated,
$(x'_1, y'_1, z'_1, x'_2, y'_2, z'_2)$	represents the coordinates of the source,
ε	is the permittivity of the medium under study,
R	is the distance between the observation and the source,
C	is the contour of the line segment

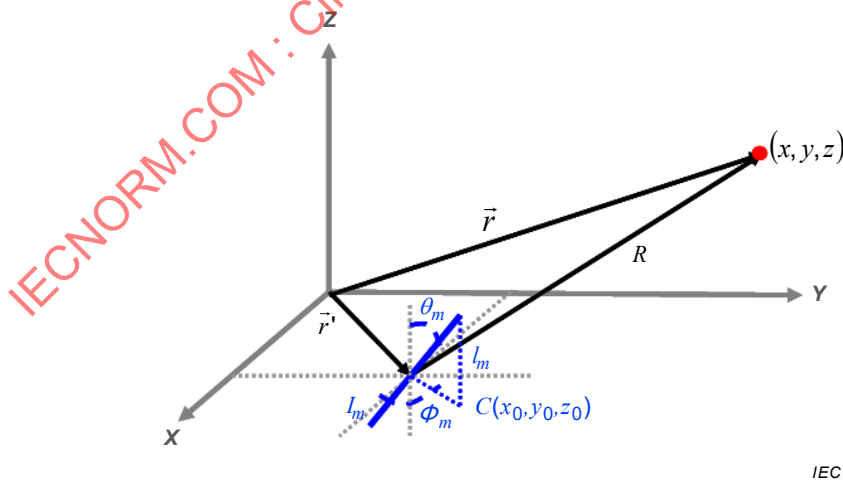


Figure B.2 – Elementary magnetic dipole in space

If the magnetic dipole is sufficiently thin and small with respect to the wavelength and if the observation point is sufficiently far away when compared to the length of the current element, it is convenient to represent the current element with its centre (x_0, y_0, z_0) where

$$x_0 = \frac{x_{01} + x_{02}}{2}, y_0 = \frac{y_{01} + y_{02}}{2}, z_0 = \frac{z_{01} + z_{02}}{2} \text{ with } (x_{01}, y_{01}, z_{01}) \text{ and } (x_{02}, y_{02}, z_{02}) \text{ representing}$$

the start and end coordinates of the dipole vector. Thus equation B.7 can be approximated as:

$$\vec{F}(x, y, z) = \frac{\varepsilon I_m l_m}{4\pi R} e^{-jkR} (\sin \theta_m \cos \phi_m \hat{x} + \sin \theta_m \sin \phi_m \hat{y} + \cos \theta_m \hat{z})$$

where:

- ϕ_m is the orientation of the dipole in azimuth
- θ_m is the orientation of the dipole in elevation
- I_m is the “magnetic” current flowing through the dipole
- L_m is the length of the dipole

$$R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$$

ε is the permittivity of the medium under study

The radiated electric field can be evaluated from:

$$\vec{E}_F = -\frac{1}{\varepsilon} \vec{\nabla} \times \vec{F} = -\frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \hat{x} - \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right) \hat{y} - \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \hat{z}$$

The three components of the electric field can be expressed as:

$$E_{F,x} = \frac{I_m l_m}{4\pi R^3} e^{-jkR} \cdot (1 + jkR) \cdot [(y - y_0) \cdot \cos \theta_m - (z - z_0) \cdot \sin \theta_m \sin \phi_m]$$

$$E_{F,y} = \frac{I_m l_m}{4\pi R^3} e^{-jkR} \cdot (1 + jkR) \cdot [(z - z_0) \cdot \sin \theta_m \cos \phi_m - (x - x_0) \cdot \cos \theta_m]$$

$$E_{F,z} = \frac{I_m l_m}{4\pi R^3} e^{-jkR} \cdot (1 + jkR) \cdot \sin \theta_m [(x - x_0) \cdot \sin \phi_m - (y - y_0) \cdot \cos \phi_m]$$

The radiated magnetic fields can be obtained from:

$$\vec{H}_F = j \frac{1}{\omega \mu} \vec{\nabla} \times \vec{E}_F = j \frac{1}{\omega \mu} \left(\frac{\partial E_{F,z}}{\partial y} - \frac{\partial E_{F,y}}{\partial z} \right) \hat{x} + j \frac{1}{\omega \mu} \left(\frac{\partial E_{F,x}}{\partial z} - \frac{\partial E_{F,z}}{\partial x} \right) \hat{y} + j \frac{1}{\omega \mu} \left(\frac{\partial E_{F,y}}{\partial x} - \frac{\partial E_{F,x}}{\partial y} \right) \hat{z}$$

The three magnetic field components are:

$$H_{F,x} = C_R \{ \Delta k \cdot R^2 \cdot \sin \theta_m \cos \phi_m - \Delta k_3 \cdot \Delta x \cdot [\Delta x \cdot \sin \theta_m \cos \phi_m + \Delta y \cdot \sin \theta_m \sin \phi_m + \Delta z \cdot \cos \theta_m] \}$$

$$H_{F,y} = C_R \{ \Delta k \cdot R^2 \cdot \sin \theta_m \sin \phi_m - \Delta k_3 \cdot \Delta y \cdot [\Delta x \cdot \sin \theta_m \cos \phi_m + \Delta y \cdot \sin \theta_m \sin \phi_m + \Delta z \cdot \cos \theta_m] \}$$

$$H_{F,z} = C_R \{ \Delta k \cdot R^2 \cdot \cos \theta_m - \Delta k_3 \cdot \Delta z \cdot [\Delta x \cdot \sin \theta_m \cos \phi_m + \Delta y \cdot \sin \theta_m \sin \phi_m + \Delta z \cdot \cos \theta_m] \}$$

where

$$C_R = \frac{k^2}{j\omega\mu} \frac{I_m l_m}{4\pi R^3} e^{-jkR}$$

$$R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$$

$$\Delta x = x - x_0$$

$$\Delta y = y - y_0$$

$$\Delta z = z - z_0$$

$$\Delta k = 1 - \frac{j}{kR} - \frac{1}{(kR)^2}$$

$$\Delta k_3 = 1 - j \frac{3}{kR} - \frac{3}{(kR)^2}$$

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62433-3:2017

Annex C (informative)

Example files

C.1 Minimum default ICEM-RE file

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<REmodel>
  <Header>
    <Rem_ver>1.0</Rem_ver>
    <Filename>MinimumICEMRE_file.xml</Filename>
    <File_ver>1</File_ver>
  </Header>
  <Frequency>
    100MHz
  </Frequency>
  <Validity>
    <Power_supply>3.3</Power_supply>
    <Frequency_range>100MHz</Frequency_range>
  </Validity>
  <Pdn>
    <Unit>mm</Unit>
    <Submodel Frequency_value="100MHz">
      <Vector Type="Electric";Name="Dipole1">
        <Start>(0,0,0)</Start>
        <End>(.2,.2,0)</End>
      </Vector>
    </Submodel>
  </Pdn>
  <Ia>
    <Unit>mA</Unit>
    <Submodel Frequency_value="100MHz">
      <Vector Type="Electric";Name="Dipole1">
        <Amplitude>230</Amplitude>
        <Phase>32</Phase>
      </Vector>
    </Submodel>
  </Ia>
</REmodel>
```

This example represents the minimum file required by the radiated emission model XML file format. It contains the information for a model with one electric dipole specified at one frequency. The used units in this example are:

- mm for the PDN
- mA for the IA
- MHz for the frequency
- Coordinate system is by default "Cartesian" and the reference point is Origin (0,0,0)
- Model is defined for given conditions in the validity section

For such a minimum file, it is strongly recommended to choose a file name describing clearly the modelling conditions (e.g. Devicename_XXXMHz.xml). Additional information can be added by including the appropriate keywords or a *Notes* section.

C.2 Microcontroller example in REML format

An example ICEM-RE macro-model of a microcontroller is illustrated. The microcontroller shown in Figure C.1 operates at 28 MHz. The model is constructed from near-field measurements made on a surface of 40 mm x 40 mm at 4 mm above the DUT, with a measurement step of 1 mm along the x and y axes. The tangential magnetic field components (H_x and H_y) are used for extracting the model using "Model_{EM_iter}". Details of this modelling method are provided in Annex E.

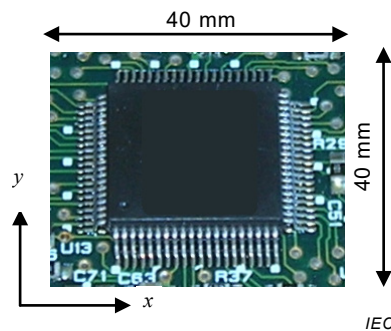


Figure C.1 – Microcontroller used for illustration

The ICEM-RE model is represented using 225 dipoles using the following conditions and units:

- mm for the PDN coordinates
- mA for the IA
- MHz for the frequency
- Coordinate system is "Cartesian" and the reference point is Origin "(0,0,0)".

The REML file of the microcontroller is illustrated below.

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<REmodel>
  <!-- Header section -->
  <Header>
    <Rem_ver>1.0</Rem_ver>
    <Filename>ICEMRE_Micro.reml</Filename>
    <File_ver>1.0</File_ver>
    <Author>
      Name
    </Author>
    <Dut>DUT name</Dut>
    <Date>Oct.08,2013</Date>
  </Header>
  <!-- Frequency section -->
  <Frequency>28MHz</Frequency>
  <!-- Coordinate_system section -->
  <Coordinate_system>Cartesian</Coordinate_system>
  <!-- Reference section -->
  <Reference>(0,0,0)</Reference>
  <!-- Validity section -->
  <Validity>
    <Power_supply>5V</Power_supply>
    <Frequency_range>28MHz</Frequency_range>
    <Temperature>25Celsius</Temperature>
    <Notes>Quartz used as reference, 28MHz</Notes>
  </Validity>
  <!-- Pdn section -->
  <Pdn>
    <Submodel Frequency_unit="MHz" Frequency_value="28">
      <Unit>mm</Unit>
      <Data_files>PDN_microcontroller_28MHz.txt</Data_files>
    </Submodel>
  </Pdn>
</REmodel>
```

```

        </Submodel>
    </Pdn>
    <!-- Ia section -->
    <Ia>
        <Submodel Frequency_unit="MHz" Frequency_value="28">
            <Unit>mA</Unit>
            <Data_files>IA_microcontroller_28MHz.txt</Data_files>
        </Submodel>
    </Ia>
</REmodel>

```

The details of PDN file containing dipole "Name", "Type", "Start" and "End" coordinates of the different dipoles representing the ICEM-RE are provided in Figure C.2.

```

!Dipole PDN information for microcontroller at 28MHz
!Type Name Start End
Electric dipole1 (-21.1145,1.4167,0) (-21.1145,1.4167,0)
Electric dipole2 (-21.7531,2.5217,0) (-21.7531,2.5217,0)
Electric dipole3 (-20.9,4.56,0) (-20.9,4.56,0)
Electric dipole4 (-19.6869,-1.224,0) (-19.6869,-1.224,0)
Electric dipole5 (-19.761,0.24503,0) (-19.761,0.24503,0)
Electric dipole6 (-19.879,1.5901,0) (-19.879,1.5901,0)
Electric dipole7 (-19.5769,3.5591,0) (-19.5769,3.5591,0)
Electric dipole8 (-18.9616,3.3401,0) (-18.9616,3.3401,0)
Electric dipole9 (-19.0331,6.8965,0) (-19.0331,6.8965,0)
Electric dipole10 (-19.371,8.3671,0) (-19.371,8.3671,0)
:

```

IEC

Figure C.2 – Data file representing the PDN information of the microcontroller

The details of IA file containing dipole "Name", "Type", "Amplitude" and "Phase" coordinates of the different dipoles representing the ICEM-RE are provided in Figure C.3.

```

!Dipole IA information for microcontroller at 28MHz
!Type Name Amplitude Phase
Electric dipole1 1.6768 -57.1619
Electric dipole2 1.7317 85.5752
Electric dipole3 0.8579 5.3683
Electric dipole4 4.2995 -15.1601
Electric dipole5 6.5716 148.335
Electric dipole6 4.7563 -41.6551
Electric dipole7 2.3914 -174.3161
Electric dipole8 0.64857 -117.76
Electric dipole9 2.74 -93.753
Electric dipole10 2.7955 73.4814
:

```

IEC

Figure C.3 – Data file representing the IA information of the microcontroller

Annex D (normative)

REML valid keywords and usage

D.1 Root element keywords

The following keywords are placed at the beginning of the file after the XML definition:

Keyword	Parent	Description	Presence	Example
Header	Root element	Specifies a header section	Required	<Header> </Header>
Frequency	Root element	Specifies a frequency section.	Required	<Frequency> </Frequency >
Coordinate_system	Root element	Specifies the global coordinate system section	Optional	<Coordinate_system> </ Coordinate_system >
Reference	Root element	Specifies the reference section	Optional	<Reference> ... </Reference>
Validity	Root element	Specifies the validity section	Required	<Validity> ... </Validity>
Pdn	Root element	Specifies the PDN data	Required	<Pdn> </Pdn>
Ia	Root element	Specifies the IA data	Required	<Ia> </Ia>

D.2 File header keywords

The following keywords are placed at the beginning of the file after the root element start-tag:

Keyword	Parent	Description	Presence	Example
Rem_ver	Header element	Specifies the version of file format (1.0). Should follow the header element. Informs parsers of the version of XML exchange format used and allows them to know what keywords to expect.	Required	<Rem_ver>1.0</Rem_ver>
Filename	Header element	Specifies the file name. Normally follows the keyword: Rem_ver.	Required	<Filename> My_file.xml </Filename>
File_ver	Header element	Tracks the revision level of a particular .xml file. Revision level is set at the discretion of the originator of the file.	Required	<File_ver>1.0</File_ver>
Date	Header element	The value can contain blanks, be of any format, but should be limited to a maximum of 20 characters. The month should be spelled out for clarity. The parser considers this information as a data string and does not interpret it.	Optional	<Date> January 1, 2013 </Date>
Author	Header element	The value can contain blanks and be of any format. The parser considers this information as a data string and does not interpret it.	Optional	<Author> Name 1 Name2 </Author>
Dut	Header element	The value can contain blanks and be of any format. The parser considers this information as a data string and does not interpret it.	Optional	<Dut> 32-bit microcontroller </Dut>
Meas_method	Header element	The value can contain blanks and be of any format. The parser considers this information as a data string and does not interpret it.	Optional	<Meas_method> Near-field scan method </Meas_method>
Disclaimer	Header element	The value can contain blanks and be of any format. The parser considers this information as a data string and does not interpret it.	Optional	<Disclaimer> This file contains results of DPI. Other use is not guaranteed </Disclaimer>
Copyright	Header element	The value can contain blanks and be of any format. The parser considers this information as a data string and does not interpret it.	Optional	<Copyright> Copyright 2013, XYZ Corp., All Rights Reserved </Copyright>

D.3 Validity section keywords

The following keywords are placed in the root element start-tag:

Keyword	Parent	Description	Presence	Example
Power_supply	Validity element	Specifies the power supply conditions in which ICEM-RE model is extracted and defined. Should follow the validity element. Informs the user of the ICEM-RE validity criteria. A valid numerical value with units is allowed. See A.2.5 for more information.	Required	< Power_supply> 9V </ Power_supply>
Frequency_range	Validity element	Specifies the valid frequency range in which ICEM-RE model is extracted and defined. Should follow the validity element. Informs the user of the ICEM-RE validity criteria. A valid numerical value with units is allowed. See A.2.5 for more information.	Required	<Frequency_range> [10kHz-100MHz] </Frequency_range>
Temperature_range	Validity element	Specifies the valid temperature range in which ICEM-RE model is extracted and defined. Should follow the validity element. Informs the user of the ICEM-RE validity criteria. A valid numerical value with units is allowed. See A.2.5 for more information.	Required	<Temperature_range> [25Celsius-35Celsius] </Temperature_range>

D.4 Global keywords

The following keywords may be placed anywhere in the file, except within an XML element containing a value:

Keyword	Parent	Description	Presence	Example
Notes	Any element except those containing a value.	Optionally adds information about the setup, data, etc. The value can contain blanks, and be of any format. A notes section can be inserted anywhere in the file and the number of notes sections in the file is not limited. The parser considers this information as a data string and it does not interpret it.	Optional	<Notes> Use this section for any special notes </Notes>
Documentation	Any element except those containing a value.	Optionally adds the paths to files containing documentation on the project.	Optional	<Documentation> Project doc.pdf Model_descr.doc </Documentation>
Unit	Any element except those containing a value.	Specifies the unit of the defined parameter in the parent element	Optional	<Unit>mm</Unit>

D.5 Pdn section keywords

The PDN data for each frequency is defined within the *Submodel* tag. Refer to 6.9 for more details on valid keywords in the PDN section. The following keywords may be placed inside a PDN section.

Keyword	Parent	Description	Presence	Example
Unit	Pdn	Global unit for the PDN data	Optional	<pre><Pdn> <Unit> mm </Unit> </Pdn></pre>
Frequency_value	Submodel	Attribute to specify the frequency term of the PDN	Required	<pre><Pdn> <Submodel Frequency_value="10MHz"> ... </Submodel> </Pdn></pre>
Frequency_unit	Submodel	Attribute to specify the units of the frequency term of the PDN	Optional	<pre><Pdn> <Submodel Frequency_value="10" Frequency_unit="MHz"> ... </Submodel> </Pdn></pre>
Vector	Submodel	Keyword for defining the coordinates of the dipole vectors	Required	<pre><Pdn> <Submodel Frequency_value="10MHz"> <List> <Vector Type="Electric" Name="Dipole1"> <Start>(0,0,0)</Start> <End>(.2,.2,0)</End>> </Vector> </List> </Submodel> </Pdn></pre>
List	Submodel	Section for defining the dipole vectors for one frequency	Required if not Data_filed	<pre><Pdn> <Submodel Frequency_value="10MHz"> <List> <Vector Type="Electric" Name="Dipole1"> <Start>(0,0,0)</Start> <End>(.2,.2,0)</End>> </Vector> </List> </Submodel> </Pdn></pre>

Keyword	Parent	Description	Presence	Example
Data_files	Submodel	Keyword for representing PDN parameters with an external file	Required if not List	<pre> <Pdn> <Submodel Frequency_value="10MHz"> <Data_files> PDN_test1.txt </Data_files> </Submodel> </Pdn> </pre>

D.6 Ia section keywords

The IA data for each frequency is defined within the *Submodel* tag. Refer to 6.10 for more details on valid keywords in the IA section. The following keywords may be placed inside a PDN section.

Keyword	Parent	Description	Presence	Example
Unit	Ia	Global unit for the IA data	Optional	<pre> <Ia> <Unit> mA </Unit> </Ia> </pre>
Frequency_value	Submodel	Attribute to specify the frequency term of the IA	Required	<pre> <Ia> <Submodel Frequency_value="10MHz"> ... </Submodel> </Ia> </pre>
Frequency_unit	Submodel	Attribute to specify the units of the frequency term of the IA	Optional	<pre> <Ia> <Submodel Frequency_value="10" Frequency_unit="MHz"> ... </Submodel> </Ia> </pre>
Vector	Submodel	Keyword for defining the coordinates of the dipole vectors	Required	<pre> <Ia> <Submodel Frequency_value="10MHz"> <List> <Vector Type="Electric" Name="Dipole1"> <Amplitude>100</Amplitude> <Phase>30</Phase> </Vector> </List> </Submodel> </Ia> </pre>

Keyword	Parent	Description	Presence	Example
List	Submodel	Section for defining the dipole vectors for one frequency	Required if not Data_files	<pre> <la> <Submodel Frequency_value="10MHz"> <List> <Vector Type="Electric" Name="Dipole1"> <Start>(0,0,0)</Start> <End>(,2,,2,0)</End>> </Vector> </List> </Submodel> </la> </pre>
Data_files	Submodel	Keyword for representing IA parameters with an external file	Required if not List	<pre> <la> <Submodel Frequency_value="10MHz"> <Data_files> IA_test1.txt </Data_files> </Submodel> </la> </pre>

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62433-3:2017

Annex E (informative)

ICEM-RE extraction methods

E.1 General

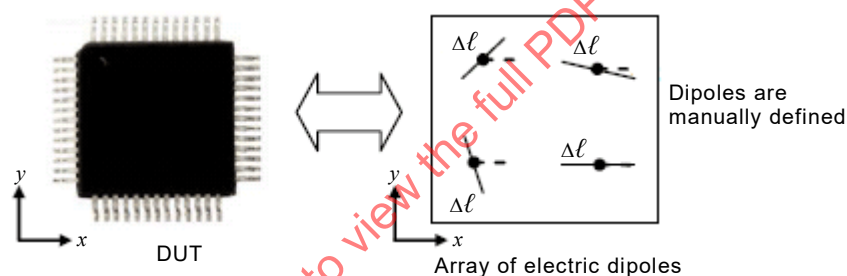
The different ICEM-RE extraction methods are presented in detail. All these extraction methods use near-field measured data as input. Depending on the available input data and desired modelling precision, one of these models should be chosen.

E.2 ICEM-RE Modelling methods

E.2.1 Model_{Hman}

This is the simplest modelling methodology and it models the magnetic field in the frequency domain with a manually user-defined electric dipole vectors. The number of dipoles is optimised iteratively for desired accuracy.

The architecture of the model is shown in Figure E.1.



IEC

Figure E.1 – Manually defined electric dipole array in Model_{Hman}

The total radiated magnetic field is a vector sum of fields radiated by each electric dipole vector as defined in equations B.4, B.5 and B.6.

E.2.2 Model_H

E.2.2.1 General

"Model_H" can be represented with the use of an electric dipole array or a magnetic dipole array to model the radiated magnetic field. Depending on the chosen topology, extraction procedure and /parameters are slightly different. Nevertheless, the output of the model contain the same information.

E.2.2.2 Magnetic emission model based on electric dipoles

This model represents the DUT with a set of electric dipoles that are automatically extracted. The representation of the model is the same as shown in Figure E.1, except that the number of dipoles and the length of dipoles are pre-fixed. All dipoles in the model have the same length.

The modelling procedure of the electric dipole based model is a two-step procedure. First the coordinates of each dipole are calculated and then their respective currents are computed. For this purpose, the x and y components of the near-magnetic field are used. The following parameters are fed-in as input data:

- The modelling frequency (f)
- The number of dipoles (p). Usually, one dipole is placed per measurement point and therefore dipoles are uniformly distributed throughout the DUT's surface. Nevertheless, it is possible to use lesser number of dipoles that are uniformly distributed.
- The length of the dipoles (dl). Care shall be taken to avoid intersection between adjacent dipoles. This data is therefore dependent on the number of dipoles. All dipoles in the model are of the same length.

NOTE When lesser number of dipoles is used, the inter-space distance between dipoles is an integer multiple of the measurement step size. Therefore, the total number of dipoles is always an integer divisor of the total measurement points.

Based on the topology described in Annex B, considering the contribution of all the dipoles in the model, the dipoles' coordinates can be extracted using the following system of equations, represented in a matrix form:

$$\begin{aligned} [H_x]_{m \times 1} &= [\alpha_x]_{m \times p} \times [I_e \cdot \sin \phi_e \cdot \sin \theta_e]_{p \times 1} \\ [H_y]_{m \times 1} &= [\alpha_y]_{m \times p} \times [I_e \cdot \cos \phi_e \cdot \sin \theta_e]_{p \times 1} \end{aligned} \quad (E.1)$$

where

p is the number of dipoles in the PDN

m is the number of measurement points

H_x and H_y are the complex magnetic fields (measured field for example)

I_e is the complex current flowing through the dipoles

$\Phi_e = \tan^{-1}\{(y_{02}-y_{01})/(x_{02}-x_{01})\}$, $\theta_e = \cos^{-1}\{(z_{02}-z_{01})/dl\}$ with (x_{01}, y_{01}, z_{01}) and (x_{02}, y_{02}, z_{02}) representing the dipole's start and stop coordinates respectively

$dl = \sqrt{(x_{02} - x_{01})^2 + (y_{02} - y_{01})^2 + (z_{02} - z_{01})^2}$ is the length of the dipole

α_x and α_y are constants derived from equations B.4, B.5 and B.6.

In most cases, since the IC under study is planar (in the XY plane) and its thickness is negligible, $z_{02} = z_{01} = \text{constant}$. Thus all the radiating parts of an IC such as the bondings, pins and the core lie in the same plane, say $z = 0$ (XY plane). Therefore, $\theta_e = 180^\circ$ and the two unknown variables in Equation (E.1) are I_e and Φ_e .

Φ_e is extracted from Equation (E.1) using:

$$\phi_e = \tan^{-1} \left(\frac{[\alpha_x]^{-1} [H_x]}{[\alpha_y]^{-1} [H_y]} \right) \quad (E.2)$$

It is now possible to obtain the geometrical parameters (PDN), (x_{01}, y_{01}, z_{01}) and (x_{02}, y_{02}, z_{02}) by:

$$x_{01} = \frac{dl}{2} \cos(180 + \phi_e) + x_0$$

$$y_{01} = \frac{dl}{2} \sin(180 + \phi_e) + y_0$$

$$x_{02} = \frac{dl}{2} \cos \phi_e + x_0$$

$$y_{02} = \frac{dl}{2} \sin \phi_e + y_0$$

$$z_{01} = z_{02} = 0 \text{ on the DUT's surface}$$

with (x_0, y_0, z_0) representing the centre of the each dipole which is also one of the measurement points in the near-field scan.

Once ϕ_e is extracted, I_e (magnitude and phase) is obtained by reformulating Equation (E.1) by:

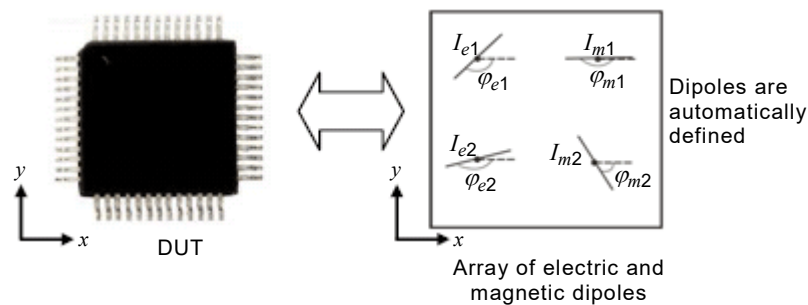
$$I_e = \begin{bmatrix} \alpha_x \sin \phi_e \\ \alpha_y \cos \phi_e \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}$$

E.2.2.3 Magnetic emission model based on magnetic loops

As explained in 5.2, current loops are represented as magnetic dipole based on the duality theorem (see Figure 5) for mathematical formulations. Using this transformation, this model is topologically the same as that presented in E.2.2.2. The unknown parameters of this model are: ϕ_m , I_m . The parameter extraction procedure is the same as that seen in E.2.2.2.

E.2.3 Model_{EM_Inv}

This model is based on representing the IC under test with a set of both electric and magnetic dipoles. Both types of dipoles can be placed at a particular point in space. The different dipoles, constituting the array, predicts the total electromagnetic radiations. The model representation is shown in Figure E.2.



IEC

Figure E.2 – Electric and magnetic dipole array in Model_{EM_Inv}

As discussed in Figure 5, the duality theorem transforms the magnetic loop into a magnetic current element. Similar to "Model_H", the number of dipoles, their positions, and their lengths are pre-fixed. By default, one magnetic dipole and one electric dipole is used at a specified

point. The unknown model parameters are the orientations and currents of both the electric and magnetic dipoles. This model requires the knowledge of near-magnetic and near-electric field measurements for its construction. The system of equations in this case is represented as:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ H_x \\ H_y \end{pmatrix}_{q \times 1} = [\alpha]_{q \times t} \times \begin{pmatrix} I_e \cdot \sin \phi_e \cdot \sin \theta_e \\ I_e \cdot \cos \phi_e \cdot \sin \theta_e \\ I_m \cdot \sin \phi_m \cdot \sin \theta_m \\ I_m \cdot \cos \phi_m \cdot \sin \theta_m \end{pmatrix}_{t \times 1} \quad (\text{E.3})$$

where t is the total number of electric and magnetic dipoles together, $q = 4m$, and m is the number of measurement points, and α is a constant based on the dipole positions and their lengths. I_e and ϕ_e represent the currents and orientations of the electric dipoles respectively, and I_m and ϕ_m represent those of magnetic dipoles respectively. The system of equation in Equation (E.3) is very similar to that in Equation (E.1); the solution is directly obtained using the inverse method, similar to "Model_H". The dipole orientations are first deduced from the ratios of x and y components of E and H field entities. Once obtained, I_e and I_m are extracted using matrix inversion as shown in Equation (E.3).

E.2.4 Model_{EM_Iter}

This model represents the DUT with a set of electric dipoles that are automatically extracted. The representation of the model is the same as shown in Figure E.1. Only the length of dipoles is pre-fixed. The number of dipoles is optimised iteratively along with the model parameters using a non-linear optimisation algorithm.

Similar to "Model_H", first the coordinates of each dipole are calculated and then their respective currents are computed. For this purpose, the x and y components of the near-magnetic field are used. If desired, the electric field can also be modelled, but it requires the knowledge of the z component of the electric field. The optimisation is performed for real and imaginary parts of the field data as shown in Equation (E.4).

$$f = \begin{cases} h_{\text{real}}([H_x], [H_y], [I_e^{\text{init}}], [\phi_e^{\text{init}}], [\alpha_x], [\alpha_y]) \\ h_{\text{imag}}([H_x], [H_y], [I_e^{\text{init}}], [\phi_e^{\text{init}}], [\alpha_x], [\alpha_y]) \end{cases} \quad (\text{E.4})$$

All variables in Equation (E.4) are the same as described in Equation (E.1). h_{real} and h_{imag} are non-linear functions linking all model parameters as per equations B.4 and B.5. This method of parametric extraction has a few advantages when compared to the method used in other models notably, in avoiding singularity problems linked with matrix inversion. Simultaneous solution of real and imaginary parts gives us a much optimized solution so that one can obtain the optimised number of dipoles for a given accuracy.

E.2.5 Model_{EM_TD}

This model is the same as "Model_{EM_Iter}", except that the principle is extended towards multiple frequencies. Thus the model is capable of predicting the time-harmonic EM fields. Once the EM fields have been obtained for the intended frequencies using "Model_{EM_Iter}", the time-harmonic field can be obtained from the frequency phasors as shown in Equation (E.5).

$\psi(f_i)$ $\Psi(f_i)$ denotes the phase of the field quantity at frequency f_i and $\omega_i = 2\pi f_i$ $\omega_i = 2\pi f_i$.

$$EH_u^t(t) = \sum_{i=1}^n |EH_u^t(f_i)| \sin(\omega_i t + \Psi(f_i)) \quad (\text{E.5})$$

E.2.6 Model selection guide

Model selection guide for choosing between the different modelling methods using near-field data is given in Table E.1.

Table E.1 – ICEM-RE model selection guide

Model name	Input data	Features	Disadvantages	Recommended usage
Model _{Hman}	H_z	Models the magnetic field with expected deviation in the range of 6dB to 10 dB. Provides a rough idea of the field magnitude. Easy integration into simulation tools	Number of dipoles are not optimised Could be tedious when the field distribution is complex Electric field is not modelled	Component placement on board: location and orientation Routing of critical traces Placement of connectors close to IC Shielding requirements
Model _H	H_x, H_y	Models the magnetic field with an expected deviation of less than 6 dB Single dipole type used: electric or magnetic Easy integration into simulation tools	Electric field is not modelled	Same Model _{Hman} but with an expected deviation of less than 6 dB: Inter-component inductive crosstalk PCB/System level simulation H field coupling on traces, harness, etc.
Model _{EM_Inv}	H_x, H_y E_x, E_y	Electric and magnetic field modelling with an expected deviation of less than 6 dB	Computationally intensive Integration into simulation tools is cumbersome	Same as Model _H and: Inter-component capacitive crosstalk E field coupling on traces, harness
Model _{EM_Iter}	H_x, H_y, E_z (E_z is needed for electric field modelling)	Electric and magnetic field modelling with an expected deviation of less than 6 dB Rapid computations	Iterative model, could be slow if too many dipoles are fed for initial iteration	
Model _{EMTD}	H_x, H_y, E_z (E_z is needed for electric field modelling)	Electric and magnetic field modelling with an expected deviation of less than 6 dB Rapid computations	Iterative model, could be slow if too many dipoles are fed for initial iteration	
NOTE The accuracy of the model is highly dependent on the input data. The accuracy stated in this table is informative and has been deduced from experiments [2]-[9].				

E.3 ICEM-RE modelling environment from near-field data

E.3.1 General

An electromagnetic emission modelling tool can be developed to facilitate easy use of some of the radiated emission models discussed in this standard. The fundamental purpose of such a tool is to provide an integrated environment for modelling the electromagnetic radiations at integrated circuit and equipment level.

The tool could incorporate the different ICEM-RE modelling methods: "Model_{Hman}", "Model_H", "Model_{EM_iter}", "Model_{EM_Inv}" and "Model_{EM_TD}". As specified in Table E.1., the choice of the right model is dependent on the desired accuracy and the input data.

Figure E.3 shows the screen-shot of an example tooling interface.

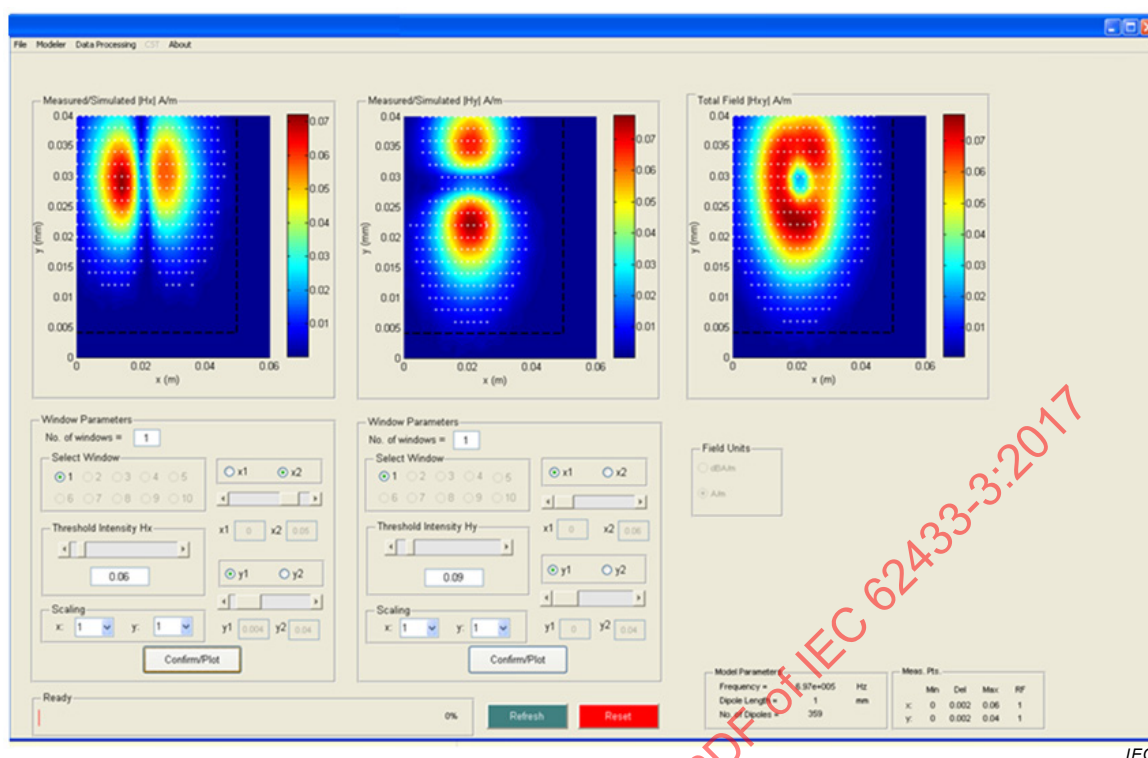
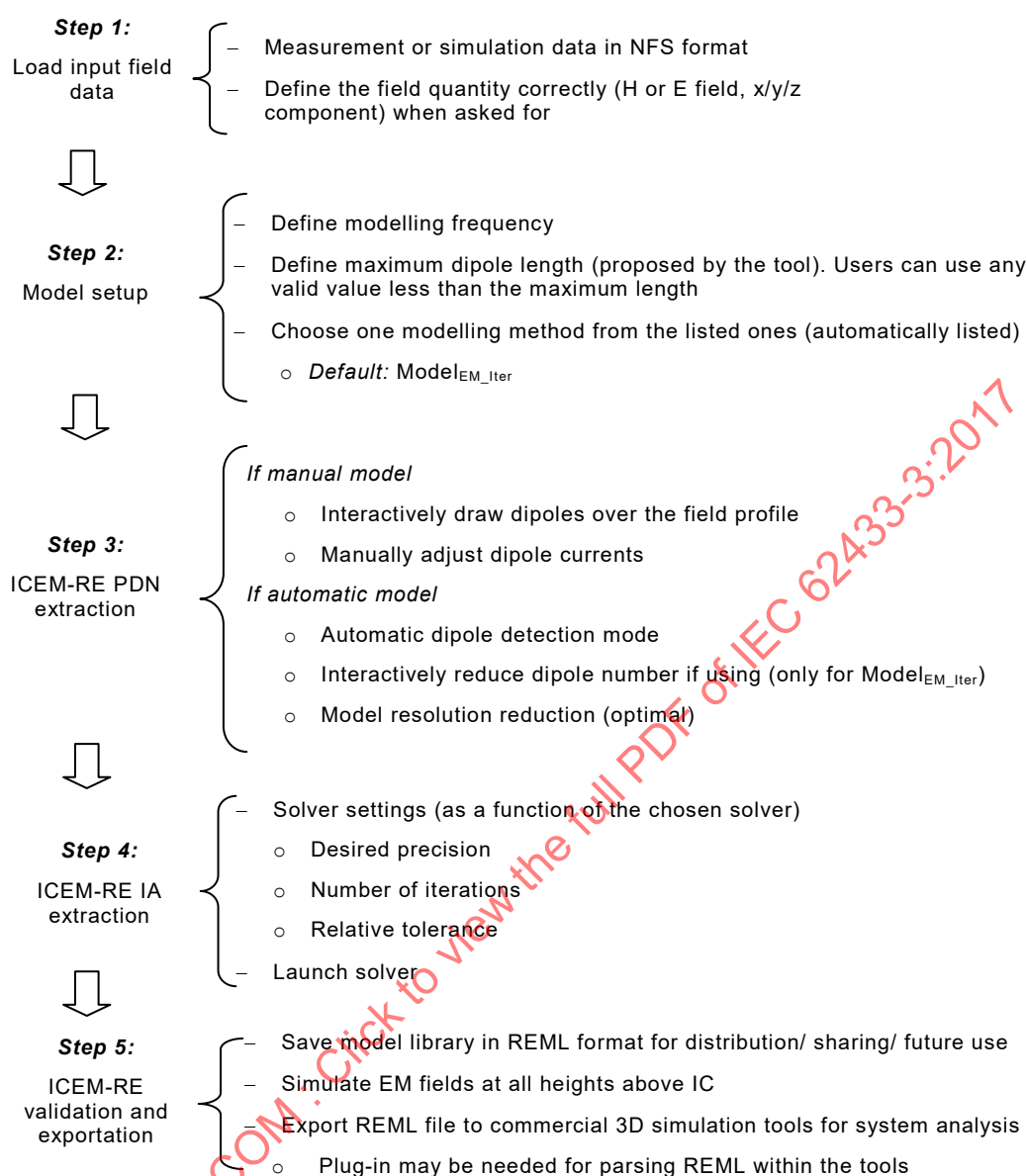


Figure E.3 – Example of an ICEM-RE modelling environment

E.3.2 Modelling design-flow

Figure E.4 shows the design-flow in order to setup a model for analysis, validation, optimizations and exportation into other tools.

- Step 1: Near-field data from measurements or simulation in NFS XML format should be loaded to start modelling. Care shall be taken to correctly specify the field quantities and the field component so that the system of equations is correctly setup.
- Step 2: The modelling frequency (many frequencies for time-harmonic modelling) needs to be specified (if the same was not defined in the NFS XML file loaded in the Step 1). Depending on the modelling frequency, the tool shall propose the maximum possible dipole length (for electric and magnetic dipoles) so that the dipoles are short. Once dipole geometry is defined, the user may select one of the modelling methods from the proposed list of models (as discussed in Table E.1).).
- Step 3: ICEM-RE extraction starts from this step. Depending on the chosen method, ICEM-RE PDN is extracted. For manual modelling, the user can interactively draw the electric dipoles and create the ICEM-RE macro-model. For automatic modelling, dipoles are automatically detected by the tool.
- Step 4: Once the ICEM-RE PDN is set, the IA is then extracted. For all methods, except "Model_{EM_Iter}" and "Model_{EM_TD}", no specific solver settings are needed. However, for these two methods, it may be possible to set special solver settings such as number of iterations, relative/absolute tolerances for optimisation based on user requested precision.
- Step 5: Once the PDN and IA are extracted, then the model data shall be exported in REML format as discussed in 5. The model can also be exported into 3D electromagnetic simulation tools for system level analysis as discussed in E.3.3. The model can be used to study the radiation behaviour of IC's in a system and its impact on neighbouring ICs, PCB tracks, connectors, harness, etc. A macro plug-in may be needed to link REML to the commercial 3D tools.



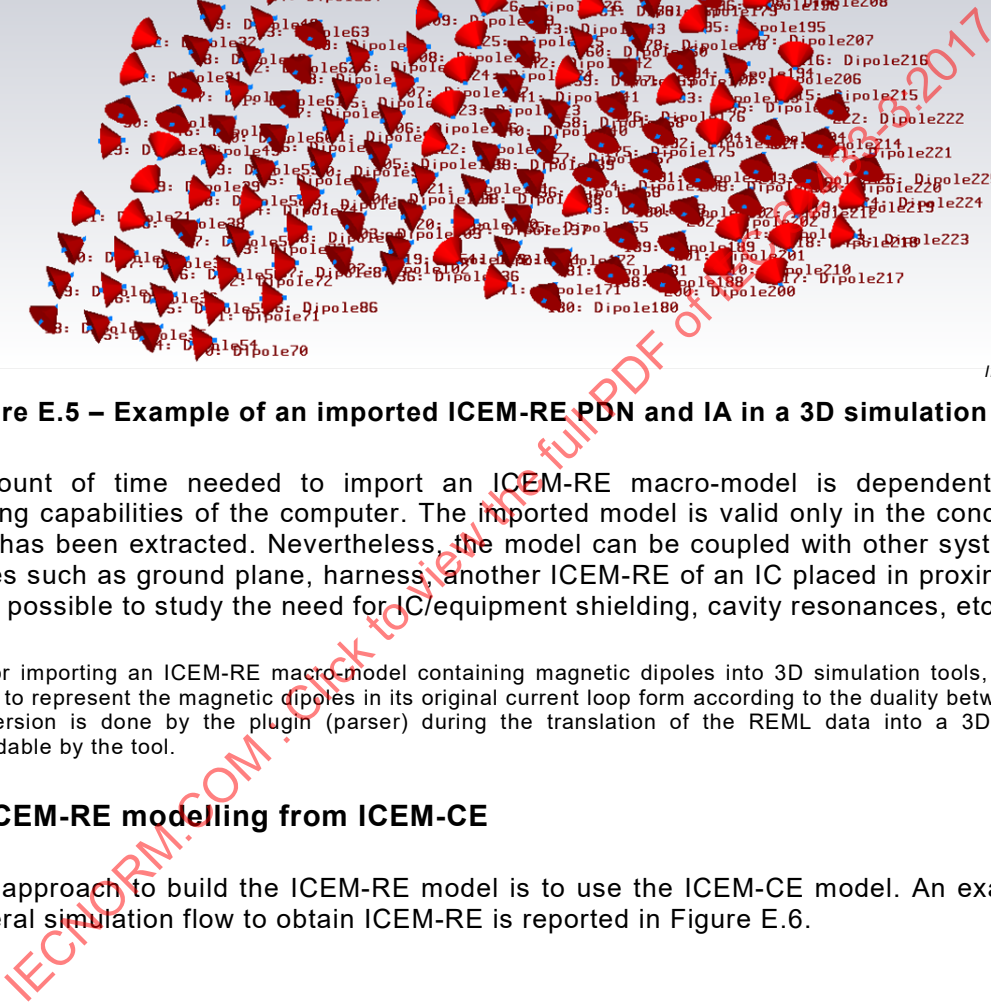
IEC

Figure E.4 – ICEM-RE modelling design-flow

E.3.3 ICEM-RE importation into 3D electromagnetic tools

An example of importing ICEM-RE into one of the commonly used 3D electromagnetic simulation tool is briefly described. A plug-in is used to translate the REML data into a 3D language understandable by the tool.

The microcontroller model discussed in F.2 extracted using "Model_{EM_Iter}" has been imported into the tool. The PDN and IA of the ICEM-RE macro-model are composed of 225 dipoles and the REML file has been presented in C.2. The imported model is shown in Figure E.5.



The amount of time needed to import an ICEM-RE macro-model is dependent on the processing capabilities of the computer. The imported model is valid only in the conditions in which it has been extracted. Nevertheless, the model can be coupled with other system-level structures such as ground plane, harness, another ICEM-RE of an IC placed in proximity, etc. It is also possible to study the need for IC/equipment shielding, cavity resonances, etc.

E.4 ICEM-RE modelling from ICEM-CE

Another approach to build the ICEM-RE model is to use the ICEM-CE model. An example of the general simulation flow to obtain ICEM-RE is reported in Figure E.6.

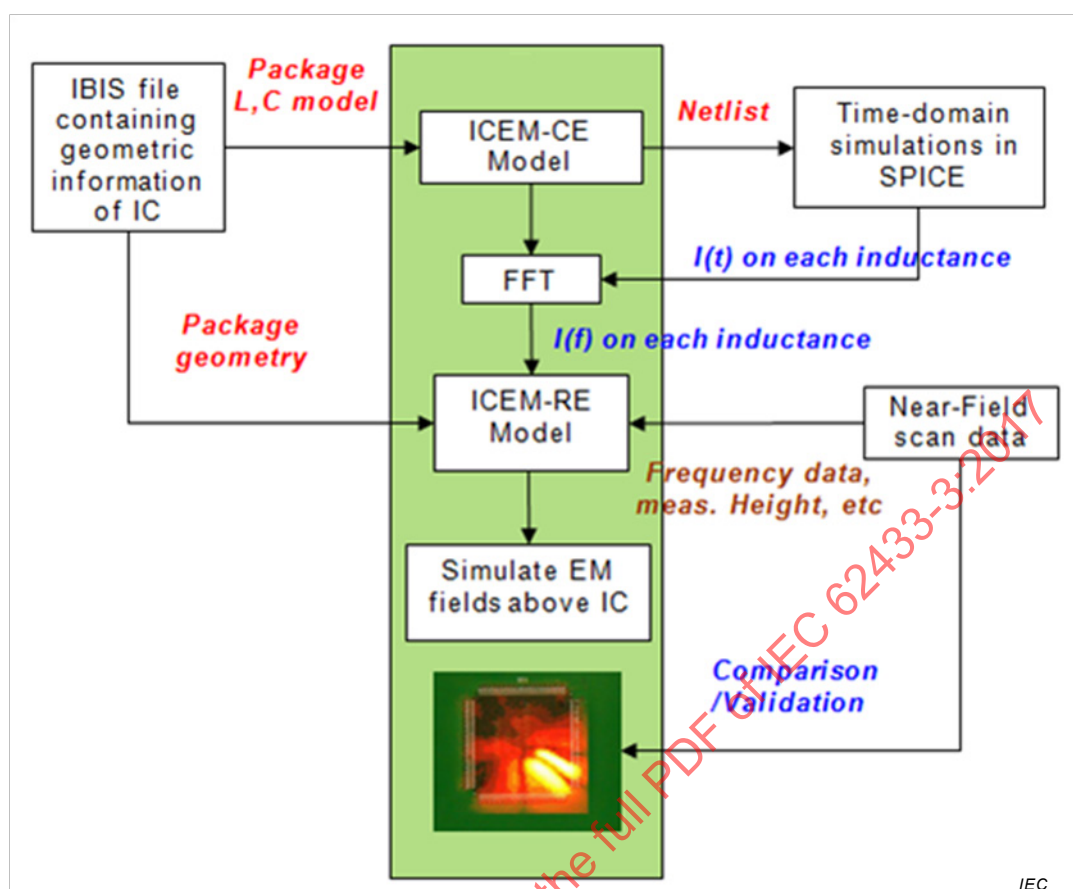


Figure E.6 – Design-flow to obtain ICEM-RE from ICEM-CE model

The input data for extracting ICEM-RE model are the IBIS file and an ICEM-CE electrical model. On the latter, geometric coordinates from the IBIS file are assigned to inductances associated with the radiating pins. A SPICE netlist is then generated from the electrical schematic of the model and a transient simulation is performed. The frequency-domain information on the current flowing through the selected inductances is obtained by performing FFT. Using the IBIS-based 3D model of the package, it is possible to link the frequency-domain currents (I_A) obtained through simulations to form the ICEM-RE model. From this point onwards, it is possible to simulate the electromagnetic fields above the IC. The radiated field also depends on a number of parameters such as:

- the scan frequency which controls the frequency of the currents through each of pin
- the measurement height for calculating the field relative to the pins (source)
- the presence of a ground plane (if any)
- the height of the pin with respect to the ground plane
- the spatial resolution of the near-field measurement

Annex F (informative)

ICEM-RE model validation examples

F.1 General

The different ICEM-RE modelling methods that have been presented in this standard have been validated on a variety of devices in a very large frequency band from 400 kHz to 31,5 GHz. Some examples of validation are described in this clause.

F.2 Validation on a microcontroller

F.2.1 General

The modelling procedure discussed in 7 are validated first on a microcontroller at 28 MHz by using near-field measurement data.

F.2.2 Details of the microcontroller

The microcontroller, used in a modem, shown in Figure F.1, operating at 28 MHz, is used to validate the model for the radiated magnetic fields. The model is constructed from near-field measurements made on a surface of 40 mm x 40 mm at 4 mm above the circuit, with a measurement step of 1 mm (41 x 41 measurement points).

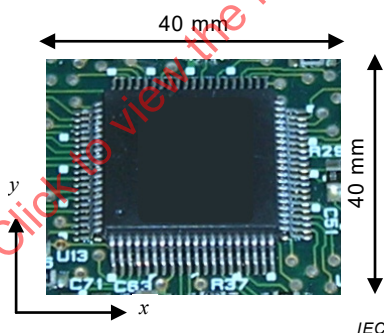


Figure F.1 – Microcontroller circuit used for model validation

As presented in 7.3, all the four modelling methods ("Model_{Hman}", "Model_H", "Model_{EM_Inv}", and "Model_{EM_Iter}") are suited for modelling the magnetic fields radiated by an IC and Table E.1 provides the guidelines to choose the right model.

The first step is to check the available input data and then choose the adapted model, as presented in Table E.1.. If there is more than one method available after the first level screening, then the suitable model shall be chosen based on the condition of the input data, the number of dipoles in the PDN and the desired modelling accuracy. These aspects are explained under various test cases presented below.

F.2.3 Case 1: Choosing manual model Model_{Hman}

Assuming that only the radiated z component of the magnetic field measured or simulated at a particular height (for example at 4 mm) above the microcontroller is available, it is mandatory to use "Model_{Hman}". Understanding the field distribution of an electric dipole from Figure 13, five electric dipoles (PDN) are placed as shown in Figure F.2.

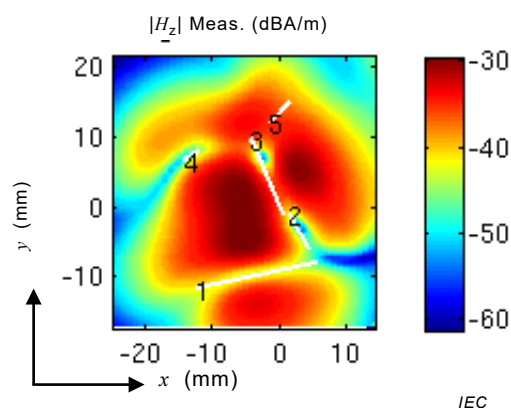


Figure F.2 – Manual dipoles representing the PDN of the microcontroller

As discussed in 7.3.3.2, the currents flowing in the dipoles (IA) are extracted iteratively by fitting with the H_z field magnitude. The comparison of the modelled field with the measured field at 4 mm above the microcontroller is shown in Figure F.3.

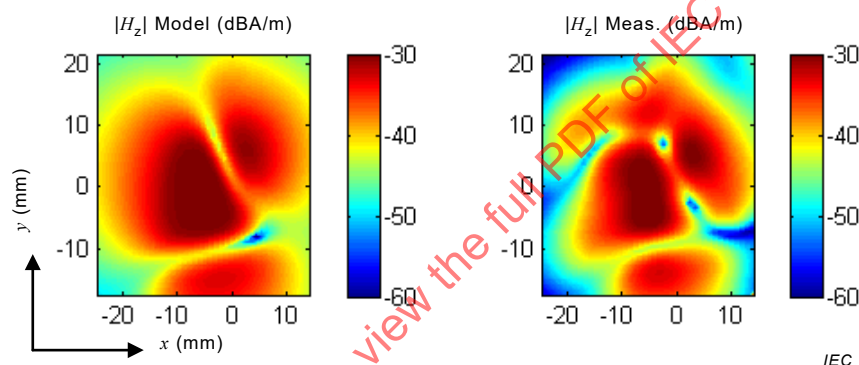


Figure F.3 – Comparison between the modelled and measured fields at 4 mm above the microcontroller using $Model_{Hman}$

As shown in Figure F.3, the modelled fields give a rough idea of the field distribution, notably, the field magnitude. However, the model is not accurate enough for predicting the other field components or modelling the magnetic field components at other heights above the device. Nevertheless, the modelling technique is computationally cheap and rapid for predicting the approximate field magnitude.

F.2.4 Case 2: Choosing one of the automatic magnetic field models

Assuming that the tangential components of the magnetic field above the device are available, " $Model_H$ " or " $Model_{EM_Iter}$ " can be opted. To choose between them, it is necessary to check the condition number of the available field data matrix. The condition number is a measure of how close a matrix is to being singular: a matrix with large condition number is nearly singular and is said to be ill-conditioned, whereas a matrix with condition number close to 1 is far from being singular and is said to be well-conditioned. In other words:

- a well-conditioned matrix can be inverted with good accuracy or the solution of a system of equations is accurate
- an ill-conditioned matrix is almost singular, and the computation of its inverse, or solution of a system of equations is prone to large numerical errors.

If the data is well-conditioned, then " $Model_H$ " can be directly chosen, given its rapidity and simplicity of use. The model automatically places one electric dipole at each measurement point and thus the model is computationally very precise and accurate. On the other-hand, if

the field data is ill-conditioned, or one is rigorously looking towards reducing the number of dipoles in the PDN, then "Model_{EM_Iter}" is the obvious alternative.

An example is illustrated with the use of these models on the microcontroller. The characteristics of each modelling method are also explained. Assuming "Model_H" is chosen, the tangential components of the radiated magnetic fields at 4 mm above the microcontroller are used for building the model with 1681 electric dipoles since there are 41 x 41 measurement points. The modelled fields are compared with the measured fields in Figure F.4; a good concordance between the results can be seen.

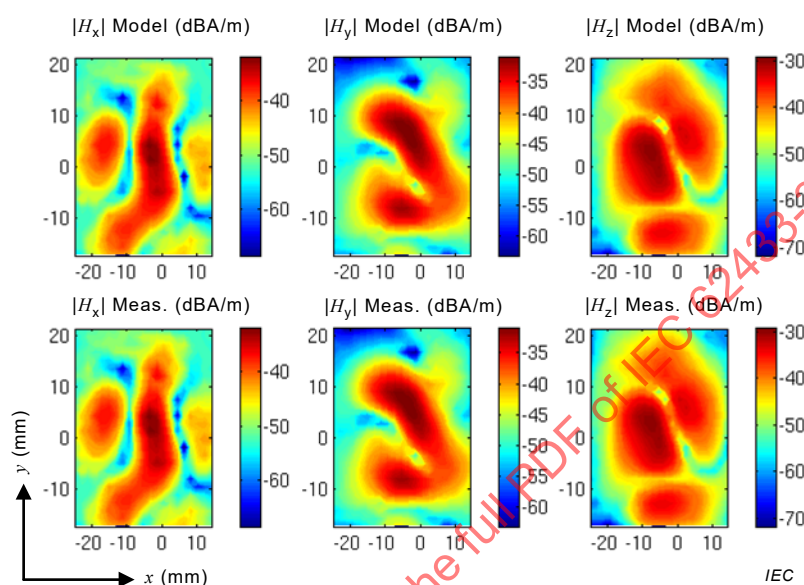


Figure F.4 – Validation of Model_H on the microcontroller

Suppose "Model_{EM_Iter}" is chosen and only its magnetic field modelling modules are used, the PDN of the microcontroller is represented with a set of 390 dipoles as shown in Figure F.5.

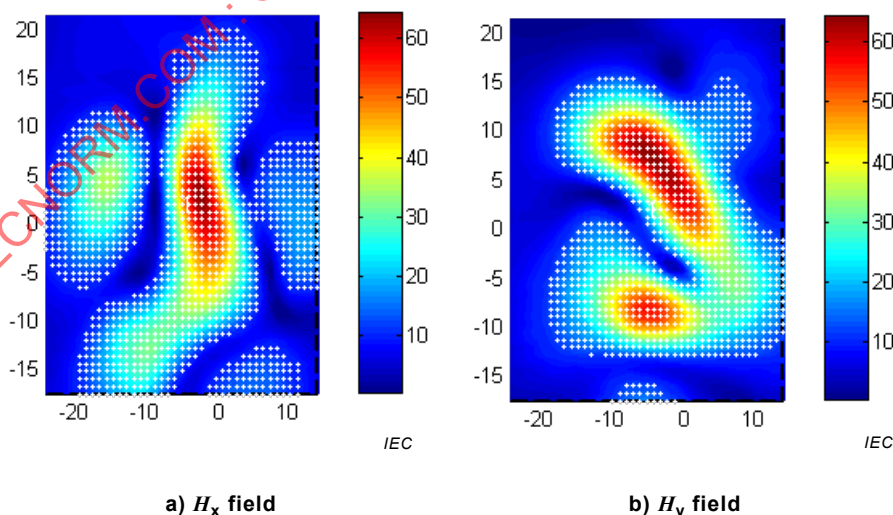


Figure F.5 – Detection of dipoles representing the microcontroller using Model_{EM_Iter}

NOTE The white spots in Figure F.5 indicate the "centre" of the electric dipoles.

The modelled fields are compared with the measured fields at the same height (4 mm) in Figure F.6.

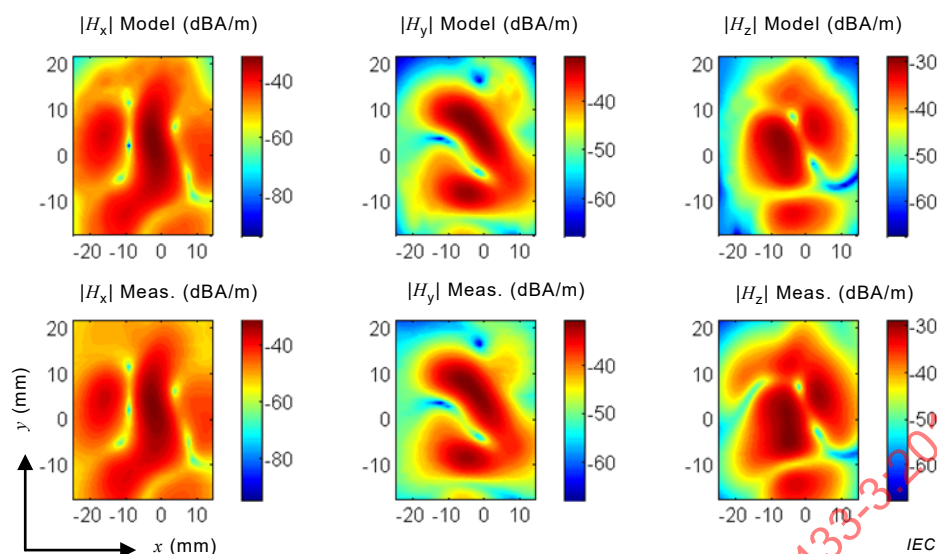


Figure F.6 – Validation of Model_{EM_iter} on the microcontroller

The comparison gives a good idea on the efficiency and accuracy of "Model_{EM_iter}". The only major inconvenience of this method could be its computation time, since this method uses an iterative method for solving the model parameters. Depending on the field distribution, the model may take up to 10 minutes, in contrast to "Model_H", which solves in about 3 minutes. Nevertheless, "Model_{EM_iter}" is the best choice for obtaining a reduced and optimized model with almost comparable accuracy.

F.3 Validation on an oscillator circuit

The oscillator shown in Figure F.7 is used to validate the model for the radiated electromagnetic fields. The model is constructed from near-field measurements made on a surface of 60 mm x 60 mm at 2 mm above the circuit, with a measurement step of 2 mm. The oscillator operates at 40 MHz.

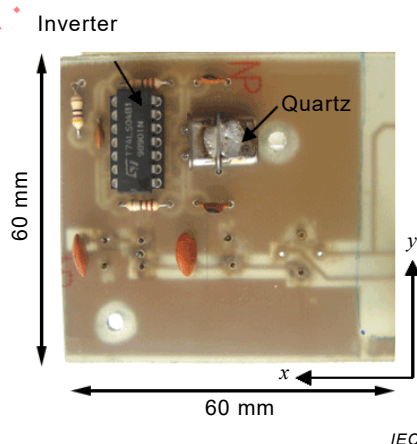


Figure F.7 – Oscillator circuit used for model validation

The schematic of the oscillator circuit is shown in Figure F.8. The oscillator board consists of a power supply regulator unit and an inverter circuit for clock frequency multiplication. A 20 MHz quartz is used as the fundamental frequency (clock source). The complete system is driven by a 9 V battery and is built on a two-layer FR4 substrate of size 120 mm x 60 mm.

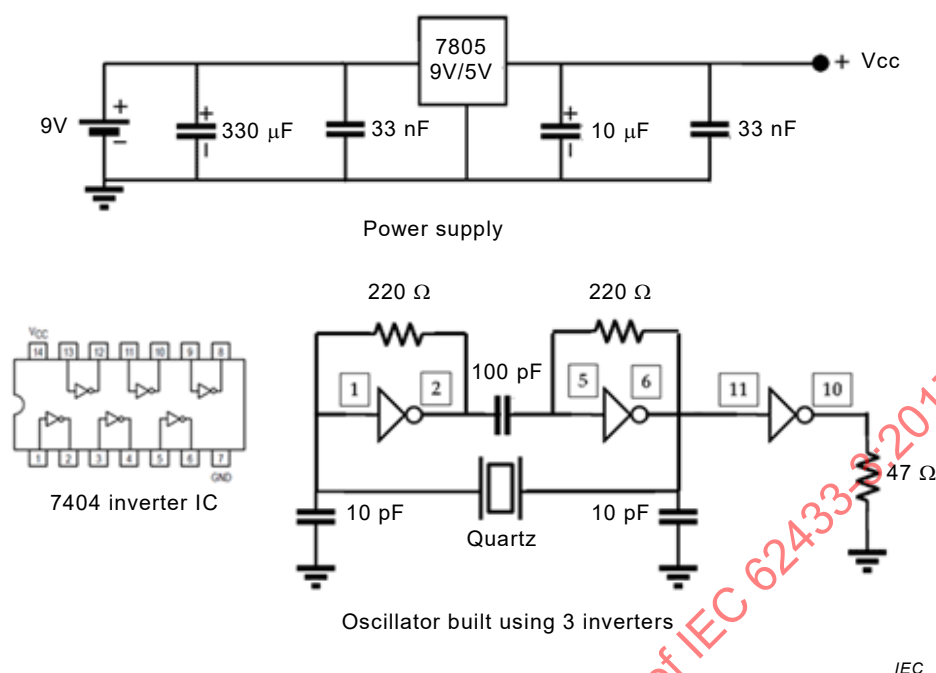


Figure F.8 – Schematic of the oscillator used for validation

As presented in 7.3, "Model_{EM_Inv}" or "Model_{EM_Iter}" are the available models for modelling both electric and magnetic fields. As discussed in Table E.1, one of these models can be chosen depending on the available input data and desired usage of the model.

Assuming that both electric and magnetic fields above the oscillator are available, then "Model_{EM_Inv}" can be chosen. Based on the measurement points, the model automatically uses one electric and one magnetic dipole at each point. Thus, in this example, the device is modelled with 961 electric and 961 magnetic dipoles, each of length 1 mm. Thus this model will be highly accurate, but can be computationally intensive. If the number of dipole sources is not limitative, this model is the obvious choice.

In contrast, "Model_{EM_Iter}" is the obvious choice for cases when the number of dipole sources is limited for further integration into electromagnetic simulation tools. In this case, the user shall possess the tangential magnetic field data for accurate magnetic field modelling and in complement, shall also possess the normal component of the electric field for modelling the electric field. The modelling algorithm automatically detects the "hot-spots" from the measured field data and places the dipoles accordingly to form the PDN. In the case of the oscillator, 457 dipoles alone are sufficient for accurate electromagnetic field modelling.

The results of "Model_{EM_Inv}" and "Model_{EM_Iter}" are shown in Figure F.9 and Figure F.10. In both the case, the model PDN and IA are extracted using the measured magnetic and electric fields at 2 mm above the oscillator. The electromagnetic fields at 10 mm are then predicted and compared with those of measurements.

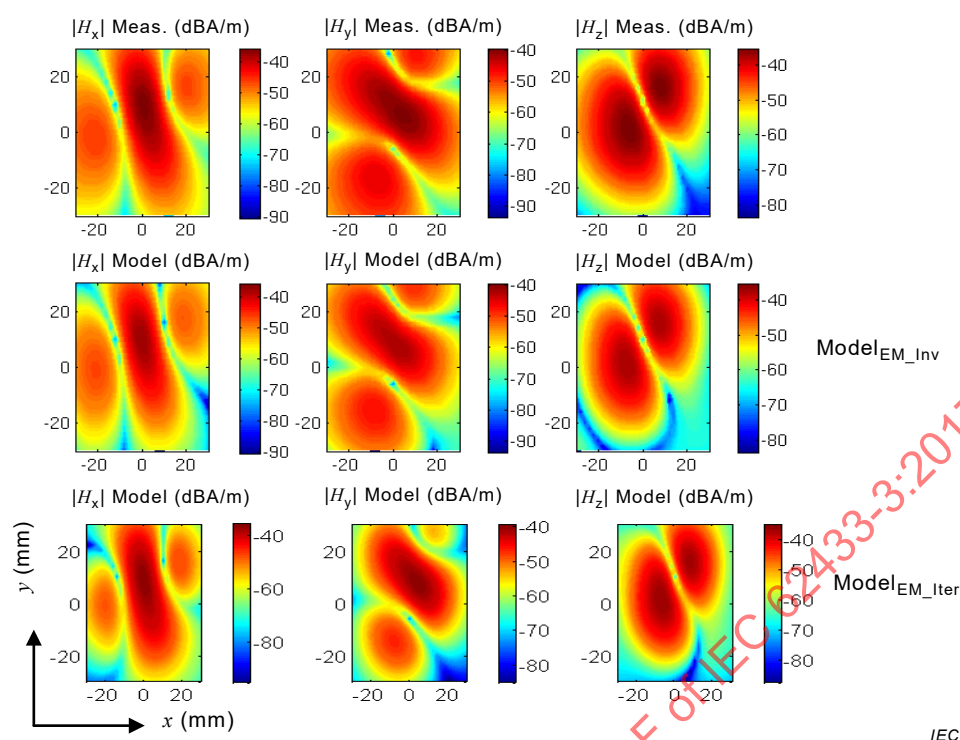


Figure F.9 – Validation of the magnetic field predicted with $\text{Model}_{\text{EM_Inv}}$ and $\text{Model}_{\text{EM_Iter}}$ on the oscillator at 10 mm height

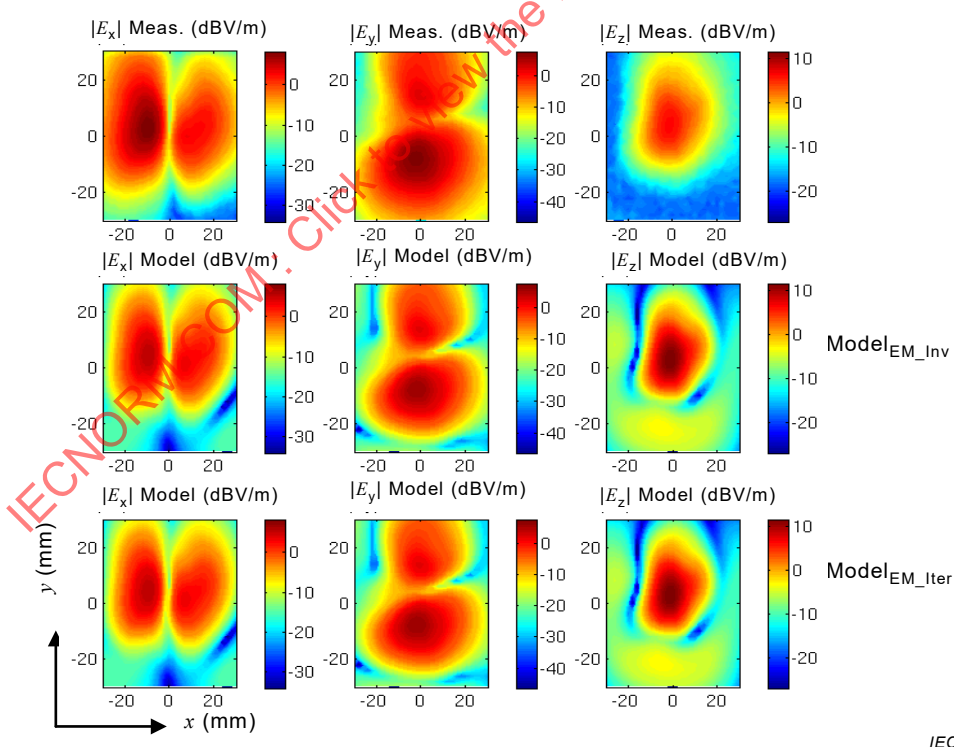


Figure F.10 – Validation of the electric field predicted with $\text{Model}_{\text{EM_Inv}}$ and $\text{Model}_{\text{EM_Iter}}$ on the oscillator at 10 mm height

The simulated total magnetic field (maximum field value) obtained using " $\text{Model}_{\text{EM_Iter}}$ " as a function of height above the oscillator is illustrated in Figure F.11. The total magnetic field is obtained using Equation (F.1).

$$H_t = \sqrt{|H_x|^2 + |H_y|^2 + |H_z|^2} \quad (\text{F.1})$$

Figure F.11 shows that the maximum simulated field corresponds to maximum measured fields at in the near-field region (from 2 mm to 50 cm in this illustration). This validation gives an idea of the precision of the model and its capability to predict the radiated fields at several heights above the IC.

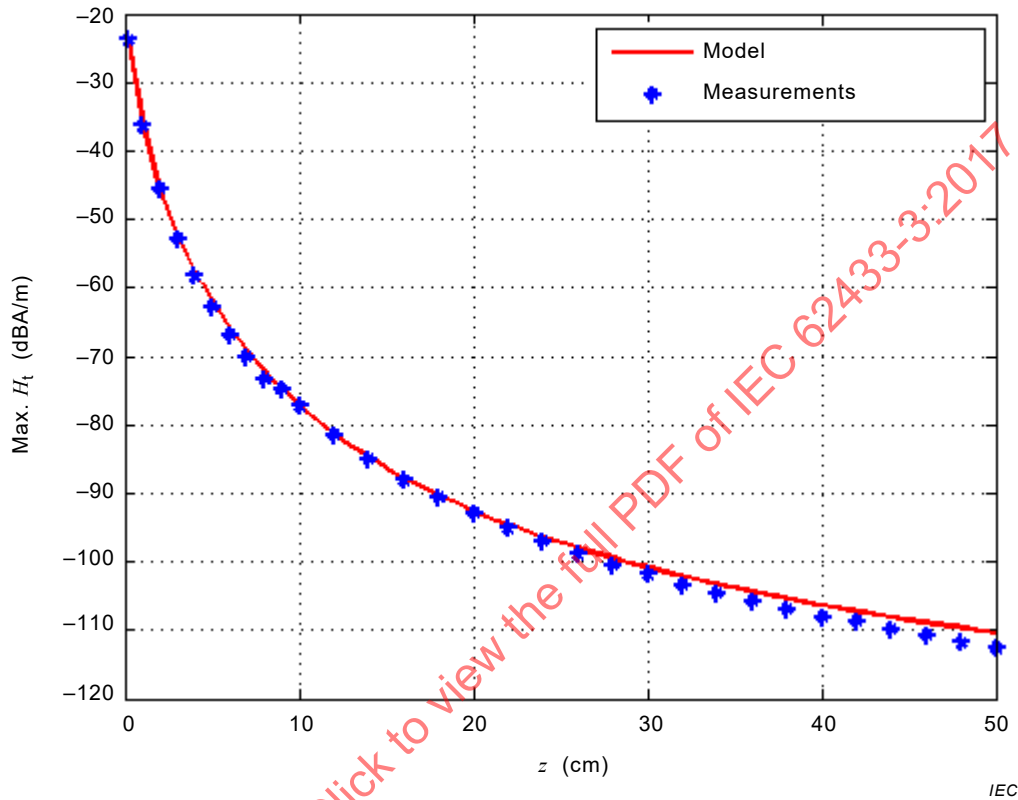


Figure F.11 – Modelled maximum total magnetic field as a function of height (z) above the oscillator compared with measurements

F.4 Example of validation on passive devices

"Model_{Hman}", "Model_H", "Model_{EM Inv}", "Model_{EM Iter}" and "Model_{EM TD}" have been validated on several passive structures such as microstrip (and coupled) transmission lines, microwave couplers, power-dividers, patch antennas printed on PCBs, Inductor coils, microwave filters, etc. [4]-[9]. Table F.1 lists all the validated study cases (passive) and the corresponding frequency (range) in which the model has been validated.

Table F.1 – ICEM-RE model validation on passive structures

Model name	Test cases	Frequency
Model _{Hman}	Twisted cable pair	100 MHz
	Transmission line on PCB	10 MHz – 200 MHz
Model _H	Inductor coil	400 kHz
	Wilkinson power divider	1 GHz
	100 cm microstrip transmission line	100 MHz – 1 GHz
	90 degree 3 dB coupler	1 GHz
	Patch antenna	2,4 GHz
Model _{EM_Inv}	Wilkinson power divider	1 GHz
	Inductor coil	15 MHz
Model _{EM_Iter}	90 degree 3 dB coupler	1 GHz
	Inductor coil	400 kHz
	Wilkinson power divider	1 GHz
	Patch antenna	2,4 GHz and 5,6 GHz
	On-chip antenna	20 GHz and 31,5 GHz
	Transmission line on PCB	1 MHz – 200 MHz
Model _{EMTD}	100 cm microstrip transmission line	100 MHz – 2 GHz (harmonic frequencies)

F.5 Examples of validation on active devices

F.5.1 Extraction from near-field measurements

The manual ICEM-RE model, "Model_{Hman}", has first been validated on a 20 MHz clocked microcontroller used in an automotive application. The magnitude of the normal component of the magnetic field at 80 MHz at 3 mm above the IC mounted on an IEC 61967-1 standard PCB was measured. The modelling methodology has been validated on several other automotive microcontroller applications (one example is demonstrated in F.2) for predicting the fields radiated by the IC at several heights above the PCB. The models have been principally used to optimise IC placement and orientation on a PCB. Moreover, the prediction of coupling phenomena of fields on to PCB tracks, connectors and harness has helped to optimise EMC performance at system level with acceptable precision (around 6 dB) [2], [3].

"Model_H", "Model_{EM_Inv}" and "Model_{EM_Iter}" have been validated on the microcontroller used in a modem application as explained in F.2 at 28 MHz and on the oscillator circuit presented in F.3 at 40 MHz [4]-[9]. "Model_{EM_Iter}" has been validated on a several automotive applications such as LED driver boards, microcontroller units, global position system on-chip antennas, on-chip RF modules, etc. All the models have been imported into commercial 3D electromagnetic simulation tools and been validated.

F.5.2 Extraction from ICEM-CE model

ICEM-RE extraction from IEC 62433-2 (ICEM-CE) model has been validated on a commercial automotive 16-bit microcontroller. A specific test board as per IEC 61967-1 to house the microcontroller and all the external components and supplies required for its operation was designed and used in the experimental EMC characterization of the microcontroller. An 8 MHz external quartz is used as the clock source and ICEM-RE model was built for different operating modes: with PLL turned off and turned-on. With PLL on, the IC has been programmed to work at 64 MHz with the bus frequency at 32 MHz. The input/output ports were programmed to operate at 2,27 MHz. Thus, ICEM-RE model has been extracted for all these three configurations in the wide frequency range between 2,27 MHz and 32 MHz [10].

Annex G (informative)

ICEM-RE macro-model usage examples

G.1 General

The ICEM-RE macro-model is used to predict the near-radiated emissions from the IC itself. It also allows the ability to evaluate the coupling with PCB tracks, connectors and cables. Both these issues are covered by ICEM-RE macro-model through numerical simulation.

To predict EMC risks at equipment (or system) level, the following elements need to be additionally imported for 3D simulation

- One or more ICEM-RE model of the ICs' under test
- PCB laminate with stack-up, tracks
- Connector geometry and placement on PCB
- Harness connecting the equipment to external world components such as battery, loads, another equipment, etc.
- Geometry of enclosures

Therefore, typical usages of ICEM-RE model include:

- Prediction of radiated near-field from ICs at several distance above the PCB on which it is placed
- Assessing field strength surrounding electronic components and systems
- Auto-compatibility risk analysis by simulating the effect of emissions on a victim IC (radiated field coupling from IC to IC)
- Optimisation of component placement on PCB depending to avoid field coupling. Applicable for filter components placed close to IC, sensitive RF module placement, connector placement, connector orientation, etc.
- PCB track design to avoid crosstalk induced by coupling of radiated fields on to the PCB
- Predict the field coupled on to harness and estimate the risk of conducted EMI at system level
- Analyse the need for shielding of IC/equipment

Measuring and comparing shielding effectiveness of different enclosures for optimised EMC performance in a wide frequency range

G.2 Methodology for exploiting ICEM-RE macro-model

The generated ICEM-RE macro-model in REML format is intended for importation into 3D electromagnetic tools for exploitation. The imported model can be used for simulating direct radiation from IC placed on a PCB and to predict the coupling phenomena on to nearby ICs, PCB tracks, connectors, metal enclosures etc. as depicted in Figure G.1.

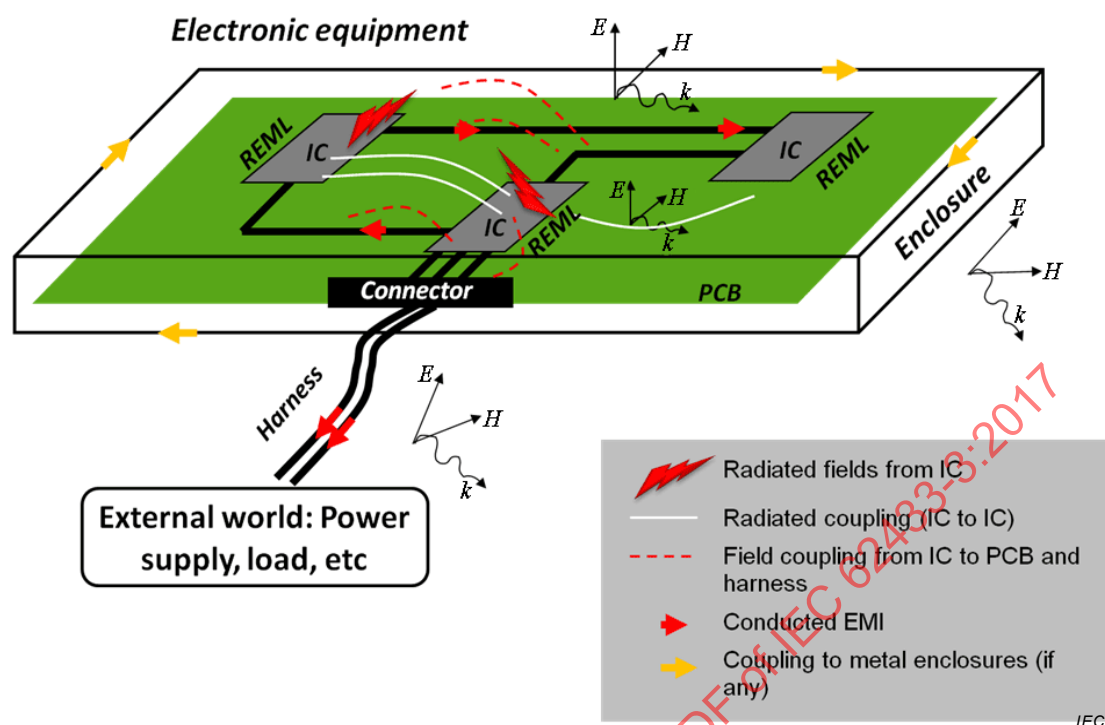


Figure G.1 – Typical EMC issues at equipment and system level covered by ICEM-RE

Bibliography

- [1] ISO 8879, *Information processing – Text and office systems – Standard Generalized Markup Language (SGML)*, October 1986
- [2] F. De-Daran, J. Chollet-Ricard, F. Lafon, and O. Maurice, Prediction of the field radiated at one meter from PCB's and microprocessors from near EM field cartography, IEEE Symp. on EMC, pp. 479-482, Istanbul, Turkey, May 2003
- [3] F. De-Daran, F. Lafon, and O. Maurice, "Prediction of the Field Radiated at One Meter from PCB's and Microprocessors from Near EM Field Cartography", in Proc. ICONIC 2003, France, June 2003
- [4] Y. Vives, C. Arcambal, A. Louis, F. De-Daran, P. Eudeline, and B. Mazari, Modeling magnetic radiations of electronic circuits using near-field scanning method, IEEE Trans. on EMC, vol. 49, no. 2, pp. 391-400, May 2007
- [5] Y. Vives, C. Arcambal, A. Louis, F. De-Daran, P. Eudeline, and B. Mazari, Modeling magnetic emissions combining image processing and an optimization algorithm, IEEE Trans. on EMC, vol. 51, no. 4, pp. 909-918, November 2009
- [6] A. Ramanujan, Z. Riah, A. Louis, and B. Mazari, "Modeling the electromagnetic radiations of passive microwave components using a near-field scanning method", IEEE Trans. on EMC, Vol. 52, No. 4, November 2010
- [7] A. Ramanujan, Z. Riah, A. Louis, and B. Mazari, "Computational Optimizations Towards an Accurate and Rapid Electromagnetic Emission Modeling", Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 27, 2011
- [8] A. Ramanujan, Z. Riah, and A. Louis, "Modeling the time-harmonic electromagnetic emissions of microwave circuits", IEEE Trans. on EMC, Vol. 54, No. 2, April 2012
- [9] P. Fernandez Lopez, C. Arcambal, D. Baudry, S. Verdeyme, and B. Mazari, "Simple electromagnetic modeling procedure: from near-field measurements to commercial electromagnetic simulation tool", IEEE Trans. Instr. Meas., vol. 59, no. 12, pp. 3111 – 3121, December 2010
- [10] C. Labussière-Dorgan, S. Bendhia, E. Sicard, J. Tao, H.J. Quaresma, C. Lochot, and B. Vrignon, "Modeling the electromagnetic emission of a microcontroller using a single model", IEEE Trans. on EMC, vol. 50, pp. 22-34, February 2008
- [11] A. Boyer, E. Sicard, and J.L. Levant, On the prediction of near-field microcontroller emission, 5th International EMC Compo 05 (EMC Compo 05), pp. 216-220, Munich, Germany, November 2005

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62433-3:2017

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	95
1 Domaine d'application	97
2 Références normatives	97
3 Termes, définitions, abréviations et conventions	98
3.1 Termes et définitions	98
3.2 Abréviations	99
3.3 Conventions	100
4 Philosophie	100
5 Description du macromodèle ICEM-RE	100
5.1 Généralités	100
5.2 Description du PDN	102
5.3 Description d'IA	105
5.4 Calcul et simulation du champ électromagnétique	105
6 Format REML	106
6.1 Généralités	106
6.2 Structure REML	107
6.3 Mots-clés globaux	108
6.4 Section <i>Header</i> (en-tête)	108
6.5 Définition de la fréquence	109
6.6 Définition du système de coordonnées	110
6.7 Définition de la référence	110
6.8 Section <i>Validity</i> (validité)	111
6.8.1 Généralités	111
6.8.2 Définitions d'attributs	111
6.9 PDN	113
6.9.1 Généralités	113
6.9.2 Définitions d'attributs	114
6.9.3 PDN d'un ICEM-RE à une seule fréquence	116
6.9.4 PDN d'un ICEM-RE à plusieurs fréquences	119
6.10 IA	121
6.10.1 Généralités	121
6.10.2 Définitions d'attributs	122
6.10.3 IA d'un ICEM-RE à une seule fréquence	124
6.10.4 IA d'un ICEM-RE à plusieurs fréquences	127
7 Extraction	128
7.1 Généralités	128
7.2 Contraintes d'extraction liées à l'environnement	129
7.3 Obtention de paramètres de modèles à partir de données de champ proche	129
7.3.1 Généralités	129
7.3.2 PDN	130
7.3.3 IA	133
7.4 Extraction basée sur une simulation ICEM-CE	135
7.4.1 Généralités	135
7.4.2 PDN	135
7.4.3 IA	136
8 Validation	136

Annexe A (normative) Définitions préliminaires pour la représentation XML	138
A.1 Notions fondamentales du langage XML	138
A.1.1 Déclaration XML	138
A.1.2 Eléments de base	138
A.1.3 Elément racine	138
A.1.4 Commentaires	139
A.1.5 Terminaisons de ligne	139
A.1.6 Hiérarchie des éléments	139
A.1.7 Attributs d'éléments	139
A.2 Exigences relatives aux mots-clés	139
A.2.1 Généralités	139
A.2.2 Caractères des mots-clés	140
A.2.3 Syntaxe des mots-clés	140
A.2.4 Structure d'un fichier	140
A.2.5 Valeurs	143
Annexe B (informative) Champs électromagnétiques rayonnés par un dipôle électrique et magnétique élémentaire	145
B.1 Dipôle électrique	145
B.2 Dipôle magnétique	147
Annexe C (informative) Exemples de fichiers	150
C.1 Fichier ICEM-RE minimal par défaut	150
C.2 Exemple de microcontrôleur au format REML	151
Annexe D (normative) Mots-clés REML valides et usage	153
D.1 Mots-clés de l'élément racine (Root)	153
D.2 Mots-clés d'en-tête (Header) de fichier	154
D.3 Mots-clés de la section validité (Validity)	155
D.4 Mots-clés globaux	155
D.5 Mots-clés de la section réseau de distribution passif (Pdn)	156
D.6 Mots-clés de la section activité interne (IA)	157
Annexe E (informative) Méthodes d'extraction de modèle ICEM-RE	159
E.1 Généralités	159
E.2 Méthodes de modélisation d'ICEM-RE	159
E.2.1 ModelHman	159
E.2.2 ModelH	159
E.2.3 ModelEM_Inv	161
E.2.4 ModelEM_Iter	162
E.2.5 ModelEM_TD	162
E.2.6 Guide de sélection de modèles	163
E.3 Environnement de modélisation ICEM-RE à partir de données de champ proche	164
E.3.1 Généralités	164
E.3.2 Etapes de conception d'une modélisation	164
E.3.3 Importation d'un modèle ICEM-RE dans des outils de simulation électromagnétique en trois dimensions	166
E.4 Modélisation d'ICEM-RE à partir d'un modèle ICEM-CE	167
Annexe F (informative) Exemples de validations de modèles ICEM-RE	170
F.1 Généralités	170
F.2 Validation sur un microcontrôleur	170
F.2.1 Généralités	170

F.2.2	Détails du microcontrôleur	170
F.2.3	Cas 1: choix du modèle manuel Model _{Hman}	170
F.2.4	Cas 2: choix d'un modèle automatique de champ magnétique	171
F.3	Validation du circuit d'un oscillateur	173
F.4	Exemple de validation sur des dispositifs passifs	176
F.5	Exemple de validation sur des dispositifs actifs.....	177
F.5.1	Extraction à partir de mesure en champ proche	177
F.5.2	Extraction à partir du modèle ICEM-CE	178
Annexe G (informative)	Exemples d'utilisation du macromodèle ICEM-RE	179
G.1	Généralités	179
G.2	Méthodologie d'exploitation d'un macromodèle ICEM-RE	179
Bibliographie		181
Figure 1	– Structure générale de modèle ICEM-RE	101
Figure 2	– Représentation géométrique du PDN d'un ICEM-RE	102
Figure 3	– Représentation d'un dipôle élémentaire du PDN d'un ICEM-RE.....	102
Figure 4	– Boucle de courant élémentaire de rayon "a" en 3D	103
Figure 5	– Principe de dualité entre boucle de courant et dipôle magnétique	103
Figure 6	– Exemple de points de référence pour décrire la géométrie	104
Figure 7	– Définition d'un PDN à trois fréquences différentes.....	105
Figure 8	– Hiérarchie des éléments du modèle du REML	107
Figure 9	– Format pour définir des données de vecteur de PDN dans un fichier externe	118
Figure 10	– Format pour définir des données de vecteur d'IA dans un fichier externe	126
Figure 11	– Mesure de champ électromagnétique	129
Figure 12	– Champ B_z en nT mesuré à 3 mm au-dessus d'un microprocesseur à 80 MHz	130
Figure 13	– Exemple de champ électromagnétique émis par une ligne de courant élémentaire.....	131
Figure 14	– Mappage manuel du courant	131
Figure 15	– Représentation de modèle avec N dipôles détectés automatiquement.....	132
Figure 16	– Comparaison entre les champs électromagnétiques modélisés et mesurés à 2 mm au-dessus d'un oscillateur	134
Figure 17	– PDN d'ICEM-CE simple représentant le boîtier et l'impédance interne du réseau entre les lignes d'alimentation	135
Figure 18	– Reconstruction de la géométrie du modèle de boîtier (PDN d'ICEM-RE) à partir d'un modèle IBIS et du modèle électrique (PDN d'ICEM-CE)	136
Figure 19	– Représentation graphique de l'exemple de procédure de validation.....	137
Figure A.1	– Fichiers XML multiples.....	141
Figure A.2	– Fichiers XML avec des fichiers de données (*.dat).....	142
Figure A.3	– Fichiers XML avec des fichiers supplémentaires	142
Figure B.1	– Ligne de courant élémentaire dans l'espace.....	145
Figure B.2	– Dipôle magnétique élémentaire dans l'espace.....	147
Figure C.1	– Représentation du microcontrôleur utilisé	151
Figure C.2	– Fichier de données représentant les informations du PDN du microcontrôleur.....	152

Figure C.3 – Fichier de données représentant les informations de l'IA du microcontrôleur	152
Figure E.1 – Réseau de dipôles électriques définis manuellement dans $Model_{Hman}$	159
Figure E.2 – Réseau de dipôles électriques et magnétiques dans le $Model_{EM_Inv}$	161
Figure E.3 – Exemple d'environnement de modélisation ICEM-RE	164
Figure E.4 – Etapes de conception d'une modélisation d'ICEM-RE	166
Figure E.5 – Exemple de PDN et d'IA d'ICEM-RE importés dans un outil de simulation en trois dimensions	167
Figure E.6 – Etapes de conception pour obtenir un modèle ICEM-RE à partir d'un modèle ICEM-CE	168
Figure F.1 – Circuit de microcontrôleur utilisé pour la validation du modèle	170
Figure F.2 – Dipôles définis manuellement représentant le PDN du microcontrôleur	171
Figure F.3 – Comparaison entre les champs modélisés et mesurés à 4 mm au-dessus du microcontrôleur en utilisant $Model_{Hman}$	171
Figure F.4 – Validation du modèle $Model_H$ sur le microcontrôleur	172
Figure F.5 – Détection de dipôles représentant le microcontrôleur en utilisant le modèle $Model_{EM_Iter}$	172
Figure F.6 – Validation du modèle $Model_{EM_Iter}$ sur le microcontrôleur	173
Figure F.7 – Circuit d'oscillateur utilisé pour la validation du modèle	173
Figure F.8 – Schéma de l'oscillateur utilisé pour la validation	174
Figure F.9 – Validation du champ magnétique prédit avec les modèles $Model_{EM_Inv}$ et $Model_{EM_Iter}$ sur l'oscillateur à 10 mm	175
Figure F.10 – Validation du champ électrique prédit avec les modèles $Model_{EM_Inv}$ et $Model_{EM_Iter}$ sur l'oscillateur à 10 mm	175
Figure F.11 – Comparaison entre le modèle et les mesures du champ magnétique total maximal en fonction de la hauteur (z) au-dessus de l'oscillateur	176
Figure G.1 – Problèmes typiques de compatibilité électromagnétique au niveau d'un équipement ou d'un système couverts par le modèle ICEM-RE	180
Tableau 1 – Format de PDN	104
Tableau 2 – Définition de la section <i>Validity</i>	111
Tableau 3 – Définition de la section <i>Submodel</i> de l'élément <i>Pdn</i>	114
Tableau 4 – Définition du mot-clé <i>Vector</i> pour la section <i>Pdn</i>	115
Tableau 5 – Champs valides du mot-clé <i>Submodel</i> pour un PDN à une seule fréquence	116
Tableau 6 – Conditions pour une annotation correcte d'un PDN à une seule fréquence par l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées	116
Tableau 7 – Champs valides du mot-clé <i>Vector</i> pour un PDN à une seule fréquence	117
Tableau 8 – Extensions de fichiers valides dans la section <i>Pdn</i>	119
Tableau 9 – Conditions pour une annotation correcte d'un PDN à une plusieurs fréquences par l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées	120
Tableau 10 – Définition de la section <i>Submodel</i> de l'élément <i>la</i>	122
Tableau 11 – Définition du mot-clé <i>Vector</i> pour la section <i>Pdn</i>	123
Tableau 12 – Champs valides du mot-clé <i>Submodel</i> pour une IA à une seule fréquence	124
Tableau 13 – Conditions pour une annotation correcte d'une IA à une seule fréquence par l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées	124
Tableau 14 – Champs valides du mot-clé <i>Vector</i> pour une IA à une seule fréquence	125
Tableau 15 – Extensions de fichiers acceptées dans la section <i>la</i>	126

Tableau 16 – Conditions pour une annotation correcte d'une IA à plusieurs fréquences par l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées	127
Tableau A.1 – Unités logarithmiques valides.....	144
Tableau E.1 – Guide de sélection de modèles ICEM-RE	163
Tableau F.1 – Validation de modèles ICEM-RE sur des structures passives	177

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62433-3:2017

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MODÈLES DE CIRCUITS INTÉGRÉS POUR LA CEM –

**Partie 3: Modèles de circuits intégrés pour la simulation
du comportement lors de perturbations électromagnétiques –
Modélisation des émissions rayonnées (ICEM-RE)**

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC 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, l'IEC – 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 l'IEC"). 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 l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC 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 l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC 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 l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, 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 l'IEC, 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 l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, 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 l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 62433-3 a été établie par le sous-comité 47A: Circuits intégrés, du Comité d'étude 47 de l'IEC: Dispositifs à semiconducteurs.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
47A/1000/FDIS	47A/1008/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/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 62433, publiées sous le titre général *Modèles de circuits intégrés pour la CEM*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC 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.

IMPORTANT – Le logo "*colour inside*" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62433-3:2017

MODÈLES DE CIRCUITS INTÉGRÉS POUR LA CEM –

Partie 3: Modèles de circuits intégrés pour la simulation du comportement lors de perturbations électromagnétiques – Modélisation des émissions rayonnées (ICEM-RE)

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62433 présente une méthode pour déterminer un macromodèle permettant de simuler les niveaux d'émissions rayonnées d'un circuit intégré. Ce modèle est habituellement appelé: modèle des émissions de circuits intégrés – Emissions rayonnées (ICEM-RE: Integrated Circuit Emission Model – Radiated Emission). Le modèle est destiné à être utilisé pour modéliser un circuit intégré complet, avec ou sans son boîtier, un bloc fonctionnel et un bloc à propriété intellectuelle (IP) de circuits intégrés analogiques et numériques (broches d'entrée/sortie, cœur numérique et alimentation), lorsque les données mesurées ou simulées ne peuvent pas être importées directement dans des outils de simulation.

Le macromodèle de circuit intégré proposé sera inséré dans des outils de simulation électromagnétique en trois dimensions afin de:

- prédire les émissions rayonnées en champ proche par le circuit intégré
- évaluer l'effet des émissions rayonnées sur les circuits intégrés, les câbles, les lignes de transmissions, etc., situés à proximité

La présente partie de l'IEC 62433 comporte deux parties principales:

- la première partie décrit les éléments électriques du macromodèle ICEM-RE,
- la deuxième partie présente un format d'échange de données universel appelé REML basé sur le format XML. Ce format permet de coder le macromodèle ICEM-RE pour obtenir une forme générique plus simple à utiliser pour simuler les émissions.

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences 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).

IEC TS 62433-1, *Modèles de circuits intégrés pour la CEM – Partie 1: Cadre de modèle général*

IEC 62433-2, *Modèles de circuits intégrés pour la CEM – Partie 2: Modèles de circuits intégrés pour la simulation du comportement lors de perturbations électromagnétiques – Modélisation des émissions conduites (ICEM-CE)*

IEC 61967-1, *Circuits intégrés – Mesure des émissions électromagnétiques, 150 kHz à 1 GHz – Partie 1: Conditions générales et définitions*

IEC TS 61967-3, *Circuits intégrés – Mesure des émissions électromagnétiques – Partie 3: Mesure des émissions rayonnées – Méthode de balayage en surface*

ANSI INCITS 4:1986, *Information Systems – Coded Character Sets – 7-Bit American National Standard Code for Information Interchange (7-Bit ASCII)* (disponible en anglais seulement)

3 Termes, définitions, abréviations et conventions

3.1 Termes et définitions

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

3.1.1

dipôle électrique

élément linéaire ou fil de longueur toujours fixe transportant un courant

3.1.2

boucle de courant

élément fermé ou fil de rayon toujours fixe transportant un courant

3.1.3

dipôle magnétique

élément linéaire ou fil de longueur toujours fixe transportant un "courant magnétique"

Note 1 à l'article: Un dipôle magnétique est une source magnétique équivalente à un dipôle électrique utilisé pour les formules mathématiques. Cette grandeur est purement mathématique et n'a pas de réalité physique.

Note 2 à l'article: Ce terme est utilisé de manière abstraite pour expliquer le mouvement des charges magnétiques créant des courants magnétiques, comparé à la grandeur duale de mouvement de charges électriques créant des courants électriques.

3.1.4

PDN

réseau de distribution passif

composant d'un modèle de circuit intégré qui représente la base géométrique dans laquelle se trouvent des sources de rayonnement équivalentes.

Note 1 à l'article: L'abréviation «PDN» est dérivée du terme anglais développé correspondant «Passive Distribution Network».

3.1.5

IA

activité interne

composant d'un modèle de circuit intégré représenté par une source de courant ou de tension provenant de l'activité des dispositifs actifs dans un circuit intégré ou dans une partie du circuit intégré

Note 1 à l'article: Dans la présente partie de l'IEC 62433, une source de courant est couramment utilisée pour exciter les éléments du PDN.

Note 2 à l'article: L'abréviation «IA» est dérivée du terme anglais développé correspondant «Internal Activity».

[SOURCE: IEC TS 62433-1:2011, 3.3, modifiée – Ajout de la note 1 à l'article]

3.1.6

model_{Hman}

modèle d'émissions magnétiques rayonnées avec des sources manuelles

3.1.7

model_H

modèle d'émissions magnétiques rayonnées avec détection automatique des sources

3.1.8**model_{EM Inv}**

modèle d'émissions électriques et magnétiques rayonnées basé sur une détection automatique des sources, utilisant la méthode de la matrice inverse pour résoudre les problèmes

3.1.9**model_{EM Iter}**

modèle d'émissions électriques et magnétiques rayonnées basé sur une détection automatique des sources, utilisant une méthode itérative pour résoudre les problèmes

3.1.10**model_{EMTD}**

modèle d'émissions électriques et magnétiques rayonnées avec des harmoniques temporelles basé sur une détection automatique des sources, utilisant une méthode itérative pour résoudre les problèmes

3.1.11**section**

élément XML situé un niveau en dessous de l'élément racine ou à l'intérieur d'une autre section. Une section contient un ou plusieurs éléments XML, mais pas de valeur

[SOURCE: IEC 62433-4:—, 3.1.1]

3.1.12**parent**

mot-clé situé un niveau au-dessus d'un autre mot-clé

[SOURCE: IEC 62433-4:—, 3.1.2]

3.1.13**child**

mot-clé situé un niveau en dessous d'un autre mot-clé

[SOURCE: IEC 62433-4:—, 3.1.3]

3.1.14**analyseur syntaxique**

outil réalisant l'analyse syntaxique de données codées dans un format spécifié

[SOURCE: IEC 62433-4:—, 3.1.6]

3.1.15**langage de balisage pour émissions rayonnées****REML**

langage d'échange de données pour le macromodèle ICEM-RE

Note 1 à l'article: L'abréviation «REML» est dérivée du terme anglais développé correspondant «Radiated Emissions Markup Language».

3.2 Abréviations

REM	Radiated Emission Model (modèle des émissions rayonnées)
XML	eXtensible Markup Language (langage de balisage extensible)

3.3 Conventions

Dans un souci de clarté, à quelques exceptions près, les conventions d'écriture du langage XML ont été utilisées dans le texte et les tableaux.

Dans le reste du texte, le symbole " μ " est utilisé pour représenter "micro" = $1e-6$. Dans les parties en langage XML, le symbole "u" est utilisé pour représenter "micro" = $1e-6$.

4 Philosophie

Dans chaque nouvelle génération de circuit intégré, la densité d'intégration et les capacités fonctionnelles sont de plus en plus complexes et variées dans un facteur de forme réduit. Les circuits intégrés sont également plus rapides et fonctionnent avec des tensions d'alimentation plus faibles. Les circuits intégrés modernes peuvent contenir des étages avec des fréquences radioélectriques coexistant avec des cœurs logiques numériques ou analogiques. Les circuits imprimés (PCB: Printed Circuit Board) sur lesquels sont installés ces circuits intégrés sont, eux aussi, plus denses. Les émissions d'un circuit intégré peuvent se coupler aux composants situés au voisinage (par exemple des circuits intégrés, des composants passifs, des pistes, etc.) et perturber les performances ou même provoquer une défaillance du système. En conséquence, les émissions de circuits intégrés sont de plus en plus critiques.

En raison de cette augmentation des risques liés aux émissions rayonnées par les circuits intégrés, il est indispensable d'utiliser des outils de simulation pour évaluer le comportement des émissions de chaque module pendant la conception des circuits intégrés. Il est donc nécessaire de définir des modèles précis d'émissions électromagnétiques rayonnées afin de prédire le comportement des émissions rayonnées par les circuits intégrés et leurs effets sur les circuits voisins (couplage avec les pistes des circuits imprimés, les connecteurs, etc.). Sinon, il n'est pas possible d'évaluer avec précision les risques d'émission au niveau d'une carte.

Différentes techniques permettent l'intégration de sources de rayonnement équivalentes de circuits intégrés dans des analyseurs électromagnétiques en trois dimensions. La présente partie de l'IEC 62433 identifie et spécifie un macromodèle générique interchangeable et validé pour simuler le comportement des émissions rayonnées au niveau d'un circuit intégré. Pour les circuits intégrés possédant plusieurs modes de fonctionnement, fonctionnalités, logiques programmables et conditions de fonctionnement, chaque mode de fonctionnement donnerait un profil d'émission complètement différent. En conséquence, les macromodèles ICEM-RE sont valides uniquement pour les conditions dans lesquelles ils ont été établis. Les modèles seront utilisés pour prédire les émissions électromagnétiques rayonnées au niveau de l'application.

Les données du macromodèle ICEM-RE sont arrangées de manière imbriquée et déchiffrable. Elles sont au format XML. Ce format d'échange, appelé langage de balisage pour émissions rayonnées (REML), a pour objectif de créer un accès universel simple et pratique pour le macromodèle ICEM-RE. Les définitions préliminaires pour la représentation au format XML sont données à l'Annexe A.

5 Description du macromodèle ICEM-RE

5.1 Généralités

La structure interne d'un circuit intégré peut être divisée en deux parties:

- Une partie passive (résistance (R), inductance (L) et capacité (C) parasites des pistes, composants de protection contre les décharges (ESD), broches et liaisons) qui connecte l'environnement externe aux blocs internes des circuits intégrés.

- Une partie active (cœur d'unité centrale de traitement (CPU), système d'horloge, mémoire, blocs analogiques). Ce sont ces blocs actifs internes qui sont les sources d'émissions dans un circuit intégré.

Le macromodèle ICEM-RE est constitué d'un ensemble de données décrivant ces deux parties:

- PDN: le réseau de distribution passif (PDN) représente la base géométrique dans laquelle des sources de rayonnement équivalentes seraient positionnées. Il contient les coordonnées géométriques du modèle.
- IA: l'activité interne (IA) représente la source d'excitation des éléments rayonnants du PDN. Elle contient l'amplitude et la phase du courant électrique du modèle.

La Figure 1 présente une structure générale de macromodèle ICEM-RE.

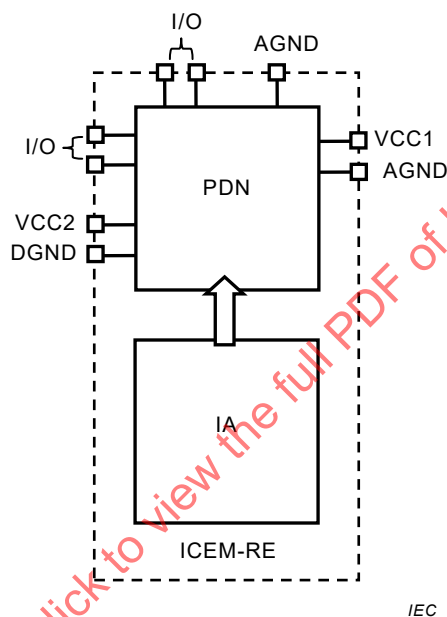


Figure 1 – Structure générale de modèle ICEM-RE

Il y a un lien direct entre le bloc PDN et le bloc IA. Le PDN représente un ensemble de sources de rayonnement équivalentes telles que des dipôles électriques ou des boucles de courant électrique qui servent de base géométrique à l'IA. Les coordonnées de la source sont définies par rapport à un point de l'espace appelé point de référence. Le point de référence est présenté en détail en 5.2.

L'IA représente le courant circulant dans chacun des éléments rayonnants équivalents du PDN. La valeur du courant est une valeur complexe. En effet le courant traversant un dipôle ou une boucle est représenté par son amplitude et sa phase. La phase est donnée par rapport à la phase du champ électromagnétique au point de référence. Par définition, chaque élément d'un PDN a une IA spécifique et les coordonnées du PDN et les phases des IA sont données par rapport au point de référence.

Le macromodèle ICEM-RE est généralement défini dans le domaine fréquentiel. Sa validité n'est pas limitée en fréquence. C'est-à-dire qu'une structure ICEM-RE est valide sur toute plage de fréquences. Toutefois, en fonction des données utilisées pour l'extraction du modèle, la limite de validité du modèle est définie par les données d'entrée utilisées pour extraire le modèle. En outre, le modèle est défini uniquement dans les conditions dans lesquelles il a été extrait: conditions de fonctionnement des circuits intégrés, fonctions activées, composants externes (condensateurs de découplage, oscillateurs externes, etc.) nécessaires au fonctionnement des circuits intégrés, etc. Tout écart par rapport aux conditions spécifiées

peut nécessiter une modification du modèle (nouvelle extraction du modèle). L'intégration des écarts ne fait pas partie de la présente édition.

5.2 Description du PDN

Le PDN est constitué d'éléments passifs représentant les boîtiers, les liaisons et les interconnexions sur la puce. Ces éléments se comportent comme des antennes rayonnantes lorsque des signaux (courants) à haute fréquence et des signaux transitoires les traversent. Le bloc PDN du macromodèle ICEM-RE peut être décrit en utilisant un ensemble de sources de rayonnement équivalentes telles que des dipôles électriques ou des boucles magnétiques, représentant les différents éléments (boîtiers, liaisons et interconnexions) comme représenté à la Figure 2.

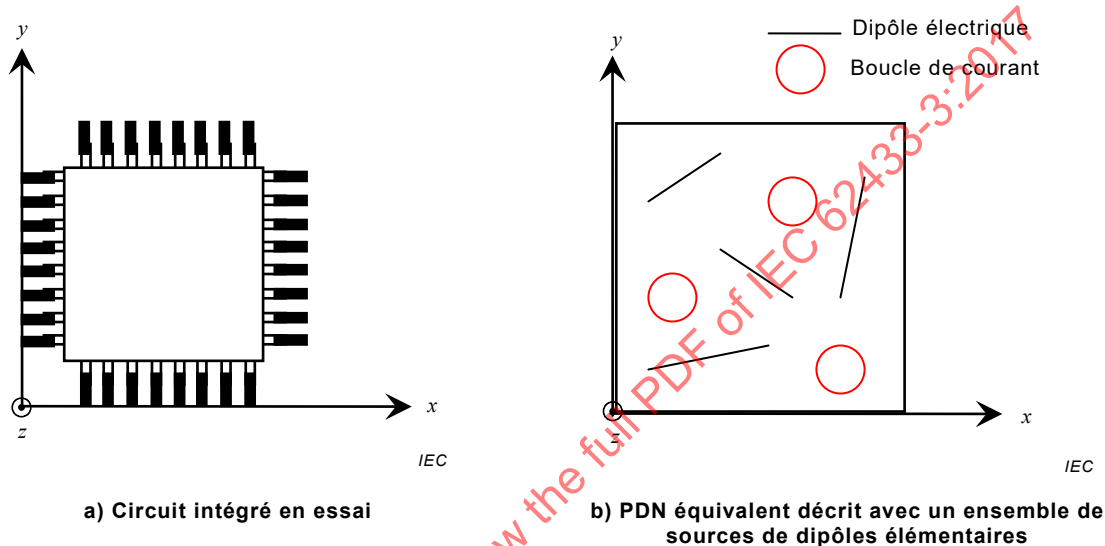


Figure 2 – Représentation géométrique du PDN d'un ICEM-RE

Les dimensions géométriques des sources équivalentes doivent être petites par rapport à la longueur d'onde (normalement inférieures à un dixième de la longueur d'onde).

La Figure 3 représente un dipôle électrique élémentaire en trois dimensions représentant le PDN.

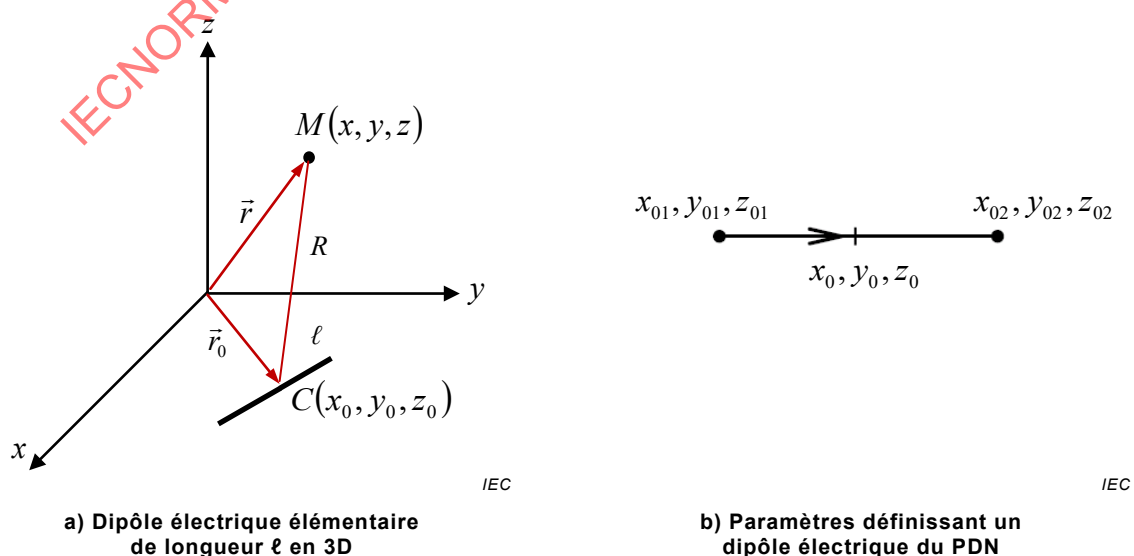


Figure 3 – Représentation d'un dipôle élémentaire du PDN d'un ICEM-RE

La Figure 4 représente une boucle de courant élémentaire, semblable à un dipôle électrique.

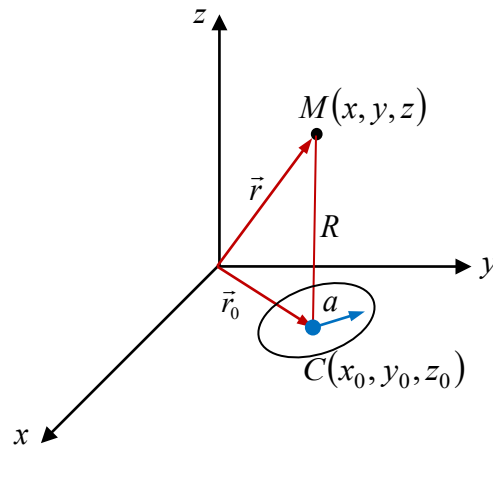


Figure 4 – Boucle de courant élémentaire de rayon "a" en 3D

Pour simplifier la représentation de la boucle de courant et la rendre très similaire à un dipôle électrique, le principe de dualité entre une boucle de courant et un dipôle magnétique est utilisé. Une boucle de courant, transportant un courant électrique, peut être représentée en utilisant sa "source magnétique" équivalente, appelée dipôle magnétique, comme indiqué à la Figure 5. Le dipôle magnétique est orienté de telle sorte que le vecteur est "normal" à la boucle de courant.

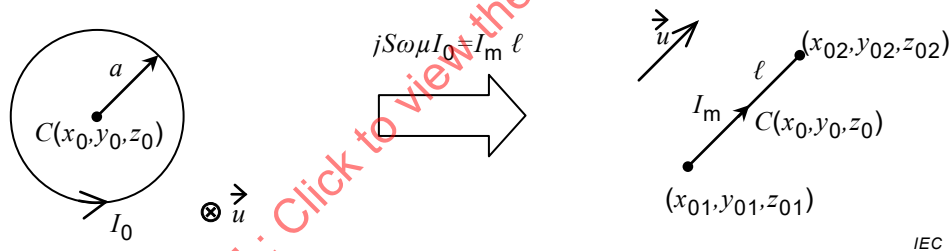


Figure 5 – Principe de dualité entre boucle de courant et dipôle magnétique

Sur la Figure 5, S est la surface de la boucle de courant ($S = \pi a^2$), μ est la perméabilité du milieu dans lequel la boucle de courant est placée, ω est la fréquence angulaire, I_0 est le courant électrique traversant la boucle de courant, I_m est le courant magnétique dual traversant le dipôle magnétique et ℓ est la longueur du dipôle magnétique dual.

Cette dualité permet de représenter la boucle en utilisant des paramètres très similaires à ceux d'un dipôle électrique, comme le montre la Figure 3 (b), puisqu'ils partagent la même topologie.

NOTE Cette dualité sert uniquement de guide pour établir des formules mathématiques et trouver leurs solutions. Elle est utilisée de manière abstraite pour expliquer le mouvement de charges magnétiques qui créent des courants magnétiques, par comparaison avec la grandeur duale des charges électriques en mouvement qui créent des courants électriques. Ces termes (charges magnétiques et courants magnétiques) sont de nature purement mathématique puisqu'il n'existe pas physiquement de charges ni de courants magnétiques.

La définition du PDN doit inclure toutes les informations nécessaires pour mettre en œuvre le modèle pour la simulation. Les principaux éléments suivants doivent généralement être définis:

- La géométrie de la structure de rayonnement équivalente (type de dipôle: électrique ou magnétique)

- La liste des coordonnées des dipôles sous la forme de triplet

Les coordonnées du dipôle sont définies par rapport à un point de référence dans l'espace. Un exemple du point de référence est décrit à la Figure 6.

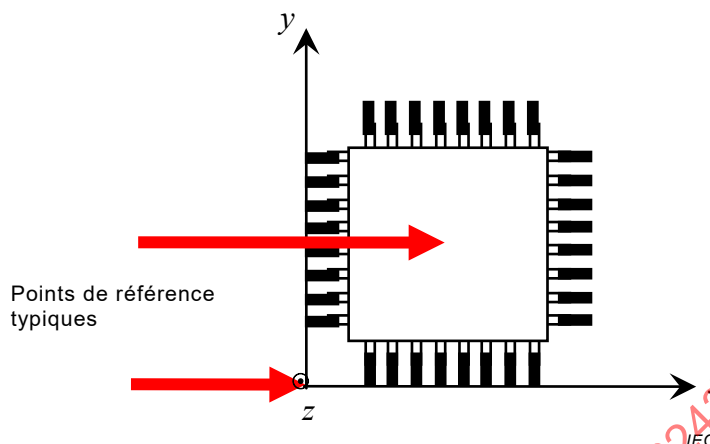


Figure 6 – Exemple de points de référence pour décrire la géométrie

Un point de référence peut être soit une extrémité du circuit intégré en essai, soit le centre du circuit intégré en essai. Des exemples de points de référence sont le coin inférieur gauche ou le centre du circuit intégré (voir Figure 6).

La définition du PDN doit décrire les structures de rayonnement équivalentes dans le domaine fréquentiel avec le type de dipôle utilisé et les coordonnées des dipôles. La définition du PDN pour des dipôles électriques et magnétiques est donnée dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Format de PDN

Format de PDN
Coordonnées de début (x_{01}, y_{01}, z_{01}) et coordonnées de fin (x_{02}, y_{02}, z_{02}) dans le système cartésien
ou
Coordonnées de début ($r_{01}, \varphi_{01}, z_{01}$) et coordonnées de fin ($r_{02}, \varphi_{02}, z_{02}$) dans le système de coordonnées cylindriques
ou
Coordonnées de début ($r_{01}, \theta_{01}, \varphi_{01}$) et coordonnées de fin ($r_{02}, \theta_{02}, \varphi_{02}$) dans le système de coordonnées sphériques

Un ou plusieurs vecteurs (dipôles) peuvent être utilisés pour décrire le circuit intégré en essai pour une fréquence particulière. Pour une fréquence donnée, chaque vecteur doit représenter un dipôle électrique ou un dipôle magnétique. Un vecteur de dipôle électrique ou de dipôle magnétique contient donc deux définitions de paramètres: les coordonnées de début (x_{01}, y_{01}, z_{01}) et les coordonnées de fin (x_{02}, y_{02}, z_{02}) telles que celles proposées dans le Tableau 1. Il est possible de représenter ces coordonnées dans un système de coordonnées cartésiennes (x, y, z), dans un système de coordonnées cylindriques (rayon: r , azimut: φ , hauteur: z) ou dans un système de coordonnées sphériques (rayon: r , site: θ , azimut: φ). Il est possible de représenter plusieurs types de dipôles pour une fréquence donnée comme cela est représenté à la Figure 7.

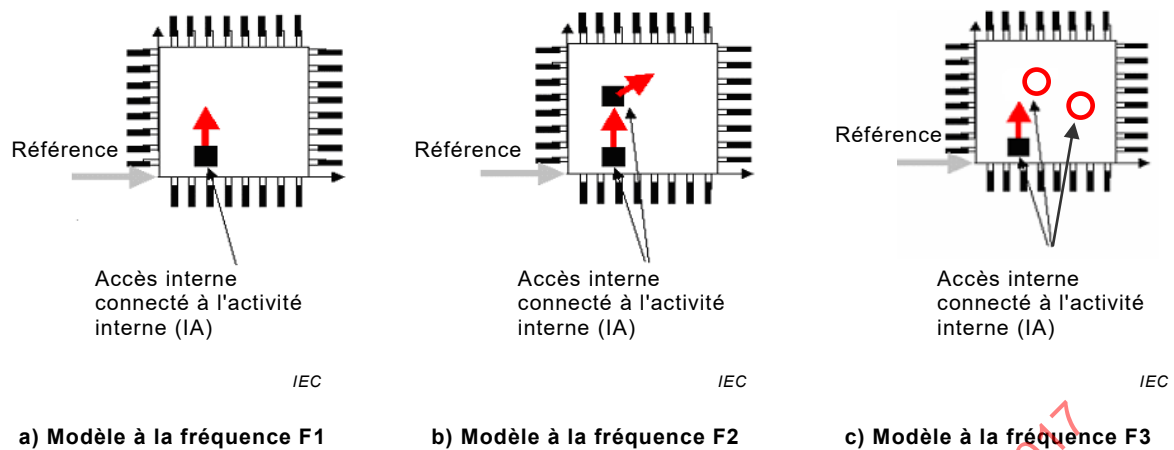


Figure 7 – Définition d'un PDN à trois fréquences différentes

5.3 Description d'IA

Un sous-modèle d'IA est constitué d'une source de courant électrique (I_e) ou d'une source de courant magnétique (I_m), en fonction du PDN choisi pour définir le dispositif. Par hypothèse, le courant dans le dipôle électrique ou magnétique est constant sur toute la longueur du dipôle. La description du sous-modèle est principalement définie dans le domaine fréquentiel. Dans certains cas, la description peut être définie dans le domaine temporel. Dans ce cas, une transformée de Fourier peut être utilisée pour travailler dans le domaine fréquentiel. Une IA sera décrite par son amplitude et sa phase, extraites des mesures ou des simulations à une fréquence particulière. Le point de référence utilisé pour définir le PDN est utilisé comme point de référence pour l'IA. La composante de phase de l'IA est référencée par rapport à la phase des champs électromagnétiques au niveau du point de référence.

5.4 Calcul et simulation du champ électromagnétique

Une fois le PDN et l'IA établis, les expressions des champs électriques et magnétiques rayonnés en un point M par un dipôle électrique, déduits du potentiel du vecteur magnétique $\vec{A}$, sont utilisées pour construire le modèle. Ainsi, les différentes composantes ($p = \{x, y, z\}$) des champs électriques et magnétiques émis par un dipôle électrique peuvent s'exprimer sous la forme:

$$E_{A,p} = f_{1p}(k, x, y, z, x_{01}, y_{01}, z_{01}, x_{02}, y_{02}, z_{02}, I_e, \varepsilon)$$

$$H_{A,p} = g_{1p}(k, x, y, z, x_{01}, y_{01}, z_{01}, x_{02}, y_{02}, z_{02}, I_e)$$

où f_1 et g_1 sont des fonctions des variables suivantes:

- (x, y, z) sont les coordonnées du point M où le champ électromagnétique est évalué
- (x_{01}, y_{01}, z_{01}) sont les coordonnées du point du début du dipôle (vecteur)
- (x_{02}, y_{02}, z_{02}) sont les coordonnées du point de fin du dipôle (vecteur)
- k est le nombre d'ondes ($k = 2\pi/\lambda$, λ est la longueur d'onde)
- I_e est le courant traversant le dipôle électrique, circulant de (x_{01}, y_{01}, z_{01}) à (x_{02}, y_{02}, z_{02})
- ε est la permittivité du milieu dans lequel se trouve le point M

De manière similaire, les différentes composantes ($p = \{x, y, z\}$) des champs électriques et magnétiques émis par un dipôle magnétique sont déduites du potentiel du vecteur électrique $\vec{F}$ et sont calculées de la manière suivante:

$$E_{F,p} = f_{2p}(k, x, y, z, x_{01}, y_{01}, z_{01}, x_{02}, y_{02}, z_{02}, I_m, \varepsilon)$$

$$H_{F,p} = g_{2p}(k, x, y, z, x_{01}, y_{01}, z_{01}, x_{02}, y_{02}, z_{02}, I_m, \mu)$$

où f_2 et g_2 sont des fonctions des variables suivantes:

(x, y, z)	sont les coordonnées du point M où le champ électromagnétique est évalué
(x_{01}, y_{01}, z_{01})	sont les coordonnées du point du début du dipôle (vecteur)
(x_{02}, y_{02}, z_{02})	sont les coordonnées du point de fin du dipôle (vecteur)
k	est le nombre d'ondes ($k = 2\pi/\lambda$, λ est la longueur d'onde)
I_m	est le courant magnétique traversant le dipôle magnétique, circulant de (x_{01}, y_{01}, z_{01}) à (x_{02}, y_{02}, z_{02})
ε	est la permittivité du milieu dans lequel se trouve le point M
μ	est la perméabilité du milieu dans lequel se trouve le point M

Les expressions détaillées des champs émis par un dipôle électrique ou magnétique sont données à l'Annexe B.

6 Format REML

6.1 Généralités

Les données du macromodèle ICEM-RE sont présentées dans un langage appelé "langage de balisage pour émissions rayonnées" (REML) au format XML. Les données du modèle sont divisées en sept parties:

- Un en-tête contenant des informations générales
- Une description des fréquences dans lesquelles le modèle est établi
- Une description du système de coordonnées dans lequel les détails du modèle sont spécifiés
- Une description du point de référence dans le système de coordonnées spécifié
- Une description des critères de validité du macromodèle ICEM-RE
- Une description des données du PDN
- Une description des données de l'IA

Chacune des principales composantes constituant une définition du modèle REML a un type de données spécifique dérivé directement ou indirectement d'un seul type abstrait appelé REMLBase. La hiérarchie des éléments du modèle REML est représentée à la Figure 8.

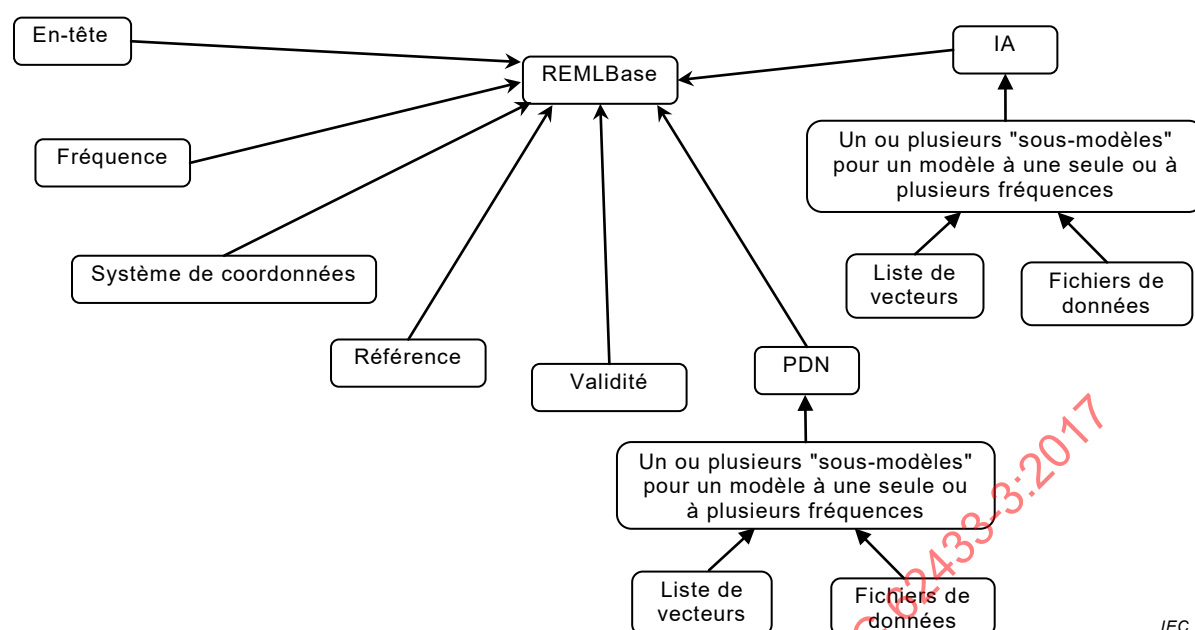


Figure 8 – Hiérarchie des éléments du modèle du REML

Le niveau supérieur de la définition d'un modèle REML est constitué des composantes suivantes:

```

beginning of model definition
  model header definition
  frequency definition
  coordinate system definition
  reference point definition
  model validity definition
  model PDN
model IA
end of model definition
  
```

Ce format d'échange utilise le langage XML 1.0 (quatrième édition) pour structurer les informations. Le langage de balisage extensible (XML) est dérivé du langage normalisé de balisage généralisé (SGML) [1] ¹.

Les règles de codage du langage XML étudiées à l'Annexe A garantissent que le fichier XML (REML) peut être analysé correctement par un analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées (REM). Un exemple de fichier REML, conforme au format de codage XML, est présenté à l'Annexe C. Les mots-clés du langage REML et leurs règles d'utilisation sont présentés en détail à l'Annexe D.

6.2 Structure REML

En tenant compte de toutes les règles définies ci-dessus, et en respectant les exigences relatives aux descriptions de modèles de la norme IEC TS 62433-1, un fichier de macromodèle ICEM-RE typique est représenté ci-dessous:

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<REmodel>
  <!-- HEADER -->
  <Header>
    ...
  
```

¹ Les nombres entre crochets font référence à la Bibliographie.

```

</Header>
<!-- FREQUENCY DEFINITIONS-->
<Frequency>
    ...
</Frequency>
<!-- COORDINATE SYSTEM DEFINITION-->
<Coordinate_system>
    ...
</Coordinate_system>
<!-- REFERENCE POINT DEFINITION-->
<Reference>
    ...
</Reference>
<!-- MODEL VALIDITY DEFINITION-->
<Validity>
    ...
</Validity>
<!-- MODEL PDN DATA -->
<Pdn>
    ...
</Pdn>
<!-- MODEL IA DATA -->
<Ia>
    ...
</Ia>
</REmodel>

```

Le format REML est basé sur une représentation XML. Les règles de codage XML de base de l'Annexe A sont applicables à une structure REML. L'élément racine d'un fichier REML est *REmodel*. Toutes les informations sur le modèle doivent être données sous forme de liste sous l'élément racine.

Les sections *Header*, *Frequency*, *Validity*, *Pdn* et *Ia* sont les informations obligatoires minimales du macromodèle ICEM-RE. Les sections *Coordinate_system* et *Reference* sont facultatives et, lorsqu'elles sont absentes, l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées prendra les valeurs par défaut.

6.3 Mots-clés globaux

Les sections *Documentation*, *Notes* et *Unit* sont des mots-clés globaux qui peuvent être placés n'importe où dans le fichier, sauf à l'intérieur d'un élément contenant une valeur. Voir D.4 pour plus d'informations sur l'utilisation de ces mots-clés.

6.4 Section *Header* (en-tête)

Les lecteurs peuvent s'interroger sur les raisons d'une section *Header* indépendante. Une approche plus simple pour créer les informations de l'en-tête consisterait à les placer directement au niveau le plus élevé, à l'intérieur de <REmodel> ... </REmodel>. Au lieu de cela, les informations sont groupées dans l'élément XML <Header>, pour mieux organiser les composantes et faciliter la lecture des définitions des modèles. Il est donc proposé de définir les informations d'en-tête dans la balise *Header*. Les informations minimales sont le numéro de la version du modèle, le nom de fichier et le numéro de la version du fichier. D'autres informations peuvent être fournies dans le contenu de l'en-tête, de dimension fixée librement, conformément à l'IEC TS 62433-1, par exemple:

- La référence du dispositif en essai (DUT)
- Le nom de l'auteur
- La date
- La méthode de mesure
- Les droits d'auteur
- Les informations de non-responsabilité
- La documentation

EXEMPLE Une section *Header* peut être définie comme suit:

```
<REmodel>
  <Header>
    <Rem_ver>1.0</Rem_ver>
    <Filename>ExampleICEMRE_file.reml</Filename>
    <File_ver>1.0</File_ver>
    <Author>Valeo 1</Author>
    <Dut>Microcontroller 16bit</Dut>
    <Date>August 1, 2013</Date>
    <Meas_method>Near-field scan</Meas_method>
  </Header>
  ...
</REmodel>
```

Une liste détaillée de mots-clés valides dans la section *Header* est présentée à l'Annexe D.

6.5 Définition de la fréquence

Comme indiqué précédemment, le macromodèle ICEM-RE est généralement défini dans le domaine fréquentiel. Les valeurs et les unités des fréquences impliquées dans le modèle sont définies dans les balises *Frequency* et *Unit* respectivement. Une balise *Unit* est un enfant de l'élément *Frequency*.

Au moins une fréquence doit être entrée dans cette section. Dans les cas où une seule fréquence est entrée, il est possible d'utiliser la valeur numérique avec l'unité, comme cela est expliqué en A.2.5.3 (voir exemple 1). Toutefois, l'unité peut être décrite facultativement dans la section *Unit*, comme cela est représenté dans l'exemple 2. Il n'est pas possible de créer une liste des définitions d'unités dans une section *Unit*. Un élément *List* doit être utilisé pour définir plusieurs valeurs de fréquences, comme cela est représenté dans l'exemple 3.

EXEMPLE 1 Exemple de section *Frequency* avec une valeur numérique et une unité.

```
<REmodel>
  ...
  <Frequency>100MHz</Frequency>
  ...
</REmodel>
```

EXEMPLE 2 Exemple de section *Frequency* avec une section *Unit*.

```
<REmodel>
  ...
  <Frequency>
    <Unit>MHz</Unit>
    100
  </Frequency>
  ...
</REmodel>
```

EXEMPLE 3 Exemple de section *Frequency* avec une section *Unit* et une section *List* pour définir plusieurs valeurs de fréquence.

```
<REmodel>
  ...
  <Frequency>
    <Unit>MHz</Unit>
    <List>
      100 200 300 400 500
    </List>
  </Frequency>
  ...
</REmodel>
```

6.6 Définition du système de coordonnées

Le système de coordonnées dans lequel les paramètres du PDN sont définis est spécifié dans cette section. Comme cela est expliqué en 5.2, les paramètres des dipôles du PDN peuvent être exprimés dans le système de coordonnées cartésiennes, dans le système de coordonnées cylindriques ou dans le système de coordonnées sphériques. Ainsi, seules les valeurs suivantes (chaînes) doivent être utilisées pour définir cet attribut.

- "Cartesian": paramètres dans le système de coordonnées cartésiennes (x, y, z)
- "Cylindrical": paramètres dans le système de coordonnées cylindriques (rayon: r , azimuth: φ , hauteur: z)
- "Spherical": paramètres dans le système de coordonnées sphériques (rayon: r , site: θ , azimuth: φ)

Cette section ne possède pas d'éléments enfants.

Cette section est facultative. Lorsqu'elle n'est pas renseignée, la valeur par défaut est "Cartesian", et elle est utilisée dans tout le macromodèle ICEM-RE.

EXEMPLE La syntaxe suivante spécifie l'utilisation du système de coordonnées sphériques.

```
<REmodel>
...
  <Coordinate_system>
    Spherical
  </Coordinate_system>
...
</REmodel>
```

6.7 Définition de la référence

La section *Reference* est utilisée pour représenter le point de référence (coordonnées) des données du PDN et de l'IA. Comme cela est expliqué en 5.2, ces coordonnées sont utilisées comme référence pour les points du vecteur d'un dipôle dans le PDN et la phase des courants traversant les dipôles dans l'IA. Ces coordonnées doivent être spécifiées dans le système de coordonnées défini dans la section *Coordinate_system*. Les coordonnées doivent toujours être définies dans un espace en trois dimensions dans un triplet ordonné d'axes entre parenthèses dont les éléments sont séparés par des virgules et sans espace.

Les unités des coordonnées peuvent être indiquées avec les valeurs de chaque point comme cela est expliqué en A.2.5.3 ou en utilisant le mot-clé global *Unit* (voir 6.3).

Lorsque des coordonnées cylindriques ou sphériques sont utilisées, l'attribut *Unit* est appliqué uniquement au rayon et à la hauteur (système cylindrique). Les unités acceptées sont les mètres ("m") pour le rayon avec les facteurs d'échelle valides décrits en A.2.5.5 et les degrés pour les angles.

Cette section est facultative. Si elle n'est pas renseignée, la valeur par défaut est "(0,0,0)".

EXEMPLE Exemple de section *Reference* dans le système de coordonnées cartésiennes: 10 mm sur l'axe x, 6 mm sur l'axe y et 0 mm sur l'axe z

```
<REmodel>
...
  <Coordinate_system>
    Cartesian
  </Coordinate_system>
  <Reference>
    <Unit>mm</Unit>
    (10,6,0)
  </Reference>
...
```

</REmodel>

6.8 Section *Validity* (validité)

6.8.1 Généralités

La section *Validity* est utilisée pour représenter les conditions dans lesquelles le macromodèle ICEM-RE est défini conformément à l'IEC 62433-1. Cette section est donnée à titre d'information uniquement. Elle est indépendante de toutes les autres sections du fichier REML.

Le Tableau 2 donne une liste des différents mots-clés reconnus de la section *Validity*.

Tableau 2 – Définition de la section *Validity*

Validity
Power_supply: plage d'alimentation présentée sous la forme d'une chaîne (exigée)
Frequency_range: plage de fréquences présentée sous la forme d'une chaîne avec l'unité (exigée)
Temperature_range: plage de températures dans laquelle le modèle est extrait (exigée). A spécifier avec l'unité.

Cette définition n'est pas exhaustive et est laissée ouverte pour que d'éventuelles améliorations et évolutions y soient apportées.

Les documents relatifs au circuit intégré, tels que les fiches techniques, les rapports d'essais, le rapport d'extraction du modèle ICEM-RE, etc., doivent être spécifiés avec le mot-clé global *Documentation* sous la forme d'une chaîne valide qui spécifie le chemin vers les documents correspondants. Plusieurs chemins de fichiers peuvent être présentés les uns après les autres dans une liste. Si aucun n'est renseigné, sa valeur par défaut est "None". Se reporter à D.4 pour plus d'informations sur l'utilisation du mot-clé *Documentation*.

Toutes les autres informations spécifiques relatives à la condition d'essai telles que les fonctions activées, les informations d'horloge, les points de fonctionnement internes, etc., doivent être définies dans la section *Notes* sous la forme d'une chaîne valide. Si aucune n'est renseignée, sa valeur par défaut est "None". Se reporter à D.4 pour plus d'informations sur l'utilisation du mot-clé *Notes*.

Cette section est obligatoire et définie directement dans l'élément racine *REmodel*.

EXEMPLE Exemple de section *Validity*:

```
<REmodel>
...
  <Validity>
    <Power_supply>9V</Power_supply>
    <Frequency_range>40MHz</Frequency_range>
    <Temperature_range>25Celsius</Temperature_range>
    <Notes>Quartz=20MHz, Iin=10mA, PLL unused</Notes>
  </Validity>
...
</REmodel>
```

6.8.2 Définitions d'attributs

6.8.2.1 *Power_supply*

L'attribut *Power_supply* est utilisé pour définir les conditions d'alimentation pour lesquelles le macromodèle ICEM-RE est valide. Cet attribut informe l'utilisateur que le macromodèle ICEM-RE est extrait dans la plage de tensions d'alimentation spécifiée.

Il n'y a pas de format particulier pour définir la valeur de cet attribut. Il doit être facilement compréhensible pour permettre une utilisation correcte du modèle. La valeur de cet attribut est une chaîne de caractères constituée de lettres et/ou de chiffres avec les unités. Les unités valides sont présentées en A.2.5.5.

Ce champ est obligatoire.

Des exemples du champ *Power_supply* sont présentés dans les exemples 1 et 2.

EXEMPLE 1 La syntaxe suivante spécifie que le modèle est défini pour une tension d'alimentation de 5 V.

```
<Power_supply>5V</Power_supply>
```

EXEMPLE 2 Les syntaxes suivantes spécifient que le modèle est défini pour des tensions d'alimentation comprises entre 2,5 V et 18 V.

```
<Power_supply>[2.5V-18V]</Power_supply>
```

ou

```
<Power_supply>between 2.5V and 18V</Power_supply>
```

6.8.2.2 Frequency_range

L'attribut *Frequency_range* est utilisé pour définir la plage de fréquences dans laquelle le macromodèle ICEM-RE est valide. Cet attribut informe l'utilisateur que le macromodèle ICEM-RE est extrait dans la plage de fréquences spécifiée et est utilisable dans cette même plage. La plage de fréquences de validité du macromodèle ICEM-RE doit être la plage de fréquences commune des composants du PDN et générateurs de l'IA.

Il n'y a pas de format particulier pour définir la valeur de cet attribut. Il doit être facilement compréhensible pour permettre une utilisation correcte du modèle. La valeur de cet attribut est une chaîne de caractères constituée de lettres et/ou de chiffres avec les unités.

La valeur de cet attribut peut être différente de celle spécifiée dans la section *Frequency*, mais elle ne doit pas la contredire. Par exemple, la section *Frequency* peut contenir une liste des fréquences, mais l'attribut *Frequency_range* de la section *Validity* peut contenir une seule valeur qui définit toute la plage de fréquences (voir l'exemple 2). Cet attribut a pour but principal d'informer l'utilisateur sur la validité du modèle. Toute contradiction entraînera donc un malentendu.

Ce champ est obligatoire.

Des exemples du champ *Frequency_range* sont présentés dans les exemples 1 et 2.

EXEMPLE 1 Les syntaxes suivantes spécifient que le modèle est valide pour des fréquences comprises entre 1 MHz et 1 GHz.

```
<Frequency_range>[1MHz-1GHz]</Frequency_range>
```

ou

```
<Frequency_range>from 1MHz to 1GHz</Frequency_range>
```

EXEMPLE 2 Exemple d'une section *Frequency* spécifiant plusieurs fréquences et d'une section *Validity* présentant toute la plage de fréquences de validité du modèle.

```
<REmodel>
...
  <Frequency>
    <List>
      10MHz, 30MHz, 100MHz, 300MHz, 500MHz, 700MHz, 900MHz, 1100MHz
    </List>
  </Frequency>
```

```

    <Validity>
    ...
        <Frequency_range>[10MHz - 1.1GHz]</Frequency_range>
    ...
    </Validity>
    ...
</REmodel>

```

NOTE Une contradiction entre la définition de *Frequency_range* dans la section *Validity* et les valeurs de fréquences définies dans la section *Frequency* n'arrêteront pas l'annotation du modèle puisque la section *Validity* sert uniquement à donner des informations aux utilisateurs. L'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées utilisera la section *Frequency* pour l'annotation du modèle indépendamment de ce qui est spécifié dans la section *Validity*.

6.8.2.3 Temperature_range

L'attribut *Temperature_range* est utilisé pour définir la plage de températures dans laquelle le macromodèle ICEM-RE est extrait. La plage de températures de validité du macromodèle ICEM-RE doit être la plage de températures commune des composants du PDN et générateurs de l'IA.

Il n'y a pas de format particulier pour définir la valeur de cet attribut. Il doit être facilement compréhensible pour permettre une utilisation correcte du modèle. La valeur de cet attribut est une chaîne de caractères constituée de lettres et/ou de chiffres avec les unités. Les unités valides pour la grandeur de température sont Celsius (pour °C) et K (pour Kelvin).

Ce champ est obligatoire.

Deux exemples sont présentés ci-après.

EXEMPLE 1 Les syntaxes suivantes spécifient que le modèle est valide pour des températures comprises entre 20 °C et 40 °C.

```
<Temperature_range>[20Celsius-40Celsius]</Temperature_range>
```

ou

```
<Temperature_range>from 20Celsius to 40Celsius</Temperature_range>
```

EXEMPLE 2 La syntaxe suivante spécifie que le modèle est défini uniquement pour une température de 298,15 K.

```
<Temperature_range>298.15K</Temperature_range>
```

6.9 PDN

6.9.1 Généralités

La section *Pdn* du macromodèle ICEM-RE contient les données du PDN qui décrivent le modèle. Afin de représenter à la fois un PDN à une seule fréquence et un PDN à plusieurs fréquences, les données doivent être définies dans le mot-clé *Pdn* en utilisant la balise *Submodel*:

```

<Pdn>
  <Submodel>
    PDN data
  </Submodel>
</Pdn>

```

Les unités des données du PDN peuvent être spécifiées dans la balise *Unit* de l'élément *Pdn*. Les unités acceptées pour le PDN sont les mètres ("m") avec les facteurs d'échelle valides décrits en A.2.5.5.

Les données du PDN relatives à une fréquence donnée sont spécifiées dans une section *Submodel*. La fréquence de chaque section *Submodel* est également définie dans chaque section. D'une part, un macromodèle ICEM-RE à une seule fréquence contient une seule entité *Submodel* avec la balise *Pdn*. D'autre part, un macromodèle ICEM-RE à plusieurs

fréquences contient plusieurs éléments *Submodel* présentés les uns après les autres dans une liste. La hiérarchie structurelle est représentée à la Figure 8.

Lorsqu'il y a plusieurs sections *Submodel* dans un élément *Pdn*, l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées vérifiera le nombre total de sections *Submodel* égales au nombre de fréquences présentes dans la section *Frequency* (voir 6.5 pour plus d'informations).

La plage de fréquences du PDN doit être spécifiée dans la section *Validity* avec la balise *Frequency_range* (voir 6.8 pour plus d'informations).

NOTE La plage de fréquences de validité du PDN est la même que celle de l'IA.

Le Tableau 3 donne une liste des différents mots-clés reconnus de la section *Submodel*.

Tableau 3 – Définition de la section *Submodel* de l'élément *Pdn*

<i>Submodel</i>
Frequency_value: fréquence à laquelle les paramètres du modèle sont définis (exigée pour un PDN à plusieurs fréquences, sinon facultative) Frequency_unit: définit l'unité de fréquence (facultative) Vector: mot-clé pour définir un vecteur de dipôle simple (exigé) List: paramètre de la source du PDN défini en liste (exigé en l'absence de <i>Data_files</i>) Data_files: paramètre de la source du PDN défini dans un fichier externe (exigé en l'absence de <i>List</i>)

Toutes les autres informations pertinentes nécessaires à la compréhension (et à l'utilisation) du PDN doivent être facultativement définies dans les balises *Notes* et *Documentation*. D'autres informations, telles que le mode de fonctionnement du circuit intégré, les condensateurs de découplage sur les lignes d'alimentation, les fonctions activées, les informations sur la mise à la masse, les fiches techniques et les rapports d'essais, peuvent être définies.

6.9.2 Définitions d'attributs

6.9.2.1 *Frequency_value* et *Frequency_unit*

L'attribut *Frequency_value* est utilisé pour définir la spécificité et la validité de l'élément *Submodel*. Les vecteurs du PDN indiqués dans cette section sont définis pour cette fréquence. Il est possible d'utiliser une valeur numérique et les unités comme cela est décrit en A.2.5.3.

Frequency_unit est un attribut facultatif pour définir les unités de la fréquence définie dans l'attribut *Frequency_value*. Si ce champ est absent, l'unité par défaut du système SI ("Hz") est utilisée.

Pour chaque élément *Submodel* dans la section *Pdn*, l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées reliera une structure de données en attachant la valeur définie dans le champ *Frequency_value* de l'élément *Submodel* à une des valeurs définies dans la section *Frequency*. Si aucune correspondance n'est trouvée, alors l'élément *Submodel* en question ne sera pas annoté par l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées.

6.9.2.2 *Vector*

Chaque dipôle définissant les données du PDN est défini dans une balise *Vector* dans le système de coordonnées spécifié (voir 6.6) par rapport au point de référence spécifié dans la section *Reference* (voir 6.7).

Si le PDN d'un ICEM-RE contient un seul élément *Vector*, alors l'élément *Vector* correspondant est défini directement dans la section *Submodel* définie à une fréquence particulière.

Si le PDN à une certaine fréquence est défini avec plusieurs vecteurs de dipôles, alors les différents éléments *Vector* sont donnés sous forme de liste dans une section *Submodel* en utilisant un mot-clé *List*. Le Tableau 4 donne une liste des différents champs reconnus du mot-clé *Vector* dans la section *Pdn*.

Tableau 4 – Définition du mot-clé *Vector* pour la section *Pdn*

Vector
Type: type de source du dipôle: "Electric" ou "Magnetic" (exigé) Name: nom du dipôle décrivant le PDN. Toute chaîne valide. Partage le même espace de noms que l'élément <i>Vector</i> de l'IA (exigé) Start: coordonnées de début du dipôle: " (x_{01}, y_{01}, z_{01}) " ou " $(r_{01}, \theta_{01}, \varphi_{01})$ " ou " $(r_{01}, \varphi_{01}, z_{01})$ " (exigées) End: coordonnées de fin du dipôle: " (x_{02}, y_{02}, z_{02}) " ou " $(r_{02}, \theta_{02}, \varphi_{02})$ " ou " $(r_{02}, \varphi_{02}, z_{02})$ " (exigées)

L'attribut *Type* indique à l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées le type de dipôle utilisé. Le type de dipôle peut être "Electric" ou "Magnetic", pour dipôle électrique et dipôle magnétique, respectivement. Ce champ est obligatoire. S'il n'est pas défini, l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées ne déchiffre pas les informations du vecteur en question.

Le champ *Name* spécifie un nom valide du dipôle. Ce champ est obligatoire et partage le même espace de noms que les données d'IA, comme cela est décrit en 6.10. Un vecteur de dipôle de nom spécifique dans le *Pdn* doit trouver son équivalent IA dans la section *Ia*. Il doit s'agir d'une chaîne valide constituée de caractères alphanumériques. S'il n'est pas défini, l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées ne lira pas les informations du vecteur en question.

Les attributs *Start* et *End* sont utilisés pour définir respectivement les coordonnées de début et de fin du dipôle. Ces coordonnées doivent être représentées dans le système de coordonnées défini dans la balise *Coordinate_system*. Les coordonnées doivent toujours être définies dans un espace en trois dimensions dans un triplet ordonné d'axes entre parenthèses dont les éléments sont séparés par des virgules et sans espace. Ces deux champs sont obligatoires. L'élément *Vector* est invalide si un des deux est vide ou non défini. Les coordonnées peuvent contenir ou non des unités locales définies avec la valeur numérique. Lorsque des unités sont utilisées, elles sont utilisées en premier choix.

6.9.2.3 List

L'attribut *List* indique à l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées que les informations sur le PDN de l'ICEM-RE sont définies en liste et sont constituées de plusieurs vecteurs de dipôles. Les dipôles constituant le PDN de l'ICEM-RE sont présentés les uns après les autres dans une liste avec l'élément *List* pour définir les informations sur le PDN en utilisant le mot-clé *Vector* (voir 6.9.2.2). L'utilisation de *List* dans la balise *Pdn* est représentée en 6.9.3.2.

6.9.2.4 Data_files

L'attribut *Data_files* indique à l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées que les informations sur le PDN sont disponibles dans un fichier de données externe. Lorsqu'il est utilisé, les champs "Type", "Name", "Start" et "Stop" sont spécifiés dans le fichier externe. Il convient que toutes les informations d'en-tête relatives à la description des données sous la

forme de lignes de commentaires commencent par un point d'exclamation (!). L'utilisation de l'élément *Data_files* dans la balise *Pdn* est représentée en 6.9.3.3.

6.9.3 PDN d'un ICEM-RE à une seule fréquence

6.9.3.1 Généralités

Il s'agit de la forme la plus simple d'une représentation de PDN. Les données du PDN constituées de plusieurs vecteurs de dipôles doivent être présentées sous forme de liste dans la section *Submodel* en utilisant le mot-clé *List*. Si les données du PDN contiennent un seul vecteur de dipôle, elles peuvent être spécifiées directement dans la section *Submodel*. Les différents attributs de la section *Submodel* de *Pdn* avec leur utilisation pour un macromodèle ICEM-RE à une seule fréquence sont présentés dans le Tableau 5.

Tableau 5 – Champs valides du mot-clé *Submodel* pour un PDN à une seule fréquence

Champ	Description	Utilisation	Règles
Frequency_value	Attribut pour spécifier la fréquence du PDN	Exigée	Une valeur valide avec ou sans unité
Frequency_unit	Attribut pour spécifier les unités de la fréquence du PDN	Facultative	Une chaîne d'unité valide
Vector	Mot-clé pour définir les coordonnées des vecteurs des dipôles	Exigée	Les éléments <i>Vector</i> sont présentés les uns après les autres dans une liste dans un élément <i>List</i>
List	Section définissant les vecteurs des dipôles pour une fréquence	Exigée si différent de <i>Data_files</i> ou pour le PDN d'un seul dipôle	Plusieurs éléments <i>Vector</i> sont présentés les uns après les autres dans une liste
Data_files	Mot-clé pour représenter des paramètres du PDN avec un fichier externe	Exigée si différent de <i>List</i>	Valide pour un fichier ASCII externe avec des données du PDN. Une définition par section <i>Submodel</i> est valide

Les compositions de tous les attributs présentés ci-dessus ont été décrites en 6.9.2. L'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées comprend que le PDN est défini pour une seule fréquence lorsque les conditions du Tableau 6 sont satisfaites. Toutes les autres conditions sont invalides.

Tableau 6 – Conditions pour une annotation correcte d'un PDN à une seule fréquence par l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées

Nombre de termes dans la section <i>Frequency</i>	Nombre de sections <i>Submodel</i>	Etat
1	1	Valide

Le Tableau 7 donne une liste des champs valides d'une structure *Vector* pour la définition d'un PDN à une seule fréquence et leur utilisation dans la section *Submodel*.

Tableau 7 – Champs valides du mot-clé *Vector* pour un PDN à une seule fréquence

Champ	Description	Utilisation	Règles
Type	Type de dipôle	Exigée	Chaîne valide: "Electric" ou "Magnetic"
Name	Nom du vecteur du dipôle	Exigée	Chaîne valide. Ne peut pas être réutilisée dans la même section
Start	Coordonnées de début du vecteur	Exigée	Coordonnées sous forme de triplet entre parenthèses dont les éléments sont séparés par des virgules dans un système cartésien, cylindrique ou sphérique: "(x,y,z)"
End	Coordonnées de fin du vecteur	Exigée	Coordonnées sous forme de triplet entre parenthèses dont les éléments sont séparés par des virgules dans un système cartésien, cylindrique ou sphérique: "(x,y,z)"

Les détails de tous les attributs présentés ci-dessus ont été décrits en 6.9.2.2.

6.9.3.2 Données de PDN en liste: une seule fréquence

Les données du PDN d'un vecteur de dipôle sont présentées sous forme de liste avec des balises *Vector* dans une section *Submodel* avec ou sans balise *List*. Chaque élément *Vector* doit porter un attribut *Name* unique dans une section *Submodel* donnée.

EXEMPLE Dans l'exemple suivant, un PDN à une seule fréquence de 500 MHz, utilisant un système de coordonnées cartésiennes, est représenté en utilisant des données de PDN en liste.

```

<RModel>
  <Header>
    ...
  </Header>
  <Frequency>
    <Unit>MHz</Unit>
    500
  </Frequency>
  <Coordinate_system>Cartesian</Coordinate_system>
  ...
  <Pdn>
    <Unit>mm</Unit>
    <Submodel Frequency_value="500MHz">
      <List>
        <Vector Type="Electric";Name="Dipole1">
          <Start>(0,0,0)</Start>
          <End>(.2,.2,0)</End>
        </Vector>
        <Vector Type="Electric";Name="Dipole2">
          <Start>(1,1,0)</Start>
          <End>(1.5,1,0)</End>
        </Vector>
        <Vector Type="Magnetic";Name="Dipole3">
          <Start>(1.25,0,0)</Start>
          <End>(2.25,0,0)</End>
        </Vector>
        ...
      </List>
    </Submodel>
  </Pdn>
  <Ia>
    ...
  </Ia>
</RModel>

```

6.9.3.3 Données de PDN de fichier externe: une seule fréquence

Pour indiquer à l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées d'utiliser le fichier de données externe nécessaire dans le format ASCII, la définition doit être faite en utilisant un mot-clé *Data_files*. Des données de PDN typiques doivent être représentées conformément à la Figure 9.

```
!Dipole PDN data at frequency=100MHz
!Type Name Start End
Electric dipole1 (-21.1145,1.4167,0) (-21.1145,1.4167,0)
Electric dipole2 (-21.7531,2.5217,0) (-21.7531,2.5217,0)
Magnetic dipole3 (-20.9,4.56,0) (-20.9,4.56,0)
...
```

Figure 9 – Format pour définir des données de vecteur de PDN dans un fichier externe

Les lignes de commentaires doivent commencer par un point d'exclamation ("!").

La première colonne du fichier doit contenir des données relatives au type de dipôle: "Electric" ou "Magnetic". Pour simplifier l'analyse des données, il est autorisé d'utiliser Type="0" pour les dipôles électriques et Type="1" représente des dipôles magnétiques.

La deuxième colonne contient le nom du dipôle sous forme de chaîne valide.

La troisième colonne et la quatrième colonne définissent respectivement les coordonnées "Start" et "End" (début et fin) du vecteur du dipôle. Il est également possible de spécifier la valeur numérique avec l'unité pour les coordonnées "Start" et "End" (chaque valeur du triplet).

Chaque colonne du fichier peut être délimitée par n'importe lequel des caractères suivants: espace (" "), virgule (","), point-virgule (";") et caractère de tabulation. Aucun autre délimiteur n'est autorisé.

Comme dans l'exemple de 6.9.3, les informations sur un PDN (éléments *Vector*) peuvent être présentées dans une liste dans la section *Submodel* (voir l'exemple ci-dessous).

EXEMPLE Dans l'exemple suivant, un PDN à une seule fréquence de 100 MHz, utilisant un système de coordonnées cartésiennes, est représenté en utilisant des données de PDN d'un fichier externe.

```
<REmodel>
  <Header>
    ...
  </Header>
  <Frequency>
    <Unit>MHz</Unit>
    100
  </Frequency>
  ...
  <Pdn>
    <Unit>mm</Unit>
    <Submodel Frequency_value="100" Frequency_unit="MHz">
      <Data_files>
        ICEM-RE_example_PDN100M.txt
      </Data_files>
    </Submodel>
  </Pdn>
  <Ia>
    ...
  </Ia>
</REmodel>
```

Les fichiers possédant les extensions indiquées dans le Tableau 8 sont autorisés pour définir les données du PDN en utilisant des fichiers de données externes.

Tableau 8 – Extensions de fichiers valides dans la section *Pdn*

Extension de fichier	Nom commun
dat ou DAT	Fichier de données
csv ou CSV	Valeurs séparées par des virgules
txt ou TXT	Fichier de texte

6.9.4 PDN d'un ICEM-RE à plusieurs fréquences

6.9.4.1 Généralités

Il s'agit de la forme la plus complexe d'une représentation de PDN. Les données du PDN constituées de plusieurs vecteurs de dipôles pour chaque fréquence doivent être présentées sous forme de liste dans une balise *Submodel*. Une section *Submodel* correspond aux données du PDN pour une fréquence particulière. Plusieurs sections *Submodel* sont placées les unes après les autres en cascade pour représenter un PDN à plusieurs fréquences. La syntaxe typique avec les informations minimales sur le modèle est indiquée ci-après:

```
<REmodel>
...
<!-- FREQUENCY DEFINITIONS-->
  <Frequency>
    <Unit>
      ...
    </Unit>
    <List>
      freq1 freq2 ...
    </List>
  </Frequency>
...
  <!-- MODEL PDN DATA -->
  <Pdn>
    <Submodel Frequency_value="freq1">
      ...
    </Submodel>
    <Submodel Frequency_value="freq2">
      ...
    </Submodel>
    ...
  </Pdn>
<!-- MODEL IA DATA -->
...
</REmodel>
```

Les différents attributs de l'élément *Submodel* avec leur utilisation pour la spécification d'un PDN à plusieurs fréquences sont les mêmes que ceux d'un PDN à une seule fréquence présentés dans le Tableau 5.

L'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées comprend que le PDN est défini pour plusieurs fréquences lorsque les conditions du Tableau 9 sont satisfaites.

Tableau 9 – Conditions pour une annotation correcte d'un PDN à une plusieurs fréquences par l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées

Nombre de termes dans la section <i>Frequency</i>	Nombre de sections <i>Submodel</i>	Etat
>1 (=X)	>1 (=X)	Valide

Dans les autres cas, l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées comprendra que certaines données sont divergentes et annotera la première section *Submodel* contenant la fréquence qui correspond à la première fréquence dans la section *Frequency*.

Les champs valides d'une structure *Vector* pour la définition d'un PDN à plusieurs fréquences et leur utilisation dans la section *Submodel* sont les mêmes que ceux d'un PDN à une seule fréquence présentés dans le Tableau 7.

6.9.4.2 Données de PDN en liste: plusieurs fréquences

Comme cela a été indiqué précédemment, les PDN à plusieurs fréquences sont spécifiés dans plusieurs sections *Submodel* placées les unes après les autres dans la balise *Pdn*. Chaque élément *Submodel* est défini pour une fréquence particulière, dont la valeur est également définie dans la section *Frequency*.

EXEMPLE Dans l'exemple suivant, un PDN à plusieurs fréquences, 100 MHz et 200 MHz, est défini en utilisant deux sections *Submodel* et des données définies en liste.

```

<REmodel>
  <Header>
    ...
  </Header>
  <Frequency>
    <Unit>MHz</Unit>
    <List>
      100 200
    </List>
  </Frequency>
  ...
  <Pdn>
    <Unit>mm</Unit>
    <Submodel Frequency_value="100" Frequency_unit="MHz">
      <List>
        <Vector Type="Electric";Name="Dipole1">
          <Start>(0,0,0)</Start>
          <End>(.2,.2,0)</End>
        </Vector>
        <Vector Type="Electric";Name="Dipole2">
          <Start>(1,1,0)</Start>
          <End>(1.5,1,0)</End>
        </Vector>
        <Vector Type="Magnetic";Name="Dipole3">
          <Start>(1.25,0,0)</Start>
          <End>(2.25,0,0)</End>
        </Vector>
        ...
      </List>
    </Submodel>
    <Submodel Frequency_value="200" Frequency_unit="MHz">
      <List>
        <Vector Type="Magnetic";Name="Dipole1">
          <Start>(0,0,0)</Start>
          <End>(1,1,0)</End>
        </Vector>
        <Vector Type="Electric";Name="Dipole2">
          <Start>(2,2,0)</Start>

```

```

<End> (3, 2, 0) </End>
                                </Vector>
<Vector Type="Magnetic";Name="Dipole3">
<Start> (1.25, 0, 0) </Start>
<End> (2.25, 0, 0) </End>
                                </Vector>
                                ...
                                </List>
</Submodel>
                                ...
                                </Pdn>
                                <Ia>
                                ...
                                </Ia>
</REmodel>

```

6.9.4.3 Données de PDN de fichier externe: plusieurs fréquences

La syntaxe pour représenter un PDN à plusieurs fréquences avec un fichier de données externe est très similaire à celle du PDN à une seule fréquence présentée en 6.9.3.3, sauf que les données de chaque fréquence doivent être définies dans des fichiers distincts. Le format de fichier et la représentation des données sont identiques à ceux représentés à la Figure 9. Les données d'un fichier sont définies dans la balise *Data_files* de la section *Submodel*.

EXEMPLE Dans l'exemple suivant, un PDN à plusieurs fréquences, 100 MHz et 200 MHz, est défini en utilisant deux sections *Submodel* et des données définies dans des fichiers distincts.

```

<REmodel>
  <Header>
    ...
  </Header>
  <Frequency>
    <Unit>MHz</Unit>
    <List>
      100 200
    </List>
  </Frequency>
  ...
  <Pdn>
    <Unit>mm</Unit>
    <Submodel Frequency_value="100" Frequency_unit="MHz">
      <Data_files>
        ICEM-RE_example_PDN100M.txt
      </Data_files>
    </Submodel>
    <Submodel Frequency_value="200" Frequency_unit="MHz">
      <Data_files>
        ICEM-RE_example_PDN200M.txt
      </Data_files>
    </Submodel>
    ...
  </Pdn>
  <Ia>
    ...
  </Ia>
</REmodel>

```

6.10 IA

6.10.1 Généralités

La section *Ia* du macromodèle ICEM-RE contient les données de l'IA qui décrivent le modèle. Comme pour la définition du PDN donnée en 6.9.1, afin d'assurer une représentation harmonieuse des informations sur l'IA à une seule ou à plusieurs fréquences, les données sont définies dans le mot-clé *Submodel* de la section *Ia* de la manière suivante:

```
<Ia>
  <Submodel>
IA data
  </Submodel>
</Ia>
```

Les unités des données d'une IA peuvent être spécifiées dans la balise *Unit* directement dans l'élément *Ia*. Les unités de base acceptées pour l'IA sont les ampères ("A") avec les facteurs d'échelle valides décrits en A.2.5.3.

Chacune des données du PDN aura ses données d'IA associées. Comme pour la définition du PDN, les données d'IA relatives à une fréquence donnée sont spécifiées dans une section *Submodel*. La fréquence de chaque section *Submodel* est également définie dans chaque section. D'une part, un macromodèle ICEM-RE à une seule fréquence contient une seule entité *Submodel* avec la balise *Ia*. D'autre part, un macromodèle ICEM-RE à plusieurs fréquences contient plusieurs éléments *Submodel*. La hiérarchie structurelle est représentée à la Figure 8.

La plage de fréquences de l'IA (identique à celle du PDN) doit être spécifiée dans la section *Validity* avec la balise *Frequency_range* (voir 6.8 pour plus d'informations).

NOTE La plage de fréquences de validité de l'IA est la même que celle du PDN.

Le Tableau 10 donne une liste des différents champs reconnus du mot-clé *Submodel* dans la section *Ia*.

Tableau 10 – Définition de la section *Submodel* de l'élément *Ia*

<i>Submodel</i>
Frequency_value: fréquence à laquelle les paramètres du modèle sont définis (exigée pour une IA à plusieurs fréquences, sinon facultative)
Frequency_unit: définit l'unité de fréquence (facultative)
Vector: mot-clé pour définir un vecteur de dipôle simple (exigé)
List: paramètre de la source de l'IA défini en liste (exigé en l'absence de <i>Data_files</i>)
Data_files: paramètre de la source de l'IA défini dans un fichier externe (exigé en l'absence de <i>List</i>)

Toutes les autres informations pertinentes nécessaires à la compréhension (et à l'utilisation) de l'IA doivent être facultativement définies dans les balises *Notes* et *Documentation*. Des détails, tels que le mode de fonctionnement du circuit intégré, les fonctions activées, les informations sur la mise à la masse, les condensateurs de découplage, les fiches techniques et les rapports d'essais, peuvent être définis.

6.10.2 Définitions d'attributs

6.10.2.1 Frequency_value et Frequency_unit

L'attribut *Frequency_value* est utilisé pour définir la spécificité et la validité du *Submodel*. Les vecteurs de l'IA indiqués dans cette section sont définis pour cette fréquence. Il est possible d'utiliser une valeur numérique et les unités comme cela est décrit en A.2.5.3.

Frequency_unit est un attribut facultatif pour définir les unités de la valeur de fréquence définie dans l'attribut *Frequency_value*. Si ce champ est absent, l'unité par défaut du système SI ("Hz") est utilisée.

Pour chaque élément *Submodel* dans la section *Ia*, l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées reliera une structure de données en attachant la valeur définie dans le

champ *Frequency_value* de l'élément *Submodel* à une des valeurs définies dans l'élément *Frequency*. Si aucune correspondance n'est trouvée, alors l'élément *Submodel* en question ne sera pas annoté par l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées.

6.10.2.2 Vector

Les informations sur l'IA de chaque dipôle du macromodèle ICEM-RE sont définies dans une balise *Vector* dans le système de coordonnées spécifié (voir 6.6) par rapport au point de référence spécifié dans la section *Reference* (voir 6.7).

Si l'IA d'un ICEM-RE contient un seul élément *Vector*, alors l'élément *Vector* correspondant est défini directement dans la section *Submodel* définie à une fréquence particulière (sans balise *List*). Si l'IA à une certaine fréquence est définie avec plusieurs vecteurs de dipôles, alors les différents éléments *Vector* sont donnés sous forme de liste dans une section *Submodel* en utilisant un mot-clé *List*.

Le Tableau 11 donne une liste des différents champs reconnus du mot-clé *Vector* dans la section *Ia*.

Tableau 11 – Définition du mot-clé *Vector* pour la section *Pdn*

Vector
Type: type de source du dipôle: "Electric" ou "Magnetic" (exigé)
Name: nom du dipôle décrivant l'IA. Toute chaîne valide. Partage le même espace de noms que l'élément <i>Vector</i> du PDN (exigé)
Amplitude: amplitude du courant circulant dans le vecteur du dipôle (exigée)
Phase: phase du courant circulant dans le dipôle (facultative)

L'attribut *Type* indique à l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées le type de dipôle utilisé. Le type de dipôle peut être "Electric" ou "Magnetic", pour dipôle électrique et dipôle magnétique, respectivement. Ce champ est obligatoire. S'il n'est pas défini, l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées ne déchiffrera pas les informations du vecteur en question.

Le champ *Name* spécifie un nom valide du dipôle. Ce champ est obligatoire et partage le même espace de noms que les données de PDN, comme cela est décrit en 6.9. Un vecteur de dipôle de nom spécifique dans la section *Ia* doit trouver son équivalent PDN dans la section *Pdn*. Il doit s'agir d'une chaîne valide constituée de caractères alphanumériques. S'il n'est pas défini, l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées ne lira pas les informations du vecteur en question.

Le champ *Amplitude* représente l'amplitude du courant circulant dans le vecteur du dipôle. Ce champ est obligatoire. Une valeur numérique valide unique avec ou sans unité peut être indiquée dans ce champ. S'il n'est pas défini, l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées ne lira pas les informations du vecteur en question.

Le champ *Phase* représente la phase du courant circulant dans le vecteur du dipôle. Ce champ est facultatif. La valeur de la phase est référencée par rapport à la phase du champ électromagnétique au niveau du point de référence défini dans la section *Reference* (voir 6.7). Une valeur numérique valide unique avec ou sans unité peut être indiquée dans ce champ. Si ce champ n'est pas renseigné, sa valeur par défaut est "0".

6.10.2.3 List

L'attribut *List* indique à l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées que les informations sur l'IA de l'ICEM-RE sont définies en liste et sont constituées de plusieurs vecteurs de dipôles. Les informations sur l'IA relatives aux dipôles constituant l'ICEM-RE sont

présentées les unes après les autres dans une liste dans l'élément *List* en utilisant le mot-clé *Vector* (voir 6.10.2.2). L'utilisation de *List* dans la balise *la* est représentée en 6.10.3.2.

6.10.2.4 Data_files

L'attribut *Data_files* indique à l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées que les informations sur l'IA sont disponibles dans un fichier de données externe. Lorsqu'il est utilisé, les champs "Type", "Name", "Amplitude" et "Phase" sont spécifiés dans le fichier externe. Il convient que toutes les informations d'en-tête relatives à la description des données sous la forme de lignes de commentaires commencent par un point d'exclamation ("!"). L'utilisation de *Data_files* dans la balise *la* est représentée en 6.10.3.3.

6.10.3 IA d'un ICEM-RE à une seule fréquence

6.10.3.1 Généralités

Il s'agit de la forme la plus simple d'une représentation d'IA. Les données d'une IA, constituées des valeurs de courant de plusieurs vecteurs de dipôles, doivent être présentées directement sous forme de liste dans la balise *Submodel* de la section *la*. Les différents attributs de la section *Submodel* de l'*la* avec leur utilisation pour un macromodèle ICEM-RE à une seule fréquence sont présentés dans le Tableau 12.

Tableau 12 – Champs valides du mot-clé *Submodel* pour une IA à une seule fréquence

Champ	Description	Utilisation	Règles
Frequency_value	Attribut pour spécifier la fréquence de l'IA	Exigée	Une valeur valide avec ou sans unité
Frequency_unit	Attribut pour spécifier les unités de la fréquence de l'IA	Facultative	Une chaîne d'unité valide
Vector	Mot-clé pour définir les coordonnées des vecteurs des dipôles	Exigée	Les éléments <i>Vector</i> sont présentés les uns après les autres dans une liste dans un élément <i>List</i>
List	Section définissant les vecteurs des dipôles pour une fréquence	Exigée si différent de <i>Data_files</i> ou pour l'ICEM-RE d'un seul dipôle	Plusieurs éléments <i>Vector</i> sont présentés les uns après les autres dans une liste
Data_files	Mot-clé pour représenter des paramètres de l'IA avec un fichier externe	Exigée si différent de <i>List</i>	Valide pour un fichier ASCII externe avec des données de l'IA. Une définition par section <i>Submodel</i> est valide

Les compositions de tous les attributs présentés ci-dessus ont été décrites en 6.10.2. L'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées comprend que l'IA est définie pour une seule fréquence lorsque les conditions du Tableau 13 sont satisfaites. Les conditions sont identiques à celles du PDN.

Tableau 13 – Conditions pour une annotation correcte d'une IA à une seule fréquence par l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées

Nombre de termes dans la section <i>Frequency</i>	Nombre de sections <i>Submodel</i>	Etat
1	1	Valide

Le Tableau 14 donne une liste des champs valides d'une structure *Vector* pour la définition d'une IA à une seule fréquence et leur utilisation dans la section *Submodel*.

Tableau 14 – Champs valides du mot-clé *Vector* pour une IA à une seule fréquence

Champ	Description	Utilisation	Règles
Type	Type de dipôle	Exigée	Chaîne valide: "Electric" ou "Magnetic"
Name	Nom du vecteur du dipôle	Exigée	Chaîne valide. Ne peut pas être réutilisée dans la même section
Amplitude	Amplitude du courant circulant dans le dipôle	Exigée	Valeur numérique valide avec ou sans unité
Phase	Phase du courant circulant dans le dipôle	Facultative	Valeur numérique valide, l'unité est "degree"

Les détails de tous les attributs présentés ci-dessus ont été décrits en 6.10.2.2.

6.10.3.2 Données d'IA en liste: une seule fréquence

Les données de l'IA d'un vecteur de dipôle sont présentées sous forme de liste avec des balises *Vector* dans une section *Submodel*. Chaque élément *Vector* doit porter un attribut *Name* unique dans une section *Submodel* donnée.

EXEMPLE Dans l'exemple suivant, les données d'IA à 100 MHz sont représentées en utilisant des données en liste dans la balise *Submodel*. L'unité des données d'IA (amplitude du courant) est le microampère ("uA").

```

<RModel>
  <Header>
    ...
  </Header>
  <Frequency>
    <Unit>MHz</Unit>
    100
  </Frequency>
  ...
  <Ia>
    <Unit>uA</Unit>
    <Submodel Frequency_value="100" Frequency_unit="MHz">
      <List>
        <Vector Type="Electric";Name="Dipole1">
          <Amplitude>230</Amplitude>
          <Phase>32</Phase>
        </Vector>
        <Vector Type="Electric";Name="Dipole2">
          <Amplitude>450</Amplitude>
          <Phase>25</Phase>
        </Vector>
        <Vector Type="Magnetic";Name="Dipole3">
          <Amplitude>98</Amplitude>
          <Phase>99</Phase>
        </Vector>
        ...
      </List>
    </Submodel>
  </Ia>
</RModel>

```

6.10.3.3 Données d'IA de fichier externe: une seule fréquence

Pour indiquer à l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées d'utiliser le fichier de données externe nécessaire dans le format ASCII, la définition doit être faite en utilisant un mot-clé *Data_files*. Des données d'IA typiques doivent être représentées conformément à la Figure 10.

```
!Dipole IA data at frequency=100MHz
!Type Name Amplitude Phase
Electric dipole1 1.6768 -57.1619
Electric dipole2 1.7317 85.5752
Magnetic dipole3 1.64 2.332
...
```

IEC

Figure 10 – Format pour définir des données de vecteur d'IA dans un fichier externe

Les lignes de commentaires doivent commencer par un point d'exclamation ("!").

La première colonne du fichier doit contenir des données relatives au type de dipôle: "Electric" ou "Magnetic". Pour simplifier l'analyse des données, il est autorisé d'utiliser Type="0" pour les dipôles électriques et Type="1" pour les dipôles magnétiques.

La deuxième colonne contient le nom du dipôle sous forme de chaîne valide.

La troisième colonne et la quatrième colonne définissent respectivement l'amplitude et la phase du courant circulant dans vecteur du dipôle. Il est également possible de spécifier la valeur numérique avec l'unité pour la colonne "Amplitude".

Chaque colonne du fichier peut être délimitée par n'importe lequel des caractères suivants: espace (" "), virgule (","), point-virgule (";") et caractère de tabulation. Aucun autre délimiteur n'est autorisé.

Comme dans l'exemple de 6.10.3, les informations sur une IA (éléments *Vector*) peuvent être présentées dans une liste dans la section *Submodel*.

EXEMPLE Dans l'exemple suivant, les données d'IA à 100 MHz sont représentées en utilisant un fichier de données externe dans une balise *Submodel*.

```
<REmodel>
  <Header>
    ...
  </Header>
  <Frequency>
    <Unit>MHz</Unit>
    100
  </Frequency>
  ...
  <Ia>
    <Submodel Frequency_value="100MHz">
      <Data_files>
        ICEM-RE_example_IA100M.txt
      </Data_files>
    </Submodel>
  </Ia>
</REmodel>
```

Les fichiers possédant les extensions indiquées dans le Tableau 15 sont autorisés pour définir les données de l'IA en utilisant des fichiers de données externes.

Tableau 15 – Extensions de fichiers acceptées dans la section *Ia*

Extension de fichier	Nom commun
dat ou DAT	Fichier de données
csv ou CSV	Valeurs séparées par des virgules
txt ou TXT	Fichier de texte

6.10.4 IA d'un ICEM-RE à plusieurs fréquences

6.10.4.1 Généralités

Il s'agit de la forme la plus complexe d'une représentation d'ICEM-RE. Les données d'IA de plusieurs vecteurs de dipôles pour chaque fréquence doivent être présentées sous forme de liste dans une balise *Submodel* de la section *Ia*. Une section *Submodel* correspond aux données d'IA pour une fréquence particulière. Plusieurs sections *Submodel* sont placées les unes après les autres en cascade pour représenter une IA à plusieurs fréquences. La syntaxe typique avec les informations minimales sur le modèle est indiquée ci-après:

```
<REmodel>
...
<!-- MODEL IA DATA -->
<Ia>
  <Submodel Frequency_value="freq1">
    ...
  </Submodel>
  <Submodel Frequency_value="freq2">
    ...
  </Submodel>
  ...
</Ia>
</REmodel>
```

Les différents attributs de l'élément *Submodel* avec leur utilisation pour la spécification d'une IA à plusieurs fréquences sont les mêmes que ceux d'une IA à une seule fréquence présentés dans le Tableau 12.

L'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées comprend que l'IA est définie pour plusieurs fréquences lorsque les conditions du Tableau 16 sont satisfaites.

Tableau 16 – Conditions pour une annotation correcte d'une IA à plusieurs fréquences par l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées

Nombre de termes dans la section <i>Frequency</i>	Nombre de sections <i>Submodel</i>	Etat
>1 (=X)	>1 (=X)	Valide

NOTE Dans tous les autres cas, l'analyseur syntaxique de modèle d'émissions rayonnées comprendra que certaines données sont divergentes et annotera la première section *Submodel* contenant la fréquence qui correspond à la première fréquence dans la section *Frequency*.

Les champs valides d'une structure *Vector* pour la définition d'une IA à plusieurs fréquences et leur utilisation dans la section *Submodel* sont les mêmes que ceux d'une IA à une seule fréquence présentés dans le Tableau 14.

6.10.4.2 Données d'IA en liste: plusieurs fréquences

Comme cela a été indiqué précédemment, les données d'IA à plusieurs fréquences sont spécifiées dans plusieurs sections *Submodel* placées les unes après les autres dans une section *Ia*. Chaque élément *Submodel* est défini pour une fréquence particulière, dont la valeur est également définie dans la section *Frequency*.

EXEMPLE Exemple d'IA à plusieurs fréquences (pour reprendre l'exemple de 6.9.4.3) pour 100 MHz et 200 MHz:

```
<REmodel>
  <Header>
    ...
  </Header>
```

```

<Frequency>
  <Unit>MHz</Unit>
  <List>
    100 200
  </List>
</Frequency>
...
<Ia>
  <Submodel Frequency_value="100" Frequency_unit="MHz">
    <List>
      <Vector Type="Electric";Name="Dipole1">
        <Amplitude>230</Amplitude>
        <Phase>32</Phase>
      </Vector>
      <Vector Type="Electric";Name="Dipole2">
        <Amplitude>450</Amplitude>
        <Phase>25</Phase>
      </Vector>
      <Vector Type="Magnetic";Name="Dipole3">
        <Amplitude>98</Amplitude>
        <Phase>99</Phase>
      </Vector>
      ...
    </List>
  </Submodel>
  <Submodel Frequency_value="200" Frequency_unit="MHz">
    <List>
      <Vector Type="Electric";Name="Dipole1">
        <Amplitude>120</Amplitude>
        <Phase>76</Phase>
      </Vector>
      <Vector Type="Electric";Name="Dipole2">
        <Amplitude>230</Amplitude>
        <Phase>52</Phase>
      </Vector>
      <Vector Type="Magnetic";Name="Dipole3">
        <Amplitude>145</Amplitude>
        <Phase>5</Phase>
      </Vector>
      ...
    </List>
  </Submodel>
  ...
</Ia>
</REmodel>

```

6.10.4.3 Données d'IA de fichier externe: plusieurs fréquences

La syntaxe pour représenter une IA à plusieurs fréquences avec un fichier de données externe est très similaire à celle de l'IA à une seule fréquence présentée en 6.10.3.3, à l'exception près que les données de chaque fréquence doivent être définies dans des fichiers distincts. Le format de fichier et la représentation des données sont identiques à ceux représentés à la Figure 10. Les informations sur le fichier (filename) sont définies dans la balise *Data_files* de la section *Submodel*.

7 Extraction

7.1 Généralités

La manière la plus simple d'obtenir des sous-modèles de PDN et d'IA d'ICEM-RE consiste à utiliser des données de champ proche obtenues à partir de mesures ou de simulations de champs électromagnétiques. En variante, il est également possible d'obtenir un ICEM-RE à partir des informations d'un macromodèle ICEM-CE. Les procédures d'extraction pour ces deux méthodes sont expliquées.

7.2 Contraintes d'extraction liées à l'environnement

Les extractions de paramètres de macromodèles ICEM-RE doivent être réalisées dans des conditions normales de température ambiante: $23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. Aucune exigence supplémentaire ne s'applique à la pression atmosphérique ni à l'humidité.

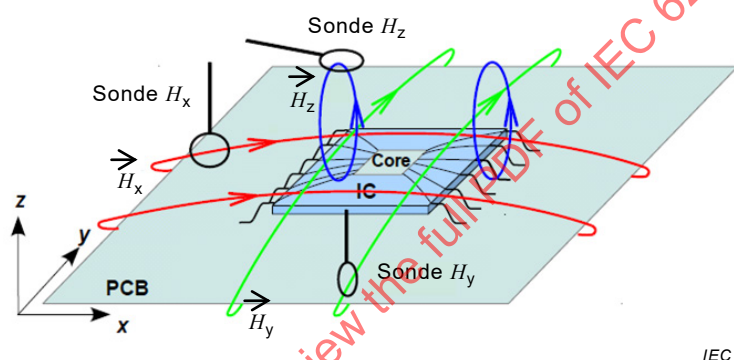
Lorsque du silicium ouvert est utilisé, l'éclairage doit être atténué ou éteint afin de ne pas générer d'effet photonique.

NOTE Certains matériaux de substrat sont hygroscopiques, ce qui peut avoir une influence sur la permittivité du matériau et sur la tangente de son angle de perte.

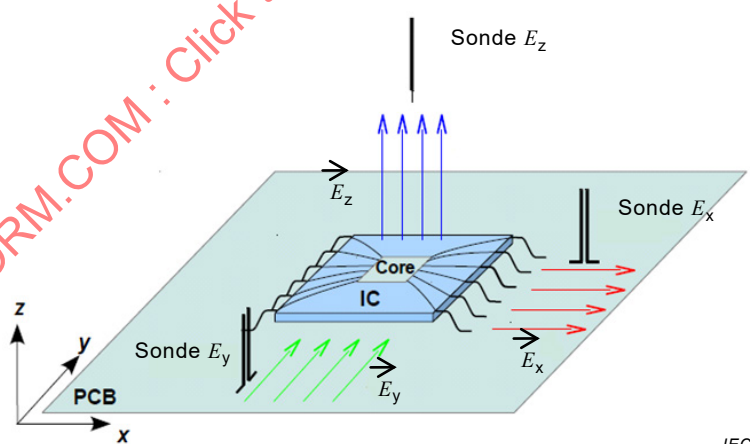
7.3 Obtention de paramètres de modèles à partir de données de champ proche

7.3.1 Généralités

Des données de champ proche pour l'extraction d'un modèle peuvent être obtenues en utilisant la méthode du balayage en surface en champ proche. Comme cela est spécifié dans l'IEC/TS 61967-3, la base de cette approche est représentée à la Figure 11.



a) Mesure à l'aide de sondes de champ magnétique



b) Mesure à l'aide de sondes de champ électrique

Anglais	Français
PCB	Circuit imprimé
Core	Cœur
IC	Circuit intégré

Figure 11 – Mesure de champ électromagnétique

Comme indiqué précédemment, un macromodèle ICEM-RE est spécifique à un circuit intégré. Lors de la construction du modèle à partir de données de champ proche, il est important de mesurer le champ rayonné à proximité émanant du circuit intégré en essai sans l'influence des composants voisins (circuits intégrés, pistes, etc.). Il convient que le circuit imprimé contenant le circuit intégré utilisé pour le balayage en champ proche soit la même que celle spécifiée dans l'IEC 61967-1.

La Figure 12 est un exemple de mesure sur un microcontrôleur 16 bits, monté sur un circuit imprimé conforme à l'IEC 61967-1, à 80 MHz [2].

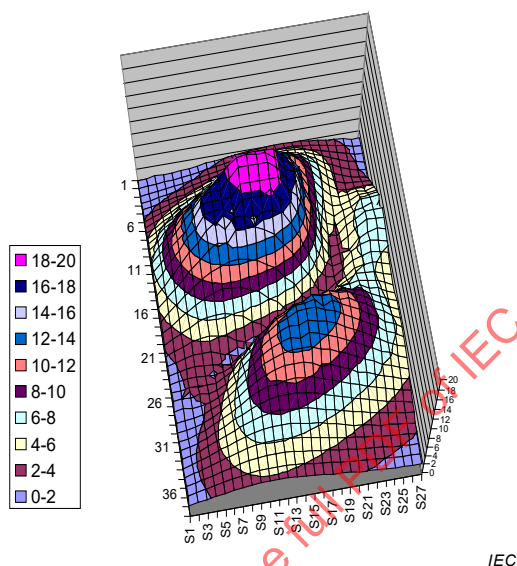


Figure 12 – Champ B_z en nT mesuré à 3 mm au-dessus d'un microprocesseur à 80 MHz

En variante, si toutes des données physiques et électriques du dispositif en essai sont connues à l'avance, des outils de simulation en champ électromagnétique sont capables de simuler les champs rayonnés autour du circuit intégré en essai. Des précautions doivent être prises pour empêcher l'influence des composants voisins sur les champs rayonnés par le circuit intégré. A partir de ces simulations, il est possible d'extraire les champs électromagnétiques rayonnés à une certaine hauteur au-dessus du circuit intégré.

Les données de champ proche du vecteur simulé ou mesuré peuvent être utilisées pour extraire les informations sur le PDN ou l'IA du macromodèle ICEM-RE. Si les informations de mesure sont utilisées pour l'extraction du modèle, les informations de champ proche du vecteur doivent être obtenues en utilisant un analyseur de réseau vectoriel, comme spécifié dans l'IEC 61967-3.

7.3.2 PDN

7.3.2.1 Généralités

Comme cela a été présenté précédemment, les informations sur le PDN peuvent être extraites du diagramme de champ obtenu à partir de mesures en champ proche ou de données de simulation de champ électromagnétique. En considérant que le boîtier de circuit intégré avec ses broches et liaisons émette un rayonnement important, il est possible de représenter des valeurs maximales du champ avec une ligne de courant élémentaire dont la longueur et l'intensité peuvent être déterminées par un processus itératif. En fonction de la composante du champ, une ou deux valeurs maximales peuvent représenter un élément de courant comme cela est représenté à la Figure 13.

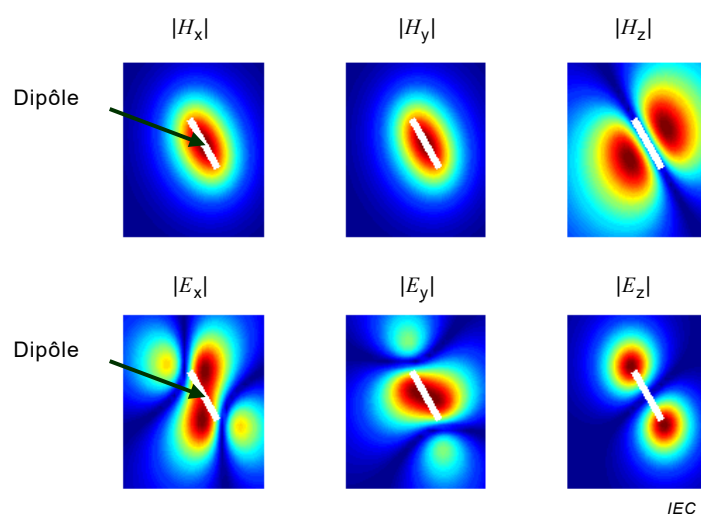


Figure 13 – Exemple de champ électromagnétique émis par une ligne de courant élémentaire

Le nombre de ces sources peut être identifié manuellement ou automatiquement, comme cela est expliqué en 7.3.2.2 et en 7.3.2.3 respectivement. Dans les deux cas, le nombre de ces sources de courant est optimisé pour correspondre aux résultats de mesure. La précision du modèle dépend de la méthode choisie. Le Tableau E.1 donne les lignes directrices pour la sélection de modèles pour choisir une méthode de modélisation.

7.3.2.2 Détection manuelle de source

Les sources manuelles représentant les champs rayonnés sont déterminées de manière itérative pour être en corrélation avec les mesures ou les simulations [2], [3]. Dans la suite du présent document, ce modèle est appelé "Model_{Hman}". Par exemple dans le cas du microcontrôleur à 80 MHz, trois sources de dipôles représentent les champs magnétiques rayonnés comme cela est représenté à la Figure 14.

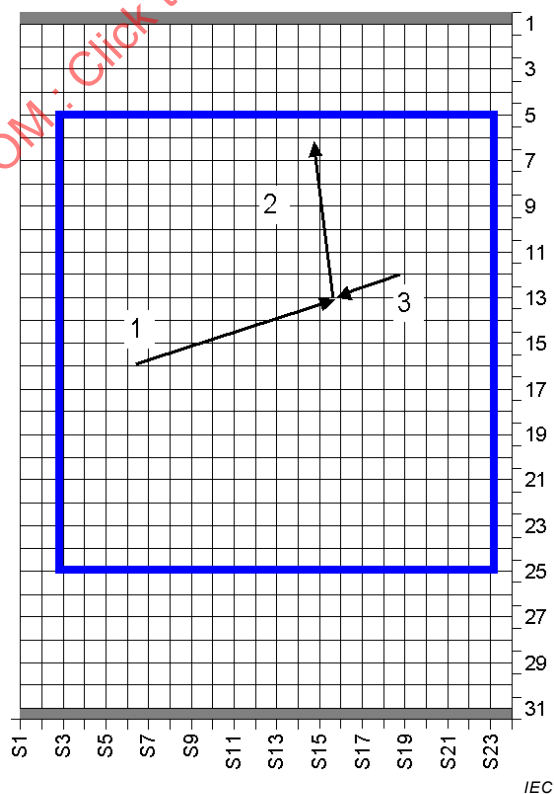
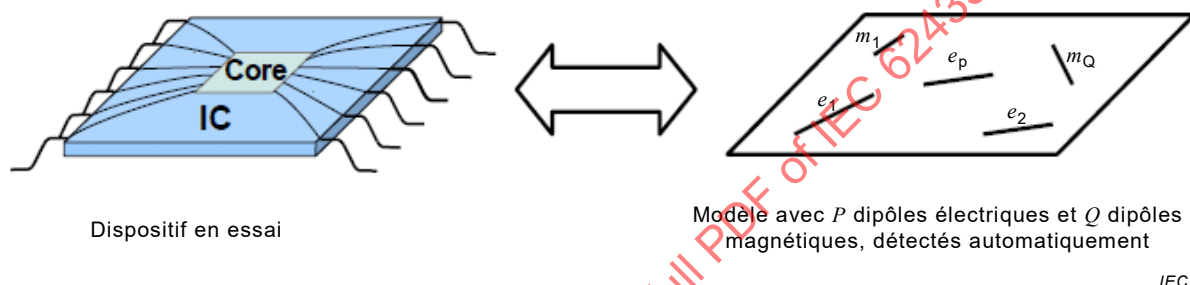


Figure 14 – Mappage manuel du courant

L'optimisation de la structure du PDN (nombre de dipôles) est directement liée à l'amplitude des IA (amplitude du courant des dipôles), et l'adaptation est réalisée de manière itérative par une analyse simultanée de ces deux sous-modèles. Il faut noter qu'il n'est peut-être pas toujours possible d'optimiser les champs électromagnétiques rayonnés avec quelques sources manuelles. Dans de telles conditions, la technique de détection automatique des sources peut être utilisée.

7.3.2.3 Détection automatique de source

Cette technique est davantage générique et peut être appliquée à n'importe quelle donnée de mesure ou de simulation. A partir des composantes tangentielles du champ électrique ou magnétique proche, des dipôles électriques et/ou magnétiques sont extraits et leurs paramètres sont optimisés. Plusieurs méthodes ont été développées pour la détection automatique de source [4] à [7]. Dans toutes ces méthodes, N dipôles (par exemple P dipôles électriques et Q dipôles magnétiques, avec $P + Q = N$) représentent le dispositif en essai comme cela est représenté à la Figure 15.



Anglais	Français
Core	Cœur
IC	Circuit intégré

Figure 15 – Représentation de modèle avec N dipôles détectés automatiquement

Il existe plusieurs méthodes pour détecter automatiquement les sources de dipôles à partir de données de champ proche. Selon la méthode choisie, le placement et le nombre de ces dipôles sont détectés à partir des données du champ électrique proche et/ou du champ magnétique proche mesurées ou simulées. La longueur de ces dipôles peut être fixe ou variable. En fonction de la complexité du profil de rayonnement du dispositif en essai et du type de champ à modéliser (champ électrique et/ou champ magnétique), la méthodologie peut devenir très complexe.

La méthode de modélisation la plus simple est la modélisation du champ magnétique dans le domaine fréquentiel avec un nombre prédéfini de vecteurs de dipôles électriques ou de dipôles magnétiques [4], [5]. Dans la suite du présent document, ce modèle est appelé "Model_H".

Une méthode de modélisation plus complexe est la modélisation du champ électromagnétique dans le domaine fréquentiel en optimisant de manière itérative le nombre de vecteurs de dipôles électriques [6], [7]. Dans la suite du présent document, ce modèle est appelé "Model_{EM_Iter}". La même méthode est également étendue au domaine temporel en utilisant une analyse harmonique temporelle. Dans la suite du présent document, ce modèle est appelé "Model_{EMTD}" [8].

En variante, les champs électromagnétiques peuvent être modélisés dans le domaine fréquentiel avec un nombre prédéfini à la fois de dipôles électriques et de dipôles magnétiques [9]. Dans la suite du présent document, ce modèle est appelé "Model_{EM_Inv}".

Ces algorithmes sont présentés à l'Annexe E. Des exemples d'outils pour extraire le macromodèle ICEM-RE basé sur les méthodes présentées ci-dessus y sont également brièvement présentés.

7.3.3 IA

7.3.3.1 Généralités

Le sous-modèle peut également être extrait des données de champ proche en utilisant le sous-modèle déterminé précédemment. L'amplitude d'une IA est estimée par une méthode itérative et est liée à la structure du PDN. Ainsi, l'extraction d'une IA se fait également manuellement ou automatiquement en fonction de la méthode de modélisation choisie. Le Tableau E.1 donne les lignes directrices pour la sélection de modèles pour choisir une méthode de modélisation.

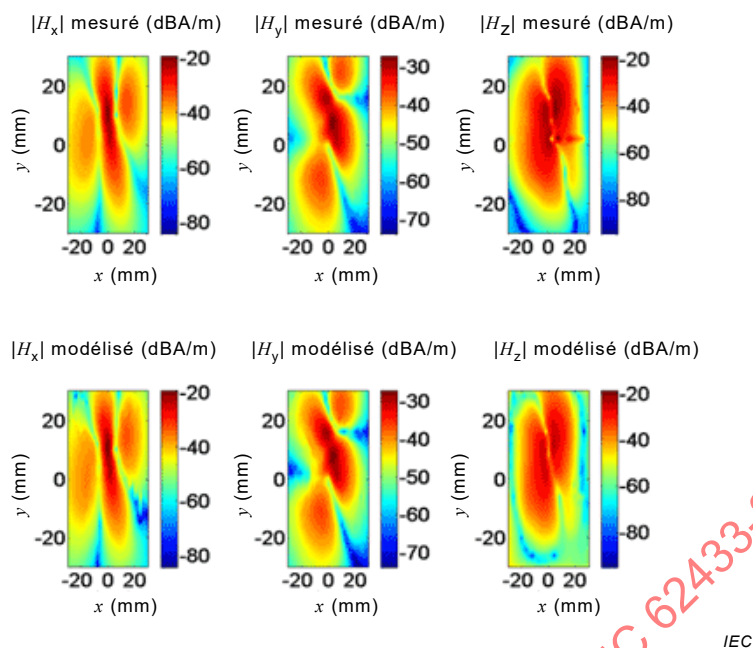
7.3.3.2 Itération manuelle

Si le PDN est obtenu par des sources déterminées manuellement, alors l'IA est également itérée manuellement. Comme cela a été indiqué précédemment, l'optimisation des sources mappées manuellement (structure de PDN et d'IA) est directement liée à l'amplitude de l'IA et au nombre de dipôles. L'adaptation est réalisée de manière itérative par une analyse simultanée de ces deux éléments.

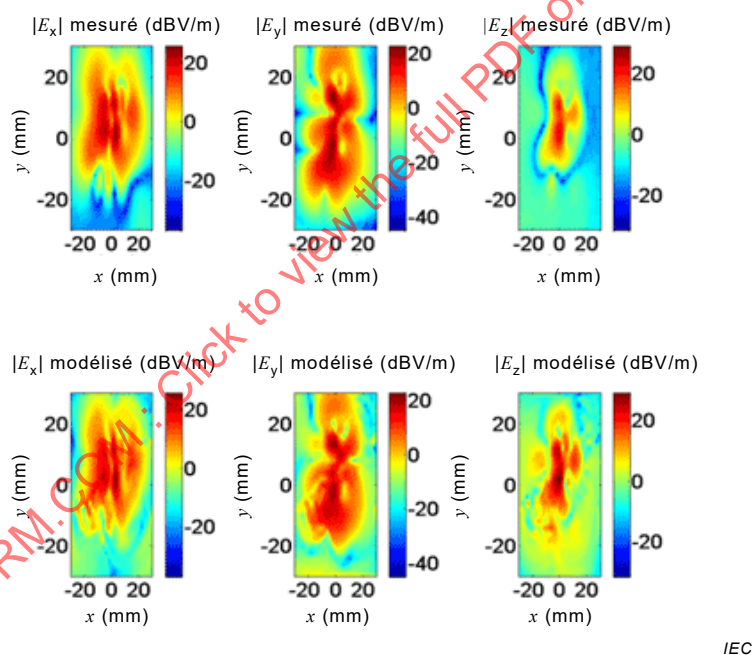
7.3.3.3 Itération automatique

En fonction du type de modèle, le sous-modèle d'IA est optimisé en utilisant le PDN déduit précédemment jusqu'à ce que la mesure et la simulation du modèle soient corrélées. Si "Model_{EM_Iter}" est choisi, en se basant sur l'écart entre les simulations et les mesures (pendant chaque itération), le PDN peut subir des modifications et donc l'IA aussi. Pour toutes les autres méthodes de modélisation, le PDN est fixe et basé sur l'écart entre les données de mesure et les données de simulation du modèle, et l'IA est extraite.

La Figure 16 est un exemple de résultats de macromodèle ICEM-RE obtenus en utilisant "Model_{EM_Inv}", construit avec 961 dipôles électriques et 961 dipôles magnétiques de 1 mm de long.



a) Champ magnétique rayonné à 2 mm au-dessus d'un oscillateur



b) Champ électrique rayonné à 2 mm au-dessus d'un oscillateur

Figure 16 – Comparaison entre les champs électromagnétiques modélisés et mesurés à 2 mm au-dessus d'un oscillateur

Le modèle a été construit à partir de mesures de champs électriques et magnétiques proches à 2 mm au-dessus d'un oscillateur, fonctionnant à 40 MHz.

La procédure d'extraction d'IA pour les méthodes de modélisation manuelle et automatique est présentée à l'Annexe E.

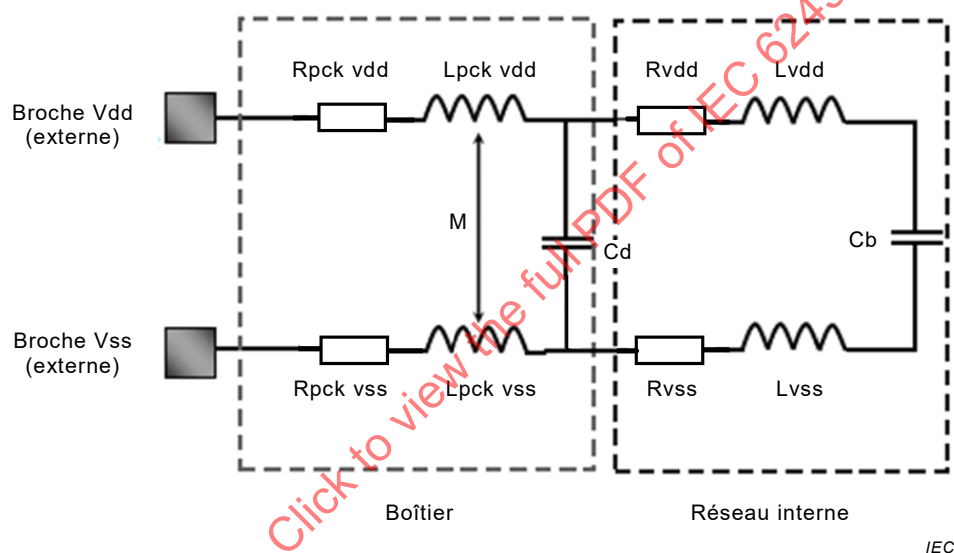
7.4 Extraction basée sur une simulation ICEM-CE

7.4.1 Généralités

Des sous-modèles de PDN et d'IA d'ICEM-RE peuvent être extraits en utilisant les sous-modèles de PDN et d'IA d'ICEM-CE obtenus à l'aide de l'IEC 62433-2 [10], [11]. La méthodologie d'extraction du modèle ICEM-RE est expliquée ci-dessous.

7.4.2 PDN

Seul le boîtier est considéré comme étant la partie rayonnante d'un circuit intégré. Il peut être considéré comme faisant partie de la structure du PDN et être implanté dans un outil de simulation électromagnétique. La géométrie doit être complétée par l'impédance du dispositif, qui peut être obtenue à partir du modèle ICEM-CE, conformément à l'IEC TS 62433-2. Un PDN d'ICEM-CE simple est représenté à la Figure 17. Pour les boîtiers plus complexes, des composants passifs supplémentaires peuvent être nécessaires pour tenir compte des éventuelles résonances de cavités et autres effets de couplage.



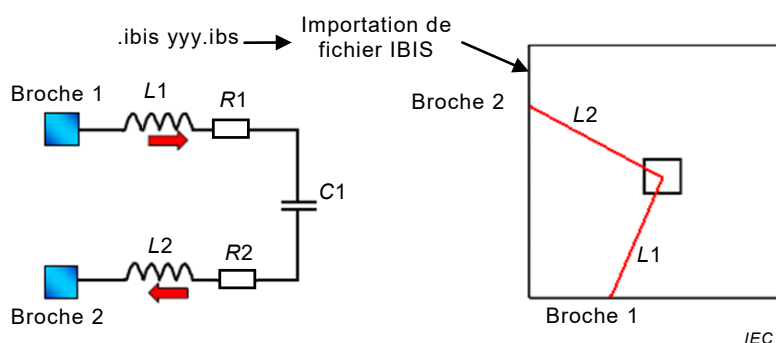
Légende

Broche Vdd, Broche Vss	Broches d'interface externes de la ligne d'alimentation des circuits intégrés
Rpck vdd, Rpck vss	Résistances séries du boîtier
Lpck vdd, Lpck vss	Inductances séries du boîtier
Cd	Condensateur de découplage de la ligne d'alimentation sur puce
Cb	Condensateur de découplage sur puce du bloc de ligne d'alimentation interne
Rvdd, Rvss	Résistances séries de la ligne d'alimentation interne des circuits intégrés
Lvdd, Lvss	Inductances séries de la ligne d'alimentation interne des circuits intégrés
M	Couplage mutuel entre broches dans le boîtier

Figure 17 – PDN d'ICEM-CE simple représentant le boîtier et l'impédance interne du réseau entre les lignes d'alimentation

Puisque cette méthode est basée sur une représentation physique des circuits intégrés, il est possible de définir différentes structures de PDN pour différentes configurations fonctionnelles d'un circuit intégré plus simple à mettre en œuvre dans un outil numérique.

Les inductances dans le modèle sont des inductances rayonnantes puisqu'elles apparaissent dans le modèle électrique du PDN et le modèle géométrique du boîtier (obtenu par exemple à partir d'un fichier IBIS de circuits intégrés). Il est donc possible de représenter les inductances du modèle par des éléments rayonnants qui constituent le PDN de l'ICEM-RE comme cela est représenté à la Figure 18.



Légende

Broche 1, Broche 2	Broches d'interface externes des broches des circuits intégrés
L1, L2	Inductances séries du boîtier
R1, R2	Résistances séries du boîtier
C1	Capacité totale de la puce

Figure 18 – Reconstruction de la géométrie du modèle de boîtier (PDN d'ICEM-RE) à partir d'un modèle IBIS et du modèle électrique (PDN d'ICEM-CE)

Connaissant cette structure, il est possible de simuler le diagramme en champ proche en utilisant le sous-modèle d'IA décrit en 7.4.3.

7.4.3 IA

L'IA de l'ICEM-RE est obtenue directement en superposant le PDN de l'ICEM-RE présenté en 7.4.2 et les données de champ proche provenant des mesures ou des simulations (pour une fréquence et une hauteur particulières). Ceci est nécessaire pour déterminer les zones rayonnantes et pour optimiser les courants circulants dans les éléments rayonnants (broches et liaisons). Les paramètres suivants provenant des données de balayage en champ proche sont utilisés à cette fin:

- La fréquence de fonctionnement qui détermine le courant circulant dans les broches
- La hauteur de mesure par rapport aux broches
- La présence ou l'absence d'un plan de masse
- La distance entre les broches et le plan de masse (le cas échéant)
- La résolution spatiale des mesures

Une autre manière d'obtenir une IA de l'ICEM-RE consiste à utiliser le modèle ICEM-CE pour obtenir le courant circulant dans les inductances rayonnantes du PDN de l'ICEM-RE.

8 Validation

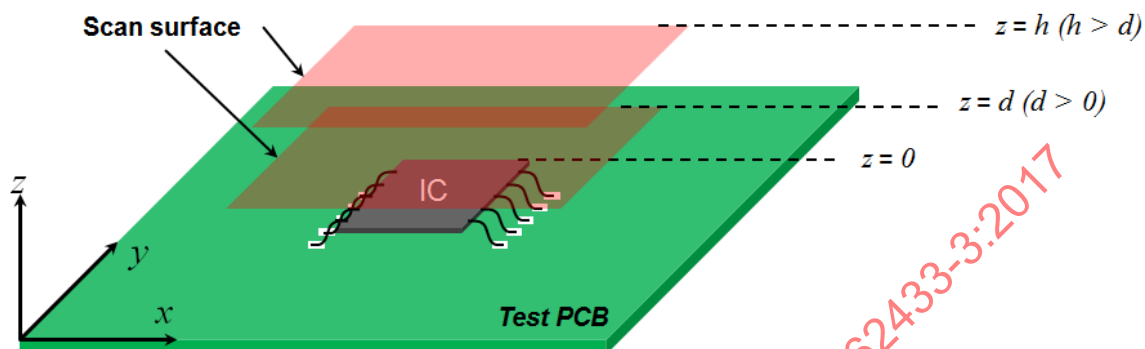
Cette partie présente la validation des techniques de modélisation, leur domaine de validité, les conditions de choix des méthodes et leur précision. Il existe de nombreux moyens quantitatifs pour valider les modèles. La procédure de validation utilisée doit être incluse dans la documentation du modèle.

Un exemple de procédure de validation est représenté à l'Annexe F. Il convient que les informations fournies, dont la liste n'est pas limitative, incluent les étapes suivantes:

- Réaliser un balayage en champ proche à $z = d$ ou utiliser un champ proche simulé à $z = d$. Par hypothèse, le circuit intégré en essai est placé dans le plan XY et d est la distance au-dessus de la surface du circuit intégré en essai comme cela est représenté à la Figure 19
- Extraire les données de l'ICEM-RE des champs proches à $z = d$

- c) Valider le modèle à $z = d$ avec des champs mesurés ou simulés
- d) Simuler des champs rayonnés proches à $z = h$ ($h > d$) en utilisant l'ICEM-RE
- e) Valider avec des champs proches mesurés ou simulés à $z = d$

NOTE La précision du modèle dépend fortement des données utilisées pour construire le modèle et des données utilisées pour la validation du modèle.



IEC

Anglais	Français
Scan Surface	Surface de balayage
IC	Circuit intégré
Test PCB	Circuit imprimé d'essai

Figure 19 – Représentation graphique de l'exemple de procédure de validation

Annexe A (normative)

Définitions préliminaires pour la représentation XML

A.1 Notions fondamentales du langage XML

A.1.1 Déclaration XML

Bien que la déclaration XML soit facultative dans un fichier XML, il convient que le fichier de modèles ICEM-RE comporte une déclaration XML destinée aux analyseurs syntaxiques XML de base.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
```

La déclaration XML doit être la première ligne du fichier.

A.1.2 Éléments de base

Toutes les informations sont sauvegardées sous la forme d'éléments XML. Chaque élément commence par une balise de début et se termine par une balise de fin. La balise de début est constituée d'un mot-clé encadré par des crochets triangulaires, `<Keyword>`. La balise de fin est constituée du même mot-clé préfixé par le caractère "/" et encadré par des crochets, `</Keyword>`. Le contenu sous forme de texte est encadré par une balise de début et une balise de fin.

Un exemple d'élément est donné ci-dessous:

```
<Keyword>          <!-- start-tag -->
    text           <!-- content -->
</Keyword>         <!-- end-tag -->
```

Il est également autorisé d'écrire un élément sur la même ligne, par exemple pour inclure un contenu court.

```
<Keyword>text</Keyword>
```

Le contenu d'un élément peut être constitué d'un ou plusieurs autres éléments ou d'une valeur (numérique ou alphanumérique). Pour plus de clarté, une indentation avec des caractères de tabulation peut être utilisée. Aucun crochet triangulaire "<" et ">" ne doit faire partie du contenu sauf lorsqu'ils sont utilisés pour encadrer des mots-clés.

Le texte doit utiliser des caractères du jeu de caractères UTF-8 (espace, " ", "<", ">", "&" exclus).

Un élément vide peut être inclus pour indiquer qu'un mot-clé particulier existe, mais il n'a aucun contenu:

```
<empty_element/>
```

A.1.3 Élément racine

Le fichier XML doit contenir un et un seul élément racine. Il encadre tous les autres éléments et en conséquence, il constitue le seul élément parent de tous les autres éléments. La balise de début de l'élément racine est placée au début du fichier ou après la déclaration XML lorsqu'elle existe. La balise de fin de l'élément racine se trouve à la dernière entrée du fichier.

Le mot-clé de l'élément racine ne doit pas être utilisé à d'autres fins dans le fichier XML.

A.1.4 Commentaires

Des commentaires peuvent être insérés dans le fichier, entre "<!--" et "-->". Un exemple est donné ci-dessous:

```
<!-- this line is a comment -->
```

Des commentaires peuvent être insérés n'importe où dans le fichier, sauf à l'intérieur des balises de début et de fin et ils peuvent être écrits sur une seule ligne ou sur plusieurs lignes. L'ensemble du texte encadré par des crochets de commentaire est considéré comme un commentaire et il peut être ignoré.

A.1.5 Terminaisons de ligne

Pour faciliter la lisibilité, le fichier est généralement organisé en lignes. La séquence de terminaison de ligne doit être, soit un caractère de saut de ligne, soit un caractère de retour chariot suivi par un caractère de saut de ligne.

A.1.6 Hiérarchie des éléments

L'ordre des éléments n'a pas d'importance, mais leur hiérarchie doit être respectée. Un exemple de disposition est donné ci-dessous:

```
<Keyword1> ... </Keyword1>
<Keyword2>
  <Keyword21> ... </Keyword21>
  <Keyword22> ... </Keyword22>
</Keyword2>
<Keyword3> ... </Keyword3>
```

A.1.7 Attributs d'éléments

Les éléments de mots-clés XML peuvent avoir des attributs. Les attributs donnent des informations supplémentaires sur les éléments qui ne font pas partie des données. Les valeurs des attributs doivent être entre guillemets. Des guillemets simples ou doubles peuvent être utilisés. Plusieurs attributs sont séparés par un espace ou par un point-virgule (;). Contrairement aux éléments, les attributs ne contiennent généralement pas plusieurs valeurs ni de structure arborescente, sauf pour certaines exceptions du langage XML. Un exemple de définition d'attribut est donné ci-dessous:

```
<Parent Type="example"; Format="string"/>
```

Dans la syntaxe ci-dessus, *Type* et *Format* sont des attributs du mot-clé *Parent*. Les mêmes termes peuvent être définis comme des éléments. Voir l'exemple suivant:

```
<Parent>
  <Type>example</Type>
  <Format>string</Format>
</Parent>
```

A.2 Exigences relatives aux mots-clés

A.2.1 Généralités

Des mots-clés, placés dans les balises de début et de fin sont utilisés pour introduire des descriptions, des valeurs et des sections qui sont spécifiques au fichier. Certains mots-clés, tels que *Unit*, *List*, etc., peuvent être présents dans plusieurs sections. Un mot-clé parent est exigé lorsqu'un mot-clé enfant est présent. Les règles ci-dessous garantissent que le fichier peut être correctement analysé par un analyseur syntaxique XML.

A.2.2 Caractères des mots-clés

Seuls des caractères ASCII, tels que définis dans la norme ANSI X3.4-1986, peuvent être utilisés dans les fichiers. L'utilisation de caractères avec des codes supérieurs à 07E en hexadécimal n'est pas autorisée. D'autre part, les caractères de contrôle ASCII (caractères numériquement inférieurs à 20 en hexadécimal) ne sont pas autorisés, sauf les tabulations ou dans une séquence de terminaison de ligne.

Seuls des caractères alphabétiques ou numériques peuvent être utilisés pour écrire des mots-clés. Les espaces ne sont pas admis. Si nécessaire, le caractère de soulignement "_" peut séparer les parties d'un mot-clé constitué de plusieurs mots.

A.2.3 Syntaxe des mots-clés

Le contenu du fichier est sensible à la casse. Tous les mots-clés doivent être écrits en minuscules en commençant par une lettre majuscule.

A.2.4 Structure d'un fichier

A.2.4.1 Généralités

Les informations à échanger peuvent être enregistrées dans un fichier XML unique ou dans plusieurs fichiers XML et fichiers de données. Les règles et les lignes directrices suivantes garantissent que les fichiers peuvent être correctement localisés par un analyseur syntaxique XML.

A.2.4.2 Noms de fichier

Pour faciliter la portabilité entre systèmes d'exploitation, il convient que les noms de fichiers soient constitués d'un nom de base ne dépassant pas quarante caractères, suivi d'un point ".", suivi d'une extension de nom de fichier ne dépassant pas quatre caractères. Le nom de fichier et l'extension doivent utiliser les caractères du jeu de caractères présenté en A.1.2 (espace, " ", 0x20 exclus). Le nom de fichier doit être défini dans le mot-clé *Filename* de la manière suivante:

```
<Filename>ExampleXML_file.xml</Filename>
```

A.2.4.3 Chemins de fichier

Pour assurer la portabilité et la compressibilité, seuls des chemins relatifs peuvent être utilisés pour définir un nom de chemin. Un chemin absolu n'est pas exportable et n'est pas admis. Le chemin relatif doit commencer par "./" pour indiquer que le nom de chemin du fichier d'image sera ajouté au chemin du fichier XML courant. Il n'est pas admis de remonter à un plus haut niveau que le chemin XML courant (en utilisant par exemple "../"). Par hypothèse, un nom de fichier sans "./" est situé dans le même répertoire que le fichier XML courant.

A.2.4.4 Fichier XML unique

Lorsque les informations sont contenues dans un fichier XML unique, elles doivent être conformes aux règles et aux lignes directrices applicables aux fichiers XML, comme décrit précédemment.

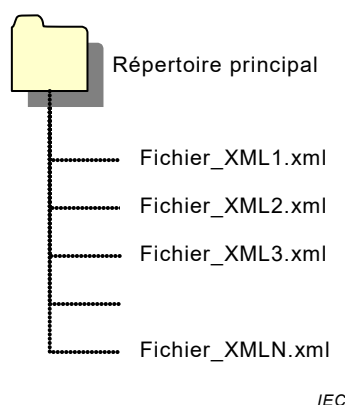
Les données sont incluses dans la section PDN ou IA du fichier dans l'élément XML en utilisant le mot-clé *List* chaque fois que cela est nécessaire.

A.2.4.5 Fichiers XML multiples

Le document XML est divisé en plusieurs sections ayant l'élément racine comme parent. Les informations sur le modèle sont alors définies dans la section racine par des mots-clés tels que *Pdn*, *Ia*, etc. Chaque fichier XML peut contenir une ou plusieurs sections et il doit être

conforme aux règles et aux lignes directrices applicables aux fichiers XML, comme décrit précédemment. Une section doit être présente dans un seul des fichiers XML.

Afin de garantir la portabilité et la compressibilité, tous les fichiers XML doivent être placés dans le même répertoire, comme le montre la Figure A.1. L'analyseur syntaxique XML doit analyser tous les fichiers qui se trouvent dans le répertoire principal.



IEC

Figure A.1 – Fichiers XML multiples

A.2.4.6 Fichiers de données séparés

Les informations peuvent être contenues dans un fichier XML unique ou dans plusieurs fichiers XML et les données peuvent être contenues dans un ou plusieurs fichiers de données supplémentaires. Les fichiers XML doivent être conformes aux règles et aux lignes directrices applicables aux fichiers XML, comme décrit ci-dessus. Les fichiers de données peuvent contenir des lignes de données et les informations d'en-tête doivent être spécifiées avec un point d'exclamation (!) comme premier caractère de chaque ligne d'en-tête (ligne ne contenant pas de données). Il existe toutefois l'exception suivante: pour les fichiers de données avec une extension Touchstone (*.snp, n = 1,2,...) utilisés pour la définition d'un PDN, les lignes commençant par le caractère dièse ("#") sont traitées comme une "ligne d'option" qui spécifie le format de données et les unités relatives aux données Touchstone. Une seule "ligne d'option" est autorisée par fichier de données Touchstone. Les noms et les chemins des fichiers de données sont définis par le mot-clé *Data_files* et doivent être conformes à A.2.4.2 et A.2.4.3.

Pour garantir la portabilité et la compressibilité, les fichiers de données doivent être placés, soit dans le même répertoire que les fichiers XML, soit dans un sous-répertoire situé au même niveau ou à un niveau inférieur à celui des fichiers XML, comme indiqué à la Figure A.2. Il n'est pas admis de placer les fichiers supplémentaires à un niveau supérieur à celui des fichiers XML.

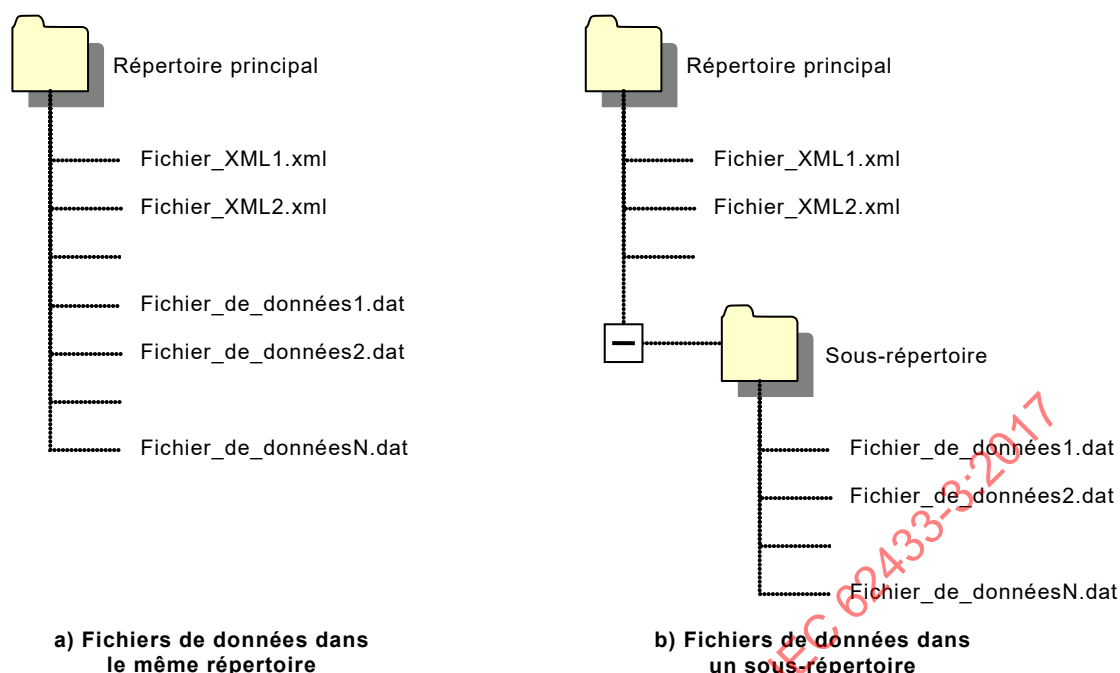


Figure A.2 – Fichiers XML avec des fichiers de données (*.dat)

A.2.4.7 Fichiers supplémentaires

Un fichier XML peut contenir des références à d'autres fichiers, tels que des fichiers de documentation (mot-clé *Documentation*). Pour garantir la portabilité et la compressibilité, ces fichiers supplémentaires doivent être placés soit dans le même répertoire que le fichier XML unique, soit dans un sous-répertoire situé au même niveau ou à un niveau inférieur à celui des fichiers XML, comme indiqué à la Figure A.3. Il n'est pas admis de placer les fichiers supplémentaires à un niveau supérieur à celui des fichiers XML.

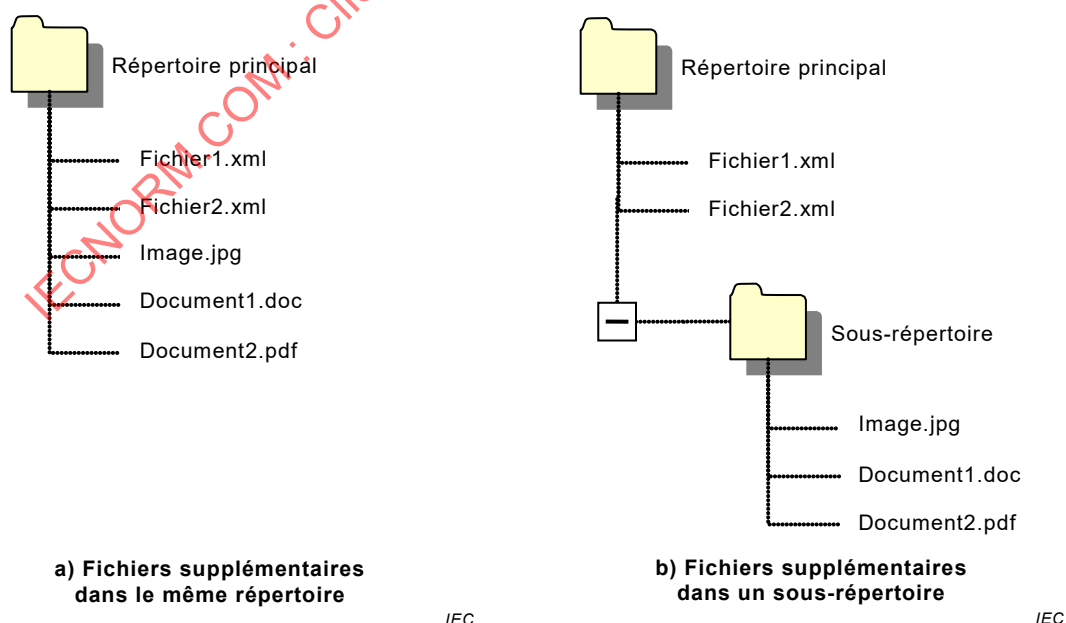


Figure A.3 – Fichiers XML avec des fichiers supplémentaires

A.2.4.8 Compression de fichier

En cas de compression du système de fichiers, des précautions doivent être prises pour inclure dans le fichier compressé les chemins des différents fichiers XML et de données. Ceci garantit la conservation de la structure de fichiers après décompression. Les chemins ne sont pas nécessaires lorsque tous les fichiers sont enregistrés dans le même répertoire.

A.2.5 Valeurs

A.2.5.1 Généralités

Lorsqu'un élément contient une valeur, celle-ci peut être une valeur numérique (par exemple, 123.45), une valeur numérique avec unités (par exemple, 123.45MHz).

A.2.5.2 Syntaxe des valeurs numériques

Les valeurs numériques peuvent être exprimées sous forme décimale, le point (".") constituant le séparateur décimal (par exemple, 123.45) ou en notation scientifique (par exemple, 1.2345e2). Les espaces " " et les virgules "," qui sont souvent utilisés comme séparateurs des milliers, et les autres caractères, ne sont pas autorisés.

Si plusieurs valeurs numériques sont exigées, elles doivent être séparées par des espaces " " ou des caractères de tabulation.

A.2.5.3 Syntaxe des valeurs numériques avec unités

La valeur numérique (voir A.2.5.2) est suivie d'unités valides, comme décrit cela est en A.2.5.5 (par exemple, 123,45MHz). Les espaces ne sont pas autorisés entre la valeur numérique et les unités.

A.2.5.4 Chaîne de caractères

Une chaîne de caractères peut représenter un mot reconnu par l'analyseur syntaxique XML ou peut être un nom de fichier, une description, etc. Une chaîne de caractères peut contenir l'un quelconque des caractères alphanumériques indiqués en A.1.2.

A.2.5.5 Unités valides

Les unités doivent être exprimées sous la forme d'unités SI ou d'unités SI dérivées. Les unités valides sont:

V pour Volt	Ohm	S pour Siemens =1/Ohm
A pour Ampère	Hz pour Hertz	m pour mètre
W pour Watt	s pour seconde	H pour Henry
F pour Farads	ohm.m pour résistivité	Celsius pour degré Celsius
K pour Kelvin	1 pour les grandeurs sans dimensions	

Les unités sont sensibles à la casse.

Les angles sont exprimés en degrés. Le symbole "°" n'est pas exigé. Le pourcentage est exprimé par "%".

Les facteurs d'échelle valides sont:

T = téra: 1e12	c = centi: 1e-2	p = pico: 1e-12
G = giga: 1e9	m = milli: 1e-3	f = femto: 1e-15
M = méga: 1e6	u = micro: 1e-6	a = atto: 1e-18
k = kilo: 1e3	n = nano: 1e-9	

Lorsqu'aucun facteur d'échelle n'est spécifié, les unités sont par hypothèse les unités de base. Celles-ci sont les volts, ampères, watts, ohms, siemens, hertz, mètres, secondes, Henry, Farads, ohm.m, Celsius et Kelvin. Les abréviations des unités (par exemple, pV, nA, ms, MHz) doivent être utilisées à l'exception de l'Ohm qui doit être écrit en entier. Le Tableau A.1 donne une liste d'unités logarithmiques valides.

Tableau A.1 – Unités logarithmiques valides

Utilisation	Symbole	Unité	Référence
Rapport	dB	Décibel	1
Puissance	dBW	Décibel Watt	1W
Puissance	dBmW	Décibel milli-Watt	1mW
Puissance	dBuW	Décibel micro-Watt	1µW
Tension	dBV	Décibel Volt	1V
Tension	dBmV	Décibel milli-Volt	1mV
Tension	dBuV	Décibel micro-Volt	1µV
Ampère	dBA	Décibel Ampère	1A
Ampère	dBmA	Décibel milli-Ampère	1mA
Ampère	dBuA	Décibel micro-Ampère	1µA
Impédance	dBohm	Décibel Ohms	1Ohm
Admittance	dBS	Décibel Siemens	1S

Les unités peuvent être définies dans n'importe quelle section et avec le mot-clé *Unit*. Une description typique d'unité est donnée ci-dessous:

```
<Unit>
    kHz
</Unit>
```

Annexe B (informative)

Champs électromagnétiques rayonnés par un dipôle électrique et magnétique élémentaire

B.1 Dipôle électrique

Les champs électriques $\vec{E}_A$ et magnétiques $\vec{H}_A$ rayonnés par une ligne de courant élémentaire (voir Figure B.1) sont obtenus à partir du potentiel du vecteur magnétique $\vec{A}$:

$$\vec{A}(x, y, z) = \frac{\mu}{4\pi} \int_C \vec{I}_e(x'_1, y'_1, z'_1, x'_2, y'_2, z'_2) \frac{e^{-jkR}}{R} dl' \quad (\text{B.1})$$

où:

(x, y, z) (x'_1, y'_1, z'_1) et (x'_2, y'_2, z'_2) μ R C	sont les coordonnées du point où les champs électrique et magnétique sont évalués, représentent les coordonnées de la source, est la perméabilité du milieu étudié, est la distance entre l'observation et la source, est le contour du segment de ligne.
--	---

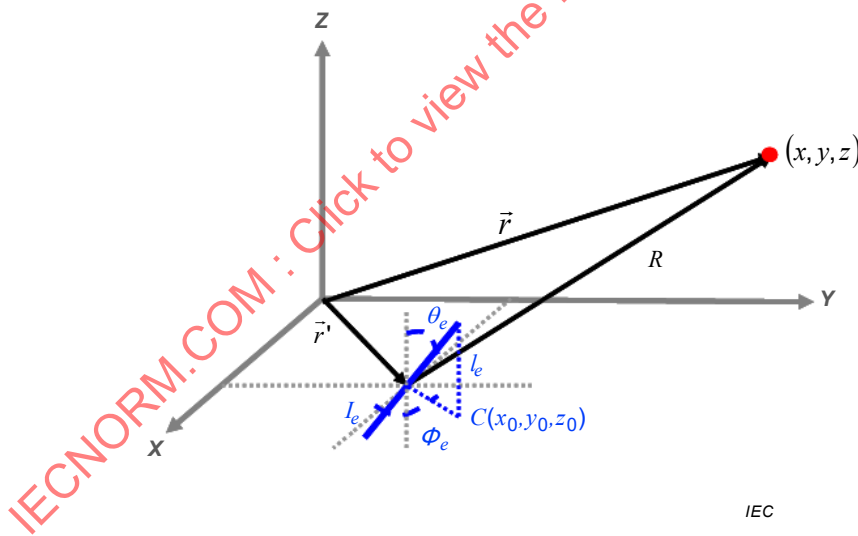


Figure B.1 – Ligne de courant élémentaire dans l'espace

Si la ligne de courant est suffisamment fine et petite par rapport à la longueur d'onde et si le point d'observation est suffisamment éloigné par rapport à la longueur à l'élément de courant, il est pratique de représenter l'élément de courant par son centre (x_0, y_0, z_0) , où $x_0 = \frac{x_{01} + x_{02}}{2}$, $y_0 = \frac{y_{01} + y_{02}}{2}$, $z_0 = \frac{z_{01} + z_{02}}{2}$, (x_{01}, y_{01}, z_{01}) et (x_{02}, y_{02}, z_{02}) représentant les coordonnées de début et de fin du vecteur du dipôle. Ainsi, l'équation (B.1) peut être approchée par:

$$\vec{A}(x, y, z) = \frac{\mu I_e l_e}{4\pi R} e^{-jkR} (\sin \theta_e \cos \phi_e \hat{x} + \sin \theta_e \sin \phi_e \hat{y} + \cos \theta_e \hat{z}) \quad (\text{B.2})$$

où:

Φ_e est l'orientation du dipôle en azimut

θ_e est l'orientation du dipôle en site

I_e est le courant circulant dans le dipôle

l_e est la longueur du dipôle

$$R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$$

Le champ magnétique rayonné peut être évalué à partir de:

$$\vec{H}_A = \frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times \vec{A} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \hat{x} + \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \hat{y} + \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \hat{z} \quad (B.3)$$

Les trois composantes du champ magnétique peuvent s'exprimer comme suit:

$$H_{A,x} = -\frac{I_e l_e}{4\pi R^3} e^{-jkR} \cdot (1 + jkR) \cdot [(y - y_0) \cdot \cos \theta_e - (z - z_0) \cdot \sin \theta_e \sin \phi_e] \quad (B.4)$$

$$H_{A,y} = -\frac{I_e l_e}{4\pi R^3} e^{-jkR} \cdot (1 + jkR) \cdot [(z - z_0) \cdot \sin \theta_e \cos \phi_e - (x - x_0) \cdot \cos \theta_e] \quad (B.5)$$

$$H_{A,z} = -\frac{I_e l_e}{4\pi R^3} e^{-jkR} \cdot (1 + jkR) \cdot \sin \theta_e \cdot [(x - x_0) \cdot \sin \phi_e - (y - y_0) \cdot \cos \phi_e] \quad (B.6)$$

Le champ électrique rayonné peut être obtenu à partir de:

$$\vec{E}_A = \frac{1}{j\omega\epsilon} \vec{\nabla} \times \vec{H}_A = \frac{1}{j\omega\epsilon} \left(\frac{\partial H_{A,z}}{\partial y} - \frac{\partial H_{A,y}}{\partial z} \right) \hat{x} + \frac{1}{j\omega\epsilon} \left(\frac{\partial H_{A,x}}{\partial z} - \frac{\partial H_{A,z}}{\partial x} \right) \hat{y} + \frac{1}{j\omega\epsilon} \left(\frac{\partial H_{A,y}}{\partial x} - \frac{\partial H_{A,x}}{\partial y} \right) \hat{z}$$

Les trois composantes du champ électrique sont:

$$E_{A,x} = C_R \{ \Delta k \cdot R^2 \cdot \sin \theta_e \cos \phi_e - \Delta k_3 \cdot \Delta x \cdot [\Delta x \cdot \sin \theta_e \cos \phi_e + \Delta y \cdot \sin \theta_e \sin \phi_e + \Delta z \cdot \cos \theta_e] \}$$

$$E_{A,y} = C_R \{ \Delta k \cdot R^2 \cdot \sin \theta_e \sin \phi_e - \Delta k_3 \cdot \Delta y \cdot [\Delta x \cdot \sin \theta_e \cos \phi_e + \Delta y \cdot \sin \theta_e \sin \phi_e + \Delta z \cdot \cos \theta_e] \}$$

$$E_{A,z} = C_R \{ \Delta k \cdot R^2 \cos \theta_e - \Delta k_3 \cdot \Delta z \cdot [\Delta x \cdot \sin \theta_e \cos \phi_e + \Delta y \cdot \sin \theta_e \sin \phi_e + \Delta z \cdot \cos \theta_e] \}$$

où

$$C_R = \frac{k^2}{j\omega\epsilon} \frac{I_e l_e}{4\pi R^3} e^{-jkR}$$

$$R = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$$

$$\Delta x = x - x_0$$